

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/321587426>

Recursos Minerais no Brasil problemas e desafios

Chapter · December 2017

CITATIONS

0

READS

12

3 authors, including:



Colombo Gaeta: Tassinari

University of São Paulo

227 PUBLICATIONS 3,664 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Fabio Taioli

University of São Paulo

45 PUBLICATIONS 149 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

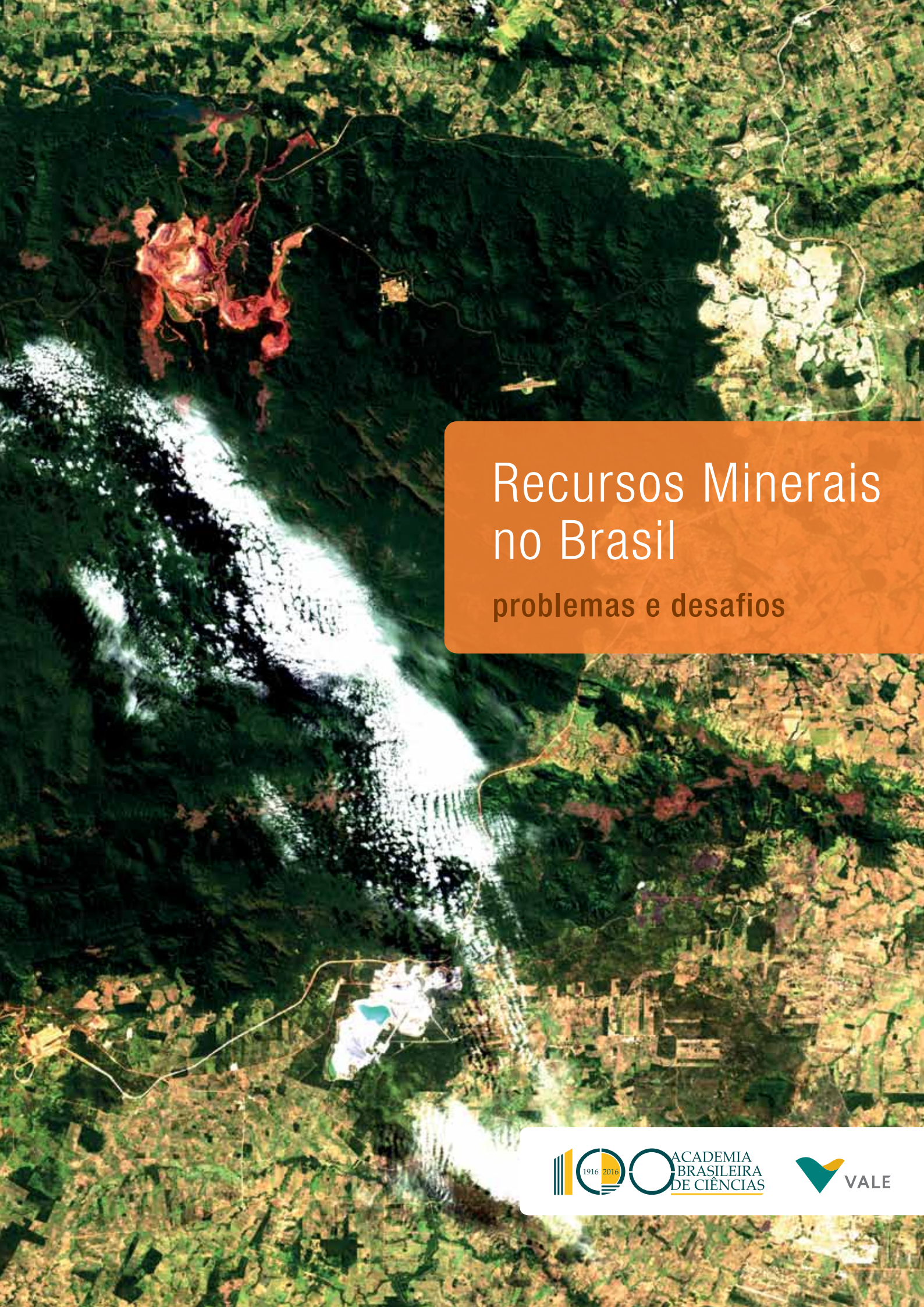
Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Geological re-evaluation and survey on geochronological data from the southern domain of the Carajás Province (Sossego-Cristalino trend). Innovative techniques for prospection of polymetallic IOCG-type ore deposits. [View project](#)



Forensic and Environmental use of Geophysics [View project](#)



Recursos Minerais no Brasil

problemas e desafios



ACADEMIA
BRASILEIRA
DE CIÊNCIAS



VALE

Recursos Minerais no Brasil

problemas e desafios

Membros Institucionais da Academia Brasileira de Ciências



Recursos Minerais no Brasil

problemas e desafios

Organizadores

Adolpho José Melfi

Aroldo Misi

Diogenes de Almeida Campos

Umberto Giuseppe Cordani

Rio de Janeiro, 2016



© Direitos autorais, 2016, de organização, da
Academia Brasileira de Ciências
Rua Anfilóbio de Carvalho 29 3ª Andar
20030-060 Rio de Janeiro RJ Brasil
Tel. (55 21) 3907-8100
www.abc.org.br

© Direitos de publicação reservados por
Academia Brasileira de Ciências e
Vale S.A.
Avenida das Américas 700 3º piso Loja 318
22640-100 Rio de Janeiro RJ Brasil
www.vale.com

Colaboradores

Aline Drumond (Vale)
Beatriz Alvernaz (Vale)
Marcos Cortesão Barnsley Scheuenstuhl (ABC)
Vitor Vieira de Oliveira Souza (ABC)

Revisão

Veronica Maioli Azevedo

Projeto gráfico e diagramação

Aline Carrer

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios /

Adolpho José Melfi, Aroldo Misi, Diogenes de Almeida Campos e
Umberto Giuseppe Cordani (organizadores). – Rio de Janeiro: Academia
Brasileira de Ciências, 2016.

420 p.

ISBN: 978-85-85761-40-0

1.Geologia econômica. 2.Recursos minerais – Brasil. 3.Metalogenia –
Brasil. I. Melfi, Adolpho José. II. Misi, Aroldo. III. Campos, Diogenes de
Almeida. IV. Cordani, Umberto Giuseppe. V. Academia Brasileira de Ciências.
VI. Título.

CDD 553.0981

APRESENTAÇÃO

A Academia Brasileira de Ciências (ABC) tem, de longa data, se preocupado com os gargalos e desafios da política e da pesquisa relacionadas à exploração mineral no Brasil. Tal preocupação tem relação com sua própria gênese, por ter sido fundada por um grupo de engenheiros, dentre outros cientistas, com interesses voltados para minerais e rochas de uso industrial. Ilustrativo desta relação é o fato de que Eusébio Paulo de Oliveira, diretor do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, veio a ser o quarto presidente da ABC, no período de 1931-1933.

Compreendendo que a exploração dos recursos minerais requer a utilização maciça do conhecimento científico que se tem do subsolo e da gênese dos depósitos minerais, e procurando desenhar cenários sobre a futura demanda de recursos minerais, inclusive os energéticos, a ABC decidiu instituir, no ano de 2011, um Grupo de Estudos sobre Recursos Minerais. Este grupo tem como objetivo congrega alguns dos principais pesquisadores brasileiros, da área das Ciências da Terra, para estabelecer a visão da ABC sobre estratégias de utilização da ciência para a promoção do uso sustentável dos recursos minerais em nosso país. Tais estratégias são determinantes para que o Brasil possa explorar sua potencialidade mineral, de forma eficiente e sustentável, em benefício da sociedade brasileira e em prol de uma inserção mais competitiva do país na economia global.

Dando início aos trabalhos deste Grupo de Estudos, a Academia organizou, em agosto de 2013, o simpósio “Recursos Minerais no Brasil: Problemas e Desafios”. O evento reuniu alguns dos principais cientistas brasileiros que refletem sobre o setor mineral, representantes do governo e de algumas das principais empresas e associações da área, para debater temas como “O Brasil no Mundo Mineral”, “Potencial Mineral do Brasil”, “Recursos Energéticos de Origem Mineral” e “Brasil Mineral: Visão de Futuro”.

A partir dos diferentes olhares proporcionados pelo amplo elenco de atores presentes ao simpósio, uma profunda reflexão foi realizada, permitindo aos presentes um rico momento de pensar e repensar o setor mineral brasileiro, avaliando a inserção do mesmo no contexto global, bem como cenários e perspectivas estratégicas futuras para o setor, vis a vis a economia nacional e internacional. O passo seguinte do grupo, mais ousado, foi buscar consolidar em uma publicação, com um olhar mais apurado e atualizado, a visão de especialistas sobre o atual cenário, os gargalos e os desafios inerentes ao setor mineral brasileiro.

Fruto deste esforço, é com muito orgulho que ora apresentamos o livro “Recursos Minerais no Brasil: Problemas e Desafios”. Esta publicação contou com o inestimável apoio de especialistas de todo o país, que, de forma desprendida e visando contribuir com o desenvolvimento e fortalecimento de nosso setor mineral, dispuseram-se a cerrar fileiras com a ABC para produzir o presente volume.

Não posso deixar de destacar, também, o indispensável apoio da Vale, empresa que é Membro Institucional da ABC. Desde o início a Vale apoiou os trabalhos deste Grupo de Estudos, e a própria edição e publicação deste livro. É importante que se registre que tal suporte de forma alguma tolheu a liberdade e a livre manifestação da visão dos autores, cujos artigos refletem opiniões não necessariamente endossadas pela companhia, ou mesmo pela ABC. Fica aqui o registro de nosso reconhecimento e agradecimento aos autores e à Vale.

Cabe, por fim, ressaltar o fundamental apoio que a ABC tem recebido do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes). Sem estes, boa parte dos trabalhos desenvolvidos pela Academia ficaria simplesmente inviabilizado.

Ao concluir meus agradecimentos, devo deixar consignado o reconhecimento à enorme contribuição do Prof. Jacob Palis Jr, a quem tenho a honra de suceder na presidência da ABC, para a viabilização deste volume. Foi em seu período frente à Academia que se instituiu o Grupo de Estudos da ABC sobre Recursos Minerais no Brasil, que ora apresenta seu mais novo produto. Se hoje tenho a satisfação de apresentar mais um volume da série “Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento Nacional: Estudos Estratégicos”, isso só se faz possível graças ao espírito inovador de nosso ex-presidente, que também foi o idealizador desta série.

Esperamos, com o trabalho do Grupo de Estudos da ABC sobre Recursos Minerais e, em especial, através da publicação que ora lançamos, contribuir com reflexões estratégicas que ajudem a orientar governo, empresas e formuladores de políticas públicas, e a sociedade brasileira como um todo, no importantíssimo desafio de se pensar, planejar e fortalecer o setor mineral de nosso país. Dado o peso deste em nosso PIB, políticas acertadas para o setor podem contribuir, de forma decisiva, para o resgate de uma espiral econômica ascendente, que permita a retomada do desenvolvimento e a ampliação da inclusão social conquistada na última década. Com o aporte da visão da ciência e da tecnologia, almejamos contribuir com esse processo.



Luiz Davidovich

Presidente - Academia Brasileira de Ciências



APRESENTAÇÃO

A riqueza de uma nação não decorre de seu ouro e sua prata, mas sim da capacidade de aprendizagem, na sabedoria e integridade moral de seu povo. Em tradução livre do pensamento de Kalil Gibran, a reflexão que cabe neste preâmbulo é que o conhecimento sobre nossa bagagem geológica, recursos minerais, e nossa capacidade de explorá-los de forma responsável são importante alicerce de nosso futuro. De fato, muito da perspectiva histórica e de algumas das cicatrizes de nosso passado decorreu do uso inadequado e do entendimento imperfeito de nossas riquezas minerais.

Assim, a derrama, enquanto dispositivo fiscal aplicado no século XVIII em Minas Gerais, decorre do desconhecimento da exaustão das jazidas de ouro e alimenta o espírito dos Inconfidentes.

As reflexões trazidas pelos diferentes capítulos deste trabalho são assim nossa grande riqueza. É com esta sabedoria e com este conhecimento que poderemos melhor trabalhar nossos bens minerais e saber deles extrair riqueza para nossa sociedade. Nossos recursos minerais não serão transformados em bens materiais e em riqueza se não os conhecermos e trabalharmos corretamente. Noruega, Suécia, EUA, Austrália e Canadá são, ou foram, potências minerais que souberam alicerçar seu futuro nos materiais de seu subsolo. O Brasil tem potencial igual ou maior ao daquelas sociedades. Os problemas e os desafios dos recursos minerais do Brasil são muitos, mas não são maiores que a capacidade da nossa ciência e de nossa sociedade, como bem atesta este trabalho, cuja qualidade é uma decorrência natural da reconhecida competência dos autores.



Luiz Eugênio Mello

Academia Brasileira de Ciências
Instituto Tecnológico Vale



Foto: Salviano Machado / Agência Vale



PREFÁCIO

No momento, o setor mineral atravessa um período de grande dificuldade. Isso se dá, principalmente, em virtude da falta de recursos para a implementação de planejamentos já definidos, da falta de recursos humanos qualificados para o desenvolvimento do setor e, sobretudo, pela longa demora do Congresso em discutir e aprovar o novo Marco Regulatório para o Setor Mineral, o que tem provocado desinteresse por novos investimentos por parte do setor privado. A especificidade das legislações referentes aos monopólios dos hidrocarbonetos e dos minerais radioativos, com flexibilização no caso do petróleo e gás e absoluta rigidez no caso do urânio, tem, também, contribuído para esse quadro de dificuldade. Mudanças na legislação referente aos hidrocarbonetos, ocorridas em passado recente, têm sido criticadas pela indústria privada e resultaram, como no caso dos minerais não monopolizados, em uma grande diminuição do interesse no aproveitamento desses recursos, principalmente nos depósitos do assim chamado pré-sal. Muito recentemente, no entanto, o Congresso Nacional aprovou medidas no sistema de exploração que parecem vir favorecer a exploração desses depósitos. Por outro lado, a legislação monopolista do urânio impede a participação da indústria privada na exploração desses recursos. A Academia Brasileira de Ciências, sempre no sentido de discutir, sob a óptica da ciência, os grandes problemas que afetam a economia e o desenvolvimento do país, decidiu organizar um grande simpósio sobre **Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios**, que, além de evidenciar a preocupação da Academia com a grave situação apresentada pela política de pesquisa e exploração dos recursos minerais existentes em nosso país, teve por objetivo mostrar os desafios que o setor mineral brasileiro tem que enfrentar para atingir a posição que ele deveria ocupar no cenário mundial.

Os resultados obtidos pelo simpósio, com base nas palestras apresentadas por relevantes personalidades do setor mineral, originadas do mundo acadêmico, governamental e do setor privado, e nas ricas discussões surgidas durante os debates, motivaram a ABC a produzir uma publicação que refletisse os pensamentos, as preocupações e as angústias quanto ao futuro do nosso setor mineral.

O livro **Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios** é resultado do esforço e dedicação de cerca de 70 especialistas em várias áreas do setor mineral, envolvendo desde a prospecção e a exploração mineral até o beneficiamento desses recursos.

O livro encontra-se organizado em sete capítulos, onde são discutidos os temas: Potencial Mineral do Brasil; Exploração Mineral no Brasil; Tecnologia Mineral; Matriz Energética e Recursos Minerais; Ambiente e Sustentabilidade; Formação de Recursos Humanos para a Mineração e Considerações Finais sobre o Setor Mineral Brasileiro e Visão de Futuro.

O capítulo I - **Potencial Mineral do Brasil** analisa o panorama geral da geologia e da metalogenia brasileira, onde fica demonstrada, claramente, a tão decantada potencialidade do nosso território, no tocante à ocorrência dos mais diversos tipos de depósitos minerais, não somente pela nossa grande extensão territorial, mas também à grande diversidade de ambientes geológicos presentes. Os bens atualmente de maior importância para a economia do país, tais como ferro, ouro, nióbio, terras raras, potássio, fósforo, níquel, cobre, zinco e alumínio, são abordados em doze artigos, por diferentes especialistas em cada um desses bens minerais, tratando mais especificamente os aspectos relacionados às aplicações industriais, produção, reservas, mercado e principais tipos de depósitos.

O capítulo II - **Exploração Mineral no Brasil** discorre sobre os métodos e modelos utilizados na descoberta de depósitos minerais. Apresentados em cinco artigos, cada um refletindo os pontos de vista de cada autor na utilização dos principais métodos utilizados nos trabalhos de prospecção mineral, tais como: Sensoriamento Remoto, Prospecção Geofísica e Prospecção Geoquímica. A integração dos dados obtidos pela aplicação destas técnicas com a geologia tem por objetivo gerar mapas de prospectividade mineral e a análise do conjunto dos dados e de sua integração permitirá a construção de modelos de depósitos minerais e de sistemas minerais que, por sua vez, levarão à identificação de áreas propícias a aplicação dos métodos exploratórios.

O capítulo III - **Tecnologia Mineral** apresenta uma síntese dos principais avanços e dos desafios e perspectivas da tecnologia mineral brasileira. Sete artigos compõem este capítulo, sendo o primeiro voltado para a apresentação do panorama geral de investimentos em PD&I no setor. Três outros tratam das áreas clássicas em que se divide a mineração: lavra mineral, beneficiamento de minérios e metalurgia extrativa. Os demais apresentam tópicos considerados atualmente muito importantes para a mineração brasileira: minerais estratégicos, água e energia na mineração e tecnologias para a sustentabilidade ambiental.

O capítulo IV - **Matriz Energética e Recursos Minerais**, com seus seis artigos, nos fornece, inicialmente, uma visão geral da matriz energética do país, enfatizando a sua principal característica, que permite sua distinção das matrizes energéticas dos países industrializados, no tocante à elevada participação de fontes renováveis. Quatro artigos abordam os aspectos geológicos dos campos produtores de petróleo, os problemas ambientais e econômicos envolvidos na prospecção e exploração do gás não convencional, considerado uma alternativa energética potencialmente válida para o país, bem como o pequeno papel do carvão na nossa matriz energética atual e a perspectiva futura deste bem mineral por meio da valorização do carvão nacional, sabidamente de baixa qualidade, por meio da modernização das usinas de geração de energia e de sua utilização como carvão siderúrgico. Um tópico é consagrado à formação de recursos humanos na área de extração e uso de carvão para fins energéticos e industriais. O urânio, combustível nuclear, mereceu uma abordagem histórica no tocante à evolução da prospecção e das pesquisas em território nacional, o que levou ao descobrimento de várias jazidas e à quantificação de importantes reservas que sobrepõem a demanda atual. Se no momento a participação do urânio na matriz energética do país é insignificante, no futuro ela deverá sofrer um crescimento importante, pois no Plano Nacional de Energia – PNE 2013, encontra-se assinalada a construção entre quatro a oito novas usinas nucleares, ampliando sua importância na matriz energética brasileira. Finalmente, neste capítulo é feita uma reflexão sobre as condições e processos que conduziram à hegemonia do petróleo face às demais alternativas energéticas bem como suas repercussões no campo ambiental, geopolítico e econômico.

O capítulo V - **Ambiente e Sustentabilidade** resume os desafios socioeconômicos e ambientais da mineração no Brasil e sua interação com o meio ambiente. São apresentadas as legislações normativas em vigor no país, às quais a indústria extrativa mineral encontra-se submetida, como o EIA, RIMA, Licenças Ambientais (Prévia - LP, de Instalação - LI, de Operação - LO), etc. São discutidos os problemas relativos à necessidade de aprovação do novo Marco Regulatório da Mineração, que se encontra no Congresso Nacional, para ser votado, desde 2013 (Projeto de Lei 5.807/13) Por meio de vários exemplos, são mostradas que existem atividades de mineração que provocam danos ambientais, por vezes irreparáveis, como é o caso recente da barragem do Fundão (Mineração Samarco), cujo rompimento provocou a devastação de uma grande área ao longo do vale do Rio Doce, mas existem exemplos em que a mineração é conduzida de forma sustentável, provocando pouco impacto no ambiente original, como no caso de Trombetas, mineração de bauxita (alumínio), na região Norte do país. Os exemplos mostram que a indústria de extração mineral no Brasil pode e deve caminhar no sentido de incorporar critérios de sustentabilidade em suas atividades, o que é totalmente possível. A mineração na Amazônia recebeu um artigo à parte, não somente pelas suas ricas províncias minerais comparáveis às

das principais regiões produtoras do mundo, mas também pelo fato de apresentar a coexistência de três estágios tecnológicos de utilização dos recursos minerais: coleta mineral (povos indígenas), extrativismo mineral (garimpos) e mineração organizada (grandes empresas). Por outro lado, se conduzida com responsabilidade e em bases técnicas adequadas, a mineração certamente poderá se configurar uma alternativa viável para o desenvolvimento sustentável de uma grande porção da Amazônia, propiciando a geração de benefícios amplos e duradouros.

O capítulo VI - **Formação de Recursos Humanos para a Mineração** aborda um ponto de alta relevância para a mineração. Após uma breve reflexão sobre a importância da formação de recursos humanos para vencer os desafios colocados pelos problemas estruturais de economia, da educação, do mercado e da sociedade brasileira, os autores apresentam e discutem os dados relativos à evolução dos cursos, vagas e concluintes em Geologia e Engenharia de Minas, que sofreu um impacto positivo com a criação dos cursos de Geologia no país, na década de 1960. A formação de recursos humanos é apresentada como fundamental para o desenvolvimento do setor, em todas suas fases: prospecção mineral, extração mineral e tratamento e aproveitamento do bem mineral. Apesar do crescimento do número desses profissionais ter sido grande, ele pode ser considerado ainda baixo, face a importância da área para o desenvolvimento econômico do Brasil. Entretanto, a demanda de Engenheiros e Geólogos, tendo em vista o cenário econômico do país, segundo dados do IPEA para o período até 2020, tenderá a cair, de modo que não haverá falta de profissionais para o setor da mineração. Apesar disso, há necessidade de uma gestão estratégica para o futuro para evitar o êxodo desses profissionais, como aquele ocorrido nas décadas de 1980 e 1990, para diferentes setores (financeiro, público e acadêmico) por causa da retração do mercado de trabalho na área industrial.

O capítulo VII - **Considerações Finais sobre o Setor Mineral Brasileiro e Visão de Futuro** traz uma perspectiva histórica do setor mineral, analisando em seguida diversos aspectos abordados nos capítulos anteriores e ressaltando os pontos mais importantes e estratégicos para o país. Não resta dúvida sobre a importância do setor mineral para a economia de nosso país e, apesar do momento de dificuldade que estamos atravessando, não podemos deixar de investir na valorização do enorme potencial disponível. Foram apresentadas seis sugestões de medidas gerais que poderiam ser tomadas pelos órgãos governamentais e pelas empresas de mineração no sentido de estimular a exploração mineral do nosso território e fazer funcionar a tão necessária parceria entre os mundos acadêmico-empresarial. Como última, porém não menos importante, sugere ações políticas da comunidade para que o Setor Mineral seja incluído na relação dos itens de Tecnologias Críticas ou Estratégicas do documento Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (ENCTI 2016-2019), da mesma forma como ocorreu com o Setor Agropecuário.

Agradecimentos

Os organizadores do livro agradecem à Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) pelo apoio financeiro, sem o qual este livro não teria sido publicado. Igualmente, nossos agradecimentos são endereçados aos 66 autores, provenientes dos setores acadêmico, governamental e privado, responsáveis pelos textos apresentados, que deram vida a esse livro. Agradecem, ainda, à continuada atividade desenvolvida por Marcos Cortesão Barnsley Scheuenstuhl, na qualidade de Secretário-Executivo do Grupo de Estudos de Recursos Minerais, com o apoio de sua equipe na Academia, especialmente, o de Vitor Vieira de Oliveira Souza, tanto na organização do Simpósio, como na preparação do livro. A eles deve-se, sem dúvida, o processo de editoração dos manuscritos neste volume que agora se tem em mãos.

Adolpho José Melfi

Aroldo Misi

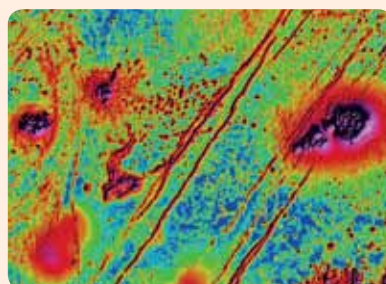
Diogenes de Almeida Campos

Umberto Giuseppe Cordani



I Potencial Mineral do Brasil

Potencial Mineral do Brasil	18
Onildo João Marini	
Formações ferríferas e minério de alto teor associado	
O minério de ferro no Brasil – geologia, metalogênese e economia	32
Carlos Alberto Rosière / Vassily Khoury Rolim	
Ouro no Brasil: principais depósitos, produção e perspectivas	46
Lydia Maria Lobato / Marco Aurélio da Costa / Steffen G. Hagemann / Rodrigo Martins	
Nióbio – desenvolvimento tecnológico e liderança	60
Tadeu Carneiro	
Os elementos terras raras e sua importância para o setor mineral do Brasil	68
Milton Luiz Laquintinie Formoso / Vitor Paulo Pereira / Egydio Menegotto / Lauro Valentin Stoll Nardi / Artur Cezar Bastos Neto / Maria do Carmo Lima e Cunha	
Potássio no Brasil	84
Yara Kulaif / Ana Maria Góes	
Fosfato no Brasil	96
Maisa Bastos Abram	
Minério de níquel sulfetado no Brasil	116
João Batista Guimarães Teixeira	
O níquel no Brasil e seus depósitos lateríticos	124
Marcondes Lima da Costa	
Potencial mineral: cobre	134
Caetano Juliani / Lena V. S. Monteiro / Carlos Marcello Dias Fernandes	
Zinco no Brasil: tipos de depósitos, reservas e produção	156
Aroldo Misi	
Alumínio e bauxita no Brasil	166
Marcondes Lima da Costa	



II Exploração Mineral no Brasil

Exploração mineral no Brasil: uso de modelos de depósitos minerais e sistemas minerais	176
Jorge Silva Bettencourt / Caetano Juliani / Lena Virgínia Soares Monteiro	
Sensoriamento remoto em exploração mineral no Brasil	190
Alvaro Penteado Crôsta / Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida / Waldir Renato Paradella / Sebastião Milton Pinheiro da Silva / Paulo Roberto Meneses	
Prospecção geofísica no Brasil	208
Renato Cordani	
Prospecção geoquímica no Brasil	214
Otávio Augusto Boni Licht / Rômulo Simões Angélica	
Integração de dados & exploração mineral	232
Carlos Roberto de Souza Filho / Adalene Moreira Silva	



III Tecnologia Mineral

Tecnologia mineral: pesquisa, desenvolvimento e inovação	
Panorama na mineração brasileira	244
Fernando A. Freitas Lins	
A lavra e a indústria mineral no Brasil – tendências tecnológicas e desafios de inovação	248
Jair Carlos Koppe	
Beneficiamento de minérios	256
Claudio L. Schneider / Elvies Matiolo / Reiner Neumann / Otávio F. M. Gomes	

Metalurgia extrativa	264
Ronaldo L. Santos / Marisa Nascimento / Andrea C. Rizzo / Claudia Duarte Cunha	
Minerais estratégicos: terras raras e lítio	272
Marisa Nascimento / Ronaldo L. Santos / Paulo F. A. Braga / Sílvia C. A. França	
Água e energia na mineração	278
Fernando A. Freitas Lins	
Tecnologias para a sustentabilidade ambiental	282
Fernando A. Freitas Lins / Andrea C. Rizzo / Claudia Duarte Cunha / Francisco Mariano Lima	



IV

Matriz Energética e Recursos Minerais

Matriz energética brasileira e recursos minerais	290
José Goldemberg	
O petróleo no Brasil	302
Claudio Riccomini / Lucy Gomes Sant'Anna / Colombo Celso Gaeta Tassinari / Fábio Taioli	
O pré-sal e a geopolítica e hegemonia do petróleo face às mudanças climáticas e à transição energética	316
Ildo Luís Sauer	
Gás não convencional: uma alternativa energética possível para o Brasil	332
Colombo Celso Gaeta Tassinari / Claudio Riccomini / Fábio Taioli	
Elemento combustível nuclear: urânio	340
Evando Carele de Matos	
Distribuição, reservas e características dos depósitos de carvão no Brasil – implicações para a contribuição na matriz energética, meio ambiente, sustentabilidade e recursos humanos	350
Wolfgang Kalkreuth / Priscila Lourenzi / Eduardo Osório	



V

Ambiente e Sustentabilidade

Desafios sociais e ambientais da mineração no Brasil e a sustentabilidade	364
Célio Bermann	
Mineração – presente e futuro da Amazônia	376
Elmer Prata Salomão / Antonio Tadeu Corrêa Veiga	



VI

Recursos Humanos

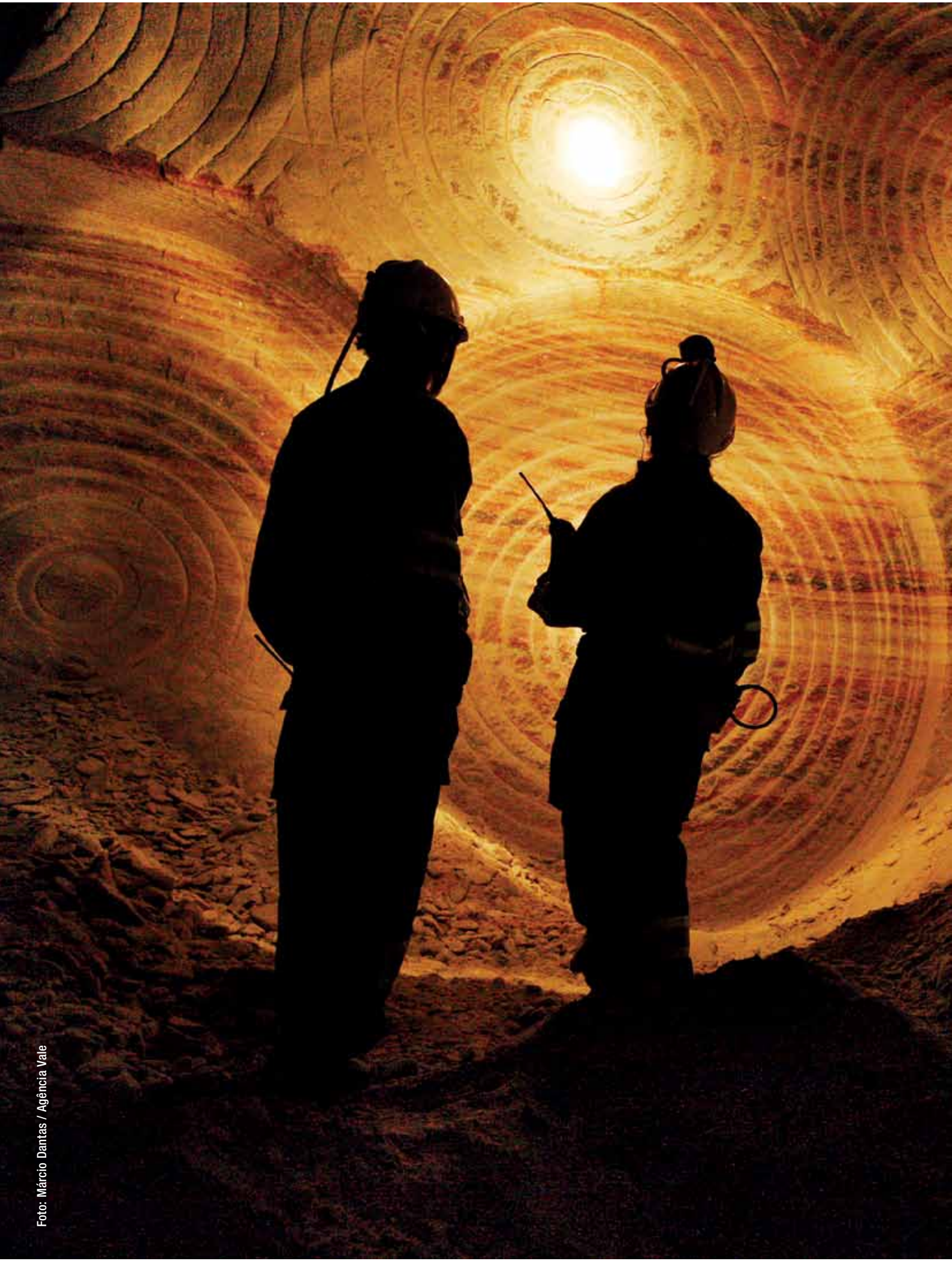
Formação de recursos humanos para a mineração	396
Miguel Antônio Cedraz Nery / Marina P. P. Oliveira	



VII

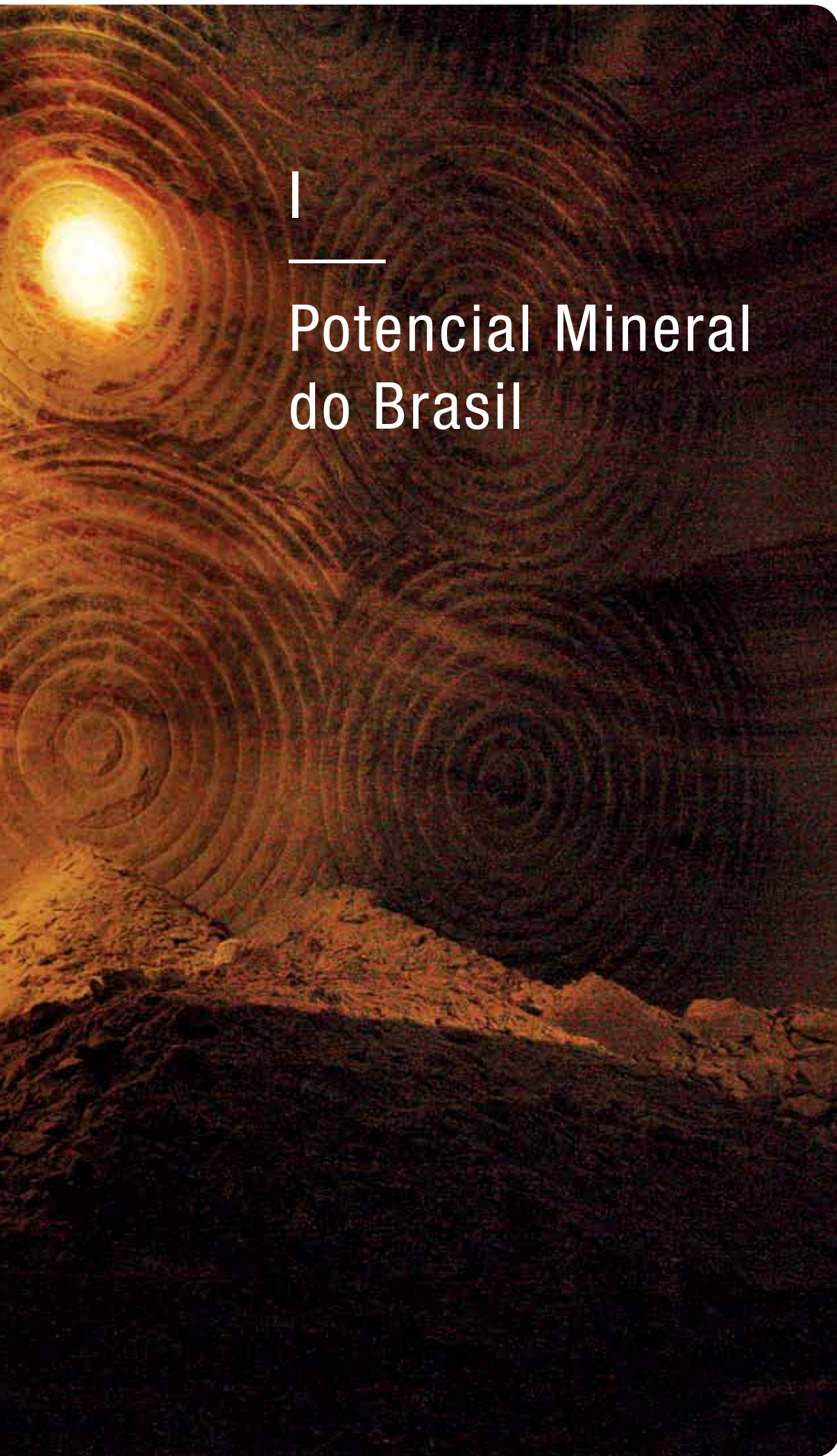
Considerações Finais

Considerações finais sobre o setor mineral brasileiro e visão de futuro	406
John Forman / Adolpho José Melfi / Aroldo Misi / Diogenes de Almeida Campos / Umberto Giuseppe Cordani	





Potencial Mineral do Brasil



Potencial Mineral do Brasil

Onildo João Marini

Diretor Executivo, Agência para o Desenvolvimento
Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira (ADIMB)

RESUMO

O Brasil tem elevado potencial para descobertas de novos depósitos minerais por contar com território continental, geologia diversificada e mal conhecida, múltiplos ambientes metalogenéticos do Arqueano ao Recente e baixos investimentos em exploração mineral. O país é exportador de *commodities* minerais: *player* mundial em Fe, Nb, Al, Mn, Grafita e Amianto; exportador de Sn, Au, Ni, Ta, Caulim e Magnesita. O minério de Fe representa 82% das exportações minerais do país. Os Estados de Minas Gerais, Pará, Bahia e Goiás concentram mais de 80% da produção nacional de *commodities* minerais. O Brasil é grande importador de K, P, Carvão metalúrgico, Zn e Cu. Dentre os ambientes metalogenéticos do país destacam-se: *greenstone belts* arqueanos e paleoproterozoicos (Au, Ni, Mn, Fe, Cr e Magnesita); sequências vulcano-sedimentares com BIFs neoarqueanas (Fe, Mn, Au, Pt, Pd, Cu); sequências sedimentares paleoproterozoicas e neoproterozoicas com BIFs (Fe, Mn, Au), maciços básicos-ultrabásicos proterozoicos (Ni, Cu, Cr, Zn, V, Ti, P, Amianto, EGP); plataformas clásticas proterozoicas (Au, Di); complexos vulcano-plutônicos félsicos proterozoicos (Sn, Au, Ag, Cu, Zr, U, Zn, Ta, Li, Be, W, ETR); faixas orogenéticas proterozoicas e coberturas neoproterozoicas (Au, Zn, Pb, Ta, P, Mn); bacias sedimentares paleo-mesozoica e mesozoicas (Carvão, K, U, P, Zn, Gipsita); chaminés alcalinas carbonatíticas cretáceas (Nb, P, U, Al, Fe, Barita, ETR, Flogopita/Vermiculita); mantos de intemperismo pós-cretácicos (Fe, Ni, Al, Au, Mn, ETR); aluviões quaternárias (Au, Sn, Ta, Ti, U/Th, Zr, Caulim). Com só 155 minas de *commodities* minerais de médio e grande portes, o Brasil foi mal prospectado na sua metade leste e incipientemente na Amazônia.

Palavras-chave Brasil. Geologia. Mineral. *Commodities*. Ambientes metalogenéticos. Potencial.

PANORAMA GERAL DA GEOLOGIA E DA METALOGENIA BRASILEIRA

O registro geológico do Brasil evidencia ambientes férteis em todo o tempo geológico, do Arqueano ao Holoceno, contendo importantes acumulações de bens minerais, algumas das quais já transformadas em minas. Face à vasta área do território brasileiro e à diversificada metalogenia, a presente síntese oferece uma rápida visão panorâmica sobre os aspectos essenciais do potencial mineral do Brasil. Maiores detalhes serão apresentados nos capítulos específicos das distintas regiões ou províncias minerais.

Sumariamente, em termos geotectônicos, pode-se dividir o Brasil em duas partes: o Amazônico (Oeste) e o Atlântico (Leste), tendo como elemento divisor a faixa de dobramentos Paraguai-Araguaia. Dentre várias outras, duas características geotectônicas maiores diferenciam os dois blocos.

O Brasil do Leste, englobando as regiões Centro-Oeste, Sul, Sudeste e Nordeste, diferencia-se do Brasil Amazônico (Oeste) por conter cinturões orogenéticos de idade neoproterozoica (brasilianos) circundando o Cráton do São Francisco e núcleos menores, bem como a borda leste do Cráton Amazônico.

O Brasil Amazônico, que contém o Cráton Amazônico e está dividido nos escudos do Brasil Central e o das Guianas, diferencia-se por ter ficado inerte à orogenia brasileira e por ter sido palco do extenso vulcanismo-plutonismo ácido Iriri/Uatumã, de idade paleoproterozoica.

Pode-se resumir as características geográficas e de conhecimento geológico/exploratório desses dois tratos do território nacional da seguinte forma:

Brasil Amazônico: 60% do território nacional, floresta tropical, infraestrutura viária e energética muito

limitada, baixa população, conhecimento geológico/metalogenético muito básico, poucas minas de porte significativo, garimpos ativos ou em extinção, potencial para depósitos superficiais ou em subsolo.

Brasil Atlântico: 40% do território nacional, vegetação de cerrado, caatinga, resíduos da mata atlântica e campos sulinos; densamente povoado, infraestrutura viária e energética razoável, maior conhecimento geológico/metalogenético, oportunidade para reabertura de minas abandonadas e para descobertas em subsuperfície.

A geologia do Brasil, com amplos escudos antigos (Figura 1), é similar à de países também com áreas continentais, como a Austrália e o Canadá. Esses, porém, realizaram seus potenciais em metais preciosos (Ouro-Au, Prata-Ag) e metais base (Cobre-Cu, Zinco-Zn, Chumbo-Pb e Níquel-Ni), que constituem as principais *commodities* minerais, o que não ocorreu com o Brasil. O Brasil, até o momento, realizou, essencialmente, seu potencial em Ferro-Fe, Manganês-Mn, Alumínio-Al, Estanho-Sn e Nióbio-Nb.

A produção mineral nacional de *commodities* e outros elementos metálicos (Tabela 1) mostra haver no país predominância de depósitos minerais de elementos siderófilos (Ferro-Fe, Níquel-Ni, Cromo-Cr, Cobalto-Co) e de elementos litófilos (Alumínio-Al, Manganês-Mn); sendo poucas as jazidas de elementos calcófilos (Cobre-Cu, Chumbo-Pb, Zinco-Zn, Cádmio-Cd, Mercúrio-Hg) existentes no país.

Os ambientes metalogenéticos brasileiros têm revelado raros depósitos de sulfetos, o que tem sido interpretado como resultante da baixa concentração de Enxofre nos magmas. Pode ser que se deva simplesmente à falta de conhecimento adequado dos ambientes metalogenéticos brasileiros.

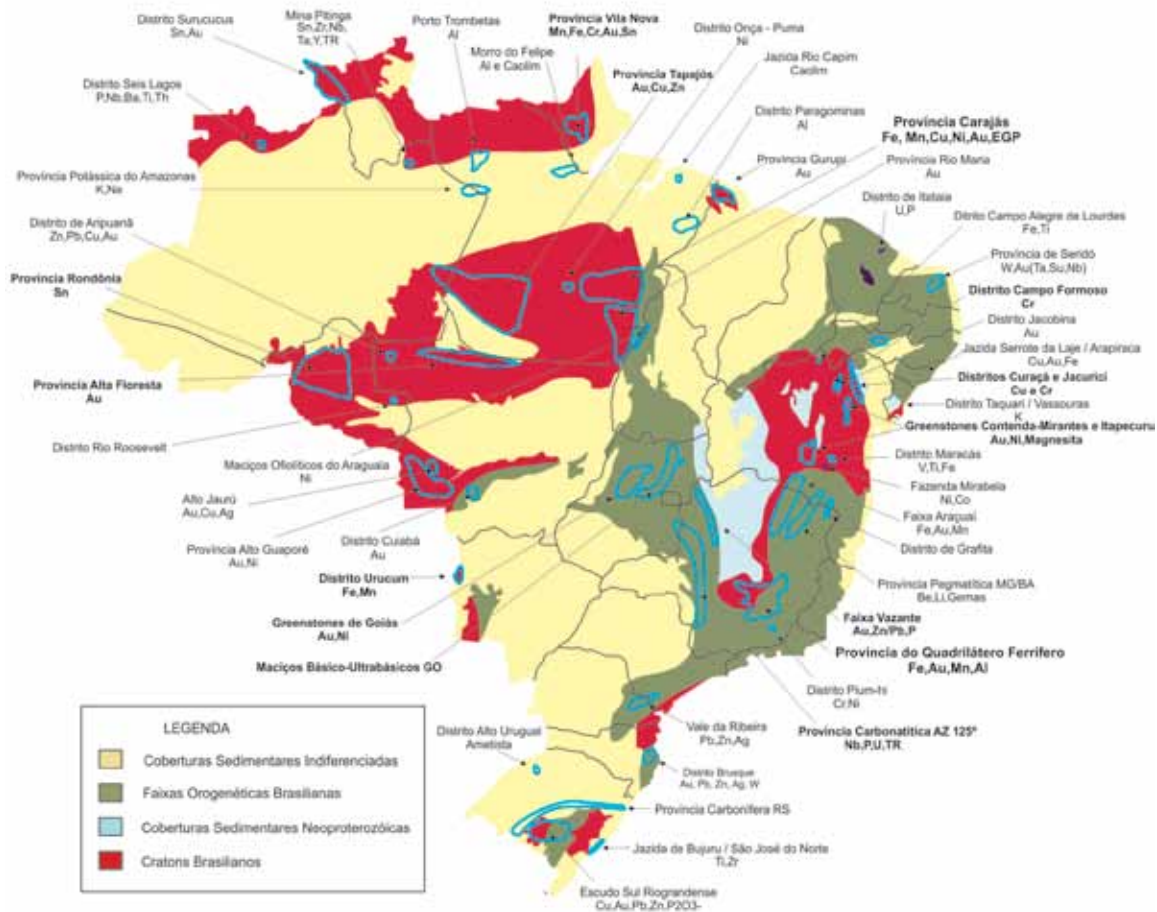


Figura 1 Esboço das principais províncias e distritos mineiros do Brasil (Fonte: Elaborada pelo autor).

Teixeira et al. (2014), resumiu os potenciais de três importantes ambientes metalogenéticos do Brasil: os *greenstone belts*, tanto do arqueano como do paleoproterozoico, mostram limitado vulcanismo cálcio-alcalino e, com raras exceções, ausência de depósitos de Cu e Zn, bem como raros depósitos de Ni, embora seus Komatiitos tenham químicas similares àquelas de *greenstones belts* com muitos depósitos de Ni do Canadá e da Austrália. O plutono-vulcanismo ácido paleoproterozoico da Província Mineral dos Tapajós, com inúmeros depósitos de pequeno/médio porte de Au, exibe rochas porfíricas, processos *High Sulphidation-HS* e *Low Sulphidation-LS*, bem como depósitos atribuídos ao tipo pórfiro, porém, com presença muito limitada de sulfetos. Os depósitos de Au em conglomerados paleoproterozoicos de Jacobina (BA) e

Moeda (MG), embora sejam comparados com aqueles do Witwatersrand (Rand) na África do Sul, produzem uma fração mínima de Au comparativamente ao Rand.

Duas principais províncias metalogenéticas brasileiras e quatro conjuntos de distritos mineiros, dentre as centenas existentes no país, são responsáveis pela maior parte das minas e depósitos minerais de porte significativo: Província Mineral Ferro-Aurífera do Quadrilátero Ferrífero (MG), Província Mineral Polimetálica de Carajás (PA), distritos de *greenstones belts* auríferos de Goiás, Bahia e Minas Gerais, e distritos de maciços básico-ultrabásicos de Goiás, Bahia e Pará. São estas províncias e distritos minerais que fazem com que os estados de Minas Gerais, Pará, Goiás e Bahia (Figura 1) sejam responsáveis pela produção de 80%, em valor, das *commodities* minerais brasileiras.

PRODUÇÃO MINERAL BRASILEIRA

Segundo o DNPM (comunicação pessoal de Walter Lins Arcoverde, Diretor do Departamento Nacional da Produção Mineral), estão cadastradas no órgão 10.841 “minas”, incluindo toda e qualquer substância mineral e de qualquer porte. Dessas, 98,1% representam produtos para a construção civil (britas, areias, cascalhos, argilas), além de água mineral. Apenas 1,4% das 10.841 “minas” representam minas de *commodities* minerais de grande e médio porte, ou seja, minas verdadeiras e significativas na concepção internacional.

O DNPM elenca as minas de acordo com a sua produção bruta (*run-of-mine*) em três categorias de porte: grande porte, acima de 1 milhão t/ano; médio porte, entre 1 milhão t/ano e 100 mil t/ano; e pequeno porte, entre 100 mil t/ano e 10 mil t/ano. Nesta síntese serão consideradas apenas as minas com mais de 100 mil t/ano (grande e médio porte).

Com base nos critérios acima, são apenas 155 minas brasileiras de *commodities* minerais de grande e médio porte: 57 de metais ferrosos (Fe e Mn), 21 de metais preciosos (Au), 39 de metais base e outros (Ni, Al, Cu, Zn, Cr, Nb, Sn, Titânio-Ti e Wolfrâmio-W) e 23 de não metálicos (Fosfato- P_2O_5 , Caulim, Amianto, Potássio-K, Grafita, e Magnesita), além de uma de Urânio-U. As minas nacionais de Carvão, embora algumas sejam de grande e médio porte, não fazem parte do comércio internacional de minérios. São minas de carvão de baixo poder calorífico, utilizado essencialmente em termoeletricas no país. O Brasil é dependente do mercado externo para carvão metalúrgico.

A maior parte das minas brasileiras opera a céu aberto, cabendo destacar aquelas de classe internacional: Nb de Araxá (MG); Fe do Quadrilátero Ferrífero (MG); Fe de Carajás (PA); Fosfato de Salitre, de Tapira, de Araxá (MG) e de Catalão (GO); Ni de Niquelândia (GO) e de Barro Alto (GO), Santa Rita (BA), Onça-Puma (PA); Bauxita- Al_2O_3 de Oriximiná, Juriti, Trombetas, e Paragominas (PA), e São Lourenço (MG); Caulim de

Barcarena e Ipixuma (PA), Grafita de Tijucu Preto, da Paca e Zé Crioulo (MG), e de Imídia (BA); Magnesita de Brumado (BA); Carvão de Candiota (RS); Au de Paracatu (MG); Fe/Mn de Urucum (MS); Mn de Azul (PA), Sn de Pitinga, Bom Futuro e Massangana (RO); Cu de Salobo (PA).

Dentre as substâncias minerais comercializadas pelo Brasil, aquelas com maiores saldos superavitários na balança comercial são Ferro, Caulim e Bauxita (Al_2O_3) que representam, em valor, mais de 90% das exportações de *commodities* minerais (só o Fe representa 82%). Os maiores saldos deficitários são devidos ao Potássio, Carvão, Fosfato, Zinco e Enxofre, que representam, em valor, cerca de 90% do total de minérios importados.

A Tabela 1, baseada em informações do DNPM e do IBRAM, sintetiza a situação das reservas, da produção e do mercado internacional, bem como elenca as principais minas de *commodities* do Brasil.

Em 2012, antes do agravamento da crise que paralisou grande parte dos prospectos brasileiros de depósitos minerais, a Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira - ADIMB (MELLO, 2014) identificou 321 projetos de prospecção mineral em fase de sondagem: 53 projetos de ferrosos (Fe e Mn) nos estados de MG, PA, BA, RN, SE, MT, PI, AP, sendo 5 deles de classe internacional; 97 projetos de metais base e outros (Cu, Ni, Al, Zn, W, Ti, Vanádio-V, Al (Bauxita), Elementos do Grupo da Platina-EGP, W, Molibdênio (Mo), Cromo (Cr) e Terras Raras (TR), sendo alguns de grande porte e muito promissores; 127 projetos de metais preciosos (Au), poucos deles de porte significativo; e 40 projetos de exploração mineral para *commodities* não metálicas (K, P_2O_5 , Diamante e Caulim).

Face aos seus vultos e diversidades, as campanhas de prospecção em andamento naquele ano bem demonstram a confiança e o interesse que empresas e investidores tinham no potencial mineral investigado.

Tabela 1 Reservas, produção e situação no mercado das *commodities* minerais e principais minas brasileiras, em 2012/2013.

Minério	Reserva (em 1000t)	Produção (t/ano)	% global	Situação	Principais minas
Amianto	10.515	304.321	15,2	Grande exportador (Player mundial, 4º)	Cana Brava (GO)
Bauxita (Al_2O_3)	590.000	33.260.000	12,7	Grande exportador (Player mundial, 2º)	São Lourenço (MG), Juriti (PA), Oriximiná (PA), Paragominas (PA), Itamarati de Minas(MG).
Carvão	2.154.000	6.630.000	0,1	Grande importador	Criciúma (SC), Candiota e outras 20 minas no RS.

Minério	Reserva (em 1000t)	Produção (t/ano)	% global	Situação	Principais minas
Cobre	11.419	223.100	1,3	Importador*	Chapada (GO), Sossego (PA), Salobo (PA), Caraíba (BA).
Estanho	341.033	13.667.000	5,94	Exportador	Bom Futuro (RO), Massangana (RO), São Lourenço (RO)
Ferro	19.948.000	400.822.000	13,4	Grande exportador (Player mundial, 2º)	33 no Quadrilátero Ferrífero (MG), N4, N5 e S11 (PA)**
Fosfato (P ₂ O ₅)	270.000	6.740.000	3,2	Grande importador	MCT (MG), Lagamar (MG), Irecê (BA, Catalão(GO), Ouvidor (GO), Cajati (SP).
Grafita	39.805	88.000	8	Grande exportador (Player mundial, 3º)	Tijuco Preto (MG), Imidia (BA), da Paca (MG), Zé Crioulo (MG)
Magnesita	239.342	479.000	7,4	Exportador	Brumado (BA).
Manganês	53.500	1.118.000	6,6	Exportador (Player mundial, 2º)	Azul (PA), Lucas (MG), Urucum (MS), Comin (MS), Buritirama (PA), Morro da Mina (MG).
Nióbio	10.565	82.214	93,52	Grande exportador (Player mundial, 1º)	Barreiro (MG), Boa Vista (GO).
Níquel	8.658	139.531	6,2	Exportador	Santa Rita (BA), Buriti (GO), Barro Alto (GO), Niquelândia (GO), Onça-Puma (PA).
Ouro	2,6	67	2,5	Exportador	Fazenda Nova (GO), Aurizona (MA), Jacobina (BA), Morro do Ouro (GO), Pedra Branca do Amapari (AP), Crixás (GO), São Vicente (MT), São Francisco (MT), Santa Bárbara (MG), Sabará (MG), Cocaís (MG), Caeté (MG).
Potássio (KCl)	14.925	346.000	1	Grande importador	Taquari/Vassouras (SE).
Tântalo	35	118	16,8	Grande exportador (Player mundial, 2º)	Garimpos
Zinco	2.079	164	1,2	Importador	Vazante (MG), Morro Agudo (MG).

*S11 está prevista para entrar em produção em 2016. **Com a entrada em produção da segunda etapa da mina de Salobo (PA) o Brasil tornar-se-á autossuficiente em Cu. (Fonte: LIMA, T.M.; NEVES, C.A., 2013; IBRAM, 2012).

PRINCIPAIS AMBIENTES, ÉPOCAS E PROVÍNCIAS METALOGENÉTICAS BRASILEIRAS

Com base nos dados apresentados por Bizzi et al. (2003), Dardenne e Schobbenhaus (2001), Leite e Saes (2000), Misi et al. (2012), Schobbenhaus e Coelho (1988), Schobbenhaus et al. (1994), e Silva et al. (2014), sobre as províncias, distritos mineiros e depósitos minerais do Brasil, é apresentada a síntese selecionada da Figura 1. Nela se destacam os seguintes e principais ambientes e épocas que caracterizam a metalogênese do território brasileiro, com as seguintes características: 1 - *Greenstone belts* arqueanos e paleo-

proterozoicos e sequências vulcano-sedimentares arqueanas; 2 - Formações ferríferas bandadas (BIF) proterozoicas e neoarqueanas; 3 - Maciços básico-ultrabásicos arqueanos e proterozoicos; 4 - Complexos vulcano-plutônicos félsicos proterozoicos; 5 - Plataformas clásticas diamantíferas e auríferas proterozoicas; 6 - Faixas orogenéticas e coberturas neoproterozoicas; 7 - Bacias Sedimentares paleomesozoicas; 8 - Chaminés alcalinas carbonatíticas cretácicas; 9 - Mantos de intemperismo e aluviões pós-cretácicos; 10 - Outros ambientes metalogenéticos e distritos mineiros de menor significado. Marini e Queiróz (1991) apresentaram e discutiram os referidos ambientes.

Greenstone belts arqueanos e paleoproterozoicos e seqüências vulcano-sedimentares arqueanas

As seqüências vulcano-sedimentares *greenstone belts* e similares, arqueanas e paleoproterozoicas, constituem-se nos mais antigos ambientes metalogenéticos do Brasil, ricos em Au e Mn e, secundariamente, em Ni, Cr e Magnesita. Suas províncias e distritos mineiros mais significativos ocorrem no Quadrilátero Ferrífero (Rio das Velhas), em Conselheiro Lafayete, em Serro e em Fortaleza de Minas-Piumhi (MG), na Província Rio Maria no sudeste do Pará (PA) (Inajá, Gradaus, Seringa, Andorinhas, Identidade, Sapucaia, Maria Preta e Rio Novo), no norte (Mundo Novo, Rio Salitre), no centro-sul (Paramirin, Contenda-Mirante) e no centro-leste (Rio Itapecuru) da Bahia, na região central de Goiás (Goiás Velho, Crixás, Guarinos, Pilar de Goiás e Hidrolina), na região de Gurupi no norte do Maranhão (Distrito de Aurizona), em Carajás (PA) e na Serra do Navio (AP/AM). Os depósitos de Au associados a este ambiente metalogenético são, em geral, de médio a pequeno portes, tipo veio ou estratiformes. Lobato et al. (2001), detalham as características dos depósitos de Au de vários dos *greenstone belts* nacionais.

Entre os *greenstone belts* brasileiros, o mais fértil em Au, com mineralizações tipo *gold only* orogenético, é o Rio das Velhas (LOBATO et al., 2001), que possui dezenas de minas em operação, grande parte subterrâneas, dentre elas Morro Velho (extinta), Cuiabá, Lamego, Córrego do Sítio, Turmalina e Paciência. Além de Au, o *greenstone belt* Rio das Velhas (MG) contém minas de Esmeralda e Topázio Imperial. O *greenstone belt* de Santa Terezinha de Goiás (GO) contém minas de Esmeralda, e o de Contendas-Mirante (BA), minas de Magnesita.

Quase a totalidade da fantástica produção de Au do Brasil durante o Ciclo do Ouro foi proveniente de aluviões e coluviões associadas aos *greenstone belts* dos Estados de Minas Gerais e Goiás.

Os ambientes de *greenstone belts* brasileiros, contrariamente ao que ocorre nos seus congêneres do Canadá e da Austrália, têm se mostrado pouco férteis em sulfetos de metais base (Ni, Cu, Zn), sendo que pequenos depósitos destes metais foram detectados apenas em Fortaleza de Minas (MG) e Crixás (GO); ocorrências em vários outros locais.

Duas seqüências vulcano-sedimentares arqueanas, similares a *greenstone belts*, merecem destaque especial por suas elevadíssimas fertilidades em metais, as províncias polimetálicas de Carajás (PA) e de Vila Nova (PA-AP). Carajás constitui-se na maior província mineral do Brasil (uma das maiores do planeta), sendo portadora, além das minas gigantes de Fe (N4, N5, S11)

e de dezenas de outros depósitos de Fe ainda inexplorados, de minas e depósitos de Mn (Azul e Buritirama), e de minas do tipo Cobre/Ouro/Óxido de Ferro- IOCG (Sossego, 118, Salobo). Dezenas de depósitos deste tipo e similares acham-se em prospecção na região (Cristalino, Alemão/Igarapé Bahia, Pojuca, Cinzento, Gameleira, Serra Verde, Breves, Estrela e outros). Vizinhas à Serra de Carajás ocorrem a mina de Ni laterítico Onça-Puma e depósitos similares (Vermelho, Jacaré), além da jazida de Cr (Ni, EGP) de Luanga, associada a maciço básico-ultrabásico intrusivo. Na Serra Pelada, em sedimentos da Formação Águas Claras, no topo da seqüência Carajás, formou-se o mais fantástico depósito de Ouro (Paládio-Pd e Platina-Pt) garimpado no Brasil no último século.

A Província de Carajás tem grande potencial para gerar dezenas de novas minas de Fe, Cu, Mn, Au e Ni. A Província Vila Nova, similar a Carajás, forneceu ao país seu maior depósito de Mn (Serra do Navio), intensamente minerado desde a Segunda Guerra Mundial, hoje com minério oxidado já esgotado. Ocorrem também na província depósitos de Cr (Bacuri, Igarapé do Breu), Fe (Bacabal), e Au (Amapari). A maior parte da Província Serra do Navio encontra-se na Reserva Nacional do Cobre - RENCA, interdita para exploração mineral para a iniciativa privada, o que vem impedindo a exploração de uma das províncias nacionais com potencial para vários tipos de depósitos.

Embora os principais depósitos brasileiros secundários de óxidos/hidróxidos de Mn já tenham sido esgotados ou encontrem-se em estágio avançado de mineração, seus protominérios (queluzitos, gonditos e similares) constituem-se em importantes reservas de Mn a serem exploradas no futuro, como já ocorre em Conselheiro Lafayete (MG).

Formações de Ferríferas Bandadas (BIF) Proterozoicas e Neoarqueanas

No neoarqueano (Carajás-PA) e no palaeoproterozoico (Quadrilátero Ferrífero-MG), em ambientes de plataforma continental, formaram-se os mega depósitos de Fe brasileiros, e no neoproterozoico, em ambiente glacial, os depósitos de Fe e Mn de Urucum (MS) e Porteirinha (MG).

As Formações Ferríferas Bandadas de Carajás e do Quadrilátero Ferrífero, originalmente com teores de pouco mais de 30% de Fe, sofreram importantes enriquecimentos em ambiente laterítico pós-cretácico elevando seus teores a até 68% de Fe (os mais altos existentes no planeta). Delas são extraídos os minérios de Fe que constituem a maior riqueza mineral brasileira. Os depósitos de Fe do Quadrilátero Ferrífero ocorrem

em camadas sedimentares contínuas e salientes na topografia de itabirito compacto da Formação Cauê, Grupo Itabira, Supergrupo Minas (Rosière et al. 2008), sendo explorado em cerca de 30 minas de grande porte, das quais são exemplos: Serra da Moeda, Fazendão, Timbopeba, Alegria, Cauê, Brucutu, Cuiabá e Conceição. Ao norte, na região de Conceição do Mato Dentro, ocorre o depósito de Fe da Serra da Serpentina, que deu origem ao Projeto Minas-Rio.

Os depósitos de Ferro de Carajás (PA), apresentados no item anterior, foram também facilmente identificados pelas manchas de vegetação muito pobre ou ausente em meio à floresta no topo das serras. Constituem-se em reservas substanciais e de fácil mineração.

Depósitos de Fe do tipo BIF ocorrem em vários estados brasileiros: Amapá, Piauí, Ceará, Sergipe, Bahia, Minas e Mato Grosso. A viabilidade econômica dos mesmos dependerá do mercado e do preço futuro do Fe, bem como de infraestrutura adequada.

Maçços Básico-Ultrabásicos Arqueanos e Proterozoicos

Estes maciços plutônicos, na maior parte do meso e neoproterozoico (alguns arqueanos), foram responsáveis pelo aporte de Ni em silicatos em seus níveis ultrabásicos, os quais, ao alterarem-se em regime laterítico do Cretáceo ao Recente, deram origem a importantes depósitos de Níquel laterítico. As principais províncias de maciços básico-ultrabásicos ocorrem na região centro-norte de Goiás, Cana Brava (Amianto), Niquelândia (Ni), Barro Alto (Ni e Bauxita), no sul de Goiás, depósitos de Americano do Brasil (Cu) e Mangabal (Ni); no sudeste do Pará, Morro do Quatipuru (Ni); no leste do Tocantins, Conceição do Araguaia e Araguaína (Ni); no distrito cuprífero de Tucuruvi/Curaçá e Caraíbas (Cu), no distrito cromífero de Jacurici/Serra Itaúba (Cr), no distrito polimetálico (Fe, V, Ti, Pt, P_2O_5) do Rio Jacaré e Campo Alegre de Lourdes e na Fazenda Mirabela/Itajubá (Cu) na Bahia; e no Vale do Guaporé (Ni) no sul de Rondônia (DARDENNE; SCHOBENHAUS, 2001; JOST et al., 2001; SCHOBENHAUS et al., 1984).

Importantes cordões de maciços básico-ultrabásicos de potencial mineral desconhecido ocorrem no norte do Pará (Mapuera-Cachorro) e na região central de Roraima (Caracará/Serra do Parimã) (SCHOBENHAUS et al., 1984).

Os maciços básico-ultrabásicos brasileiros foram muito pouco pesquisados até o momento, podendo revelar importantes depósitos de sulfetos de metais base (Ni, Cu, Zn) em profundidade.

Complexos Vulcano-Plutônicos Félsicos Proterozoicos

Na porção central do Cráton Amazônico ocorreu, no paleoproterozoico, o vulcano-plutonismo ácido Uatumã/Iriri, o maior conhecido na Terra, distribuindo-se ao sul da Bacia do Amazonas por toda a região sul do Pará, extremo norte do Mato Grosso e extremo sudeste do Amazonas. Neste ambiente formaram-se duas importantes províncias metalogenéticas auríferas de grande dimensão: Províncias do Tapajós e Província Alta Floresta. Essas províncias são muito similares em geologia e metalogenia, estando separadas pelos sedimentos clásticos do Grupo Beneficiente (Serra do Cachimbo). Seus depósitos, essencialmente de Au (com teores modestos de Cu, Mo, Ag), tem sido atribuídos aos tipos veio, pórfiro, epitermal e relacionado a granitos (JULIANI et al., 2005; COUTINHO, 2008; LEITE; SAES, 2000).

Dados oficiais revelam que 200 toneladas (t) de Au foram extraídas da Província Tapajós pela garimpagem de aluviões e coluviões. Extraoficialmente estima-se em 900 t. As aluviões e coluviões destas províncias auríferas foram exauridas em quase sua totalidade. São conhecidos, no entanto, várias centenas de alvos para Au em rocha primária, que vêm sendo pesquisados por mais de 40 empresas juniores. Nos últimos 10 anos foram identificadas e cubadas, somente na Província Aurífera do Tapajós (PA), 552 t de Au contido em apenas oito dos principais projetos de prospecção mineral em execução na região (Tocantinzinho, 80 t; São Jorge, 54 t; Cuiú-Cuiú, 40 t; Coringa, 28 t; Palito, 21 t; Ouro Roxo, 20 t; Boa Vista, 10 t; e Volta Grande do Xingu, 224 t.) (ELTON PEREIRA, comunicação pessoal). Dentre os principais depósitos primários na Província Alta Floresta destacam-se: Luizão, Alvo X1, Serrinha, Bigode, Pombo, Edu. Ambas as províncias apresentaram ainda alto potencial para Au e baixo potencial, pelo conhecimento atual, para sulfetos de Cu, Zn, Mo.

Ao norte da Bacia do Amazonas, no norte dos Estados do Amazonas e do Pará, no âmbito do vulcano-plutonismo Uatumã/Mapuera, também de idade paleoproterozoica, ocorre a Província Estanífera de Pitinga, com mina de Sn e com potencial para Nb, Zircônio (Zr), Tântalo (Ta), TR e Ytrio (Y).

O vulcano-plutonismo Sururucucus, em terras indígenas no extremo norte de Roraima, é rico em Sn, Au e Ta, possuindo também potencial para outros metais. Por situar-se em terras indígenas é inacessível para a mineração empresarial. A garimpagem ilegal, porém, atua abertamente na região.

Também de grande importância por sua riqueza em Sn cabe destaque ao plutonismo félsico de Rondônia e do noroeste do Mato Grosso, onde se formaram no neoproterozoico, na Província Estanífera de Rondônia, os maiores depósitos de Sn do Brasil, associados às fácies albitizadas de granitos anorogênicos (BETTENCOURT et al., 2001). Dentre outros, citamos as jazidas de Massangana, Ariquemes, São Carlos, São Lourenço, Pedra Branca, Santa Bárbara, Oriente Novo, Jacundai e Bom Futuro, cujas colúviões se encontram em fase de exaustão. A província possui, porém, alto potencial para futuras explorações de Cassiterita- Sn nas fácies de graissens e albititos primários de seus granitos.

De menor importância, porém portadora de depósitos de Sn e Terras Raras Pesadas- TRP associados a granitos anorogênicos albitizados do mesoproterozoico, é a Província Estanífera do Norte de Goiás.

Pequenos distritos mineiros auríferos isolados, de ambientes plutônicos similares de idade proterozoica, ocorrem ainda no Rio Grande do Sul, Paraná, Minas Gerais, Bahia, Goiás e Amapá (SCHOBENHAUS et al., 1994; SILVA et al., 2014).

Também associada a intrusões graníticas destaca-se a Província Pegmatítica Oriental do Brasil, no sudeste da Bahia e nordeste de Minas Gerais, com pegmatitos portadores de Li, Be, Ta. Constitui-se, juntamente com o Distrito do Alto Uruguai (RS), nas duas principais regiões produtoras de pedras coradas do Brasil.

Plataformas Clásticas Diamantíferas e Auríferas Proterozoicas

Em ambiente de plataforma continental formaram-se, no mesoproterozoico, conglomerados diamantíferos na região de Diamantina (MG), na Chapada Diamantina (BA), e no norte de Roraima. Embora esses conglomerados proterozoicos apresentem baixos teores de Diamante, as colúviões e aluviões deles resultantes foram intensamente explotadas durante o Ciclo do Diamante na região do Espinhaço Meridional (Diamantina, Minas Gerais) e no Espinhaço Setentrional, na Chapada Diamantina (Lençóis, Andaraí, Mucugê, Xique-Xique-BA). Na atualidade nenhum conglomerado diamantífero está sendo minerado no Brasil. O baixo teor e a alta dureza da rocha não permitem o aproveitamento econômico do Diamante.

Conglomerados auríferos de idade paleoproterozoica foram identificados no Quadrilátero Ferrífero (MG) (Formação Moeda), na Serra da Jacobina (BA) e, recentemente, no sul do Pará (Castelo dos Sonhos). O depósito de Jacobina (BA) está sendo minerado e o de

Castelo dos Sonhos, em fase adiantada de definição das reservas. Esse último depósito abre perspectivas para a identificação de depósitos similares no sul do Pará.

Faixas Orogenéticas e Coberturas Neoproterozoicas

As faixas orogenéticas neoproterozoicas que circundam os crátons do São Francisco, Amazônico, Gurupi e Rio de La Plata, bem como o complexo orogenético da Borborema, geraram poucos depósitos minerais significativos. Exceção é feita à Faixa Vazante, situada na borda oeste do Cráton do São Francisco, que abriga as maiores minas de Au (Paracatu) e de Zn (Vazante) nacionais, além de outros depósitos de Zn (Morro Agudo) e de Fosfato (Lagamar), discutida, entre outros, por Bettencourt et al. (2001) e Dardenne e Schobbenhaus (2001).

A Faixa Araçuaí, a leste do Cráton do São Francisco, contém depósitos de Fe no Distrito de Nova Aurora (Porteirinha) e de Au (Zagaia e Riacho dos Machados), e na sua porção mais interna a maior Província Pegmatítica de Minas Gerais e Bahia: distritos de Esmeralda Feliz, Conselheiro Penna, Pedra Azul, Araçuaí, Malacacheta, Caratinga (SILVA et al., 2014).

A Faixa Araguaia, à borda do Cráton Amazônico, apresenta jazidas de Níquel laterítico em seus ofiolitos do Araguaia; enquanto a Faixa Paraguai, contém jazidas de Au em Cuiabá (MT) e minas de Fe e Mn em Urucum (MS).

No sul do país, a Faixa Ribeira já produziu Pb, Zn e Ag (Perau e Panelas); enquanto a Faixa Dom Feliciano, formou depósitos de Cu, Zn e Pb na região de Camaquã (RS).

As coberturas neoproterozoicas do Cráton do São Francisco (grupos Bambuí, Bebedouros e Uma), revelaram até o momento pequenos depósitos de Pb, Zn, Ag (Fluorita e Fosfato), com destaque para o Distrito da Bacia do Irecê (MISI et al., 2005; SILVA; MISI, 1999).

No nordeste, no Complexo da Borborema, destacam-se a Província Scheelitífera de Brejui, na Faixa Seridó (W e Au), a Província Pegmatítica do Seridó (Ta, Li, Be, Turmalina Paraíba) e o Distrito Fósforo-Uranífero de Itataia (U, P, ETR) no Ceará.

Bacias Sedimentares Paleomesozoicas

As grandes bacias sedimentares (sinéclises) brasileiras paleomesozoicas do Amazonas, Maranhão e Paraná, pouco contribuíram com bens minerais. Na Bacia do Amazonas, na Província Potássica do Médio Amazonas, ocorre o segundo maior depósito mundial de Potássio (FANTON, 2014), sais (Silvinita-KCl e Halita-NaCl) de

idade permiana em camadas profundas (650 a 1300 m), até o momento inexploradas. As reservas do centro da província (Fazendinha-PA e outras) pertencem, há mais de 50 anos, à Petrobrás, sem que tenham sido realizadas, até o momento, pesquisas no sentido de definir sua viabilidade de aproveitamento econômico.

Nos últimos anos, a empresa Potássio do Brasil (Grupo Falcon Metais), após intenso programa de exploração mineral, descobriu importantes depósitos do KCl na região de Autazes (AM). Segundo Fanton (2014), esses depósitos apresentam bons teores, ocorrem em menores profundidades (680-900 m) e situam-se em posição estratégica (próximos a porto fluvial, rodovia, rede elétrica e apenas a 100-150 Km de Manaus). A Potássio do Brasil planeja a abertura de poço (*shaft*) para acesso à camada de minério nos próximos anos. Esses depósitos constituem-se na melhor perspectiva de elevar significativamente a produção de KCl no Brasil, essencial para a agricultura moderna.

Na Bacia do Maranhão, a mais pobre das sinéclises em bens minerais, foram identificadas como de valor econômico apenas pequenas camadas de Gipsita na região sudoeste do Estado do Maranhão e na Chapada do Araripe, no Ceará, além de aquíferos em camadas de arenitos.

A Bacia do Paraná apresenta quatro bens de significativa importância econômica: carvão, pedras coradas, “xisto” betuminoso (folhelhos da Formação Irati) e água subterrânea. De menor significado são os depósitos de Urânio de Figueiras (PR) e de Diamante de Tibagi (PR). Os distritos mineiros de carvão mineral ocorrem no leste do Rio Grande do Sul, entre Porto Alegre e a fronteira com o Uruguai, e no sudeste de Santa Catarina (Criciúma). Embora as reservas em subsuperfície sejam significativas, trata-se essencialmente, de carvão energético. Apenas no Distrito Carbonífero de Criciúma é extraída, após complexo sistema de separação, pequena quantidade de carvão metalúrgico. O Carvão metalúrgico é o segundo bem mineral que mais pesa nas importações nacionais. Potássio e Carvão têm provocado conjuntamente forte impacto negativo anual na balança comercial do Brasil.

No nordeste do Rio Grande do Sul, na região de Ametista do Sul e Iraí (Alto Uruguai), nas camadas “basálticas” cretáceas da Formação Serra Geral, ocorre o maior distrito mineiro de Ametista conhecido no planeta.

Em toda a Bacia do Paraná, do Mato Grosso do Sul e Goiás ao Rio Grande do Sul, Paraguai e Argentina, os espessos arenitos porosos desérticos da Formação Botucatu hospedam enormes reservas de água no Aquífero Guarani, um dos maiores conhecido. Este aquífero ocorre desde a superfície, nas áreas de afloramentos da Formação Botucatu na borda leste da

bacia, até 1600 metros de profundidade no centro da bacia no Estado de São Paulo. Poços artesianos que extraem água do Aquífero Guarani abastecem importantes cidades e indústrias nos Estados de São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul.

Chaminés Alcalinas Carbonatíticas Cretácicas

O magmatismo alcalino cretácico, embora pontual (erupção central), ocorreu amplamente no território nacional, principalmente ao longo do Lineamento AZ 125° (SCHOBENHAUS et al., 1994; SILVA et al., 2014). As intrusões carbonatíticas geraram importantes depósitos minerais de P_2O_5 , Nb, U, Al, Fe, TR, Flogopita/Vermiculita, Barita, Bauxita e Fluorita, principalmente nos Estados de Minas Gerais (Tapira, Araxá, Patrocínio, Serra Verde, Salitre, Poços de Caldas), Goiás (Catalão I e II), São Paulo (Jacupiranga), Santa Catarina (Anitápolis/Lages), Paraná (Mato de Dentro), e no sul do Mato Grosso do Sul.

Os distritos mineiros associados às chaminés alcalinas, carbonatíticas ou não, são esparsos, circulares e pequenos. O maior deles, a Chaminé Alcalina de Poços de Caldas, na fronteira entre Minas Gerais e São Paulo, com 35 km de diâmetro, apresenta depósitos de Bauxita, Urânio (mina já exaurida) e Terras Raras. Em Araxá foram delimitados e possuem possibilidade de viabilização econômica depósitos de Terras Raras Leves, sendo que a CBMM está prestes a iniciar a produção.

Também vinculadas ao Lineamento AZ 125° ocorrem kimberlitos, com concentrações no Alto Parnaíba (MG) e em Juína (MT). Embora tenham sido identificados mais de 2000 mil kimberlitos no Brasil poucos revelaram-se portadores de Diamante e apenas um viabilizou a primeira mina brasileira de Diamante primário, o de Braúna, de idade mesoproterozoica, no nordeste do Estado da Bahia.

As seis chaminés alcalinas da Cabeça do Cachorro no noroeste do Amazonas têm alto potencial para P_2O_5 , Nb e TR. No entanto, por situarem-se em região extremamente remota não apresentam perspectiva de serem exploradas em tempo previsível.

De menor potencial mineral e do proterozoico médio são as províncias alcalinas do noroeste do Pará, do sudeste do Amazonas (Tapajós) e do extremo sul do Tocantins (Peixes); do proterozoico superior, aquela do sudeste da Bahia; de idade mesozoica as alcalinas de Rondônia na fronteira com o Mato Grosso, do sudoeste de Goiás e do nordeste do Paraná; bem como, de idade cenozoica, a província alcalina do norte do Ceará.

Nos últimos anos foram identificados e estão sendo pesquisados para P_2O_5 depósitos de fosfato metamorfizados e intensamente deformados, de idades

precambrianas ainda não definidas, no sul do Pará, no norte do Mato Grosso e no Rio Grande do Sul. Por estarem localizados próximos a região de agricultura mecanizada, os prospectos Três Estradas, Joca Tavares e Cerro Preto apresentam potencial de se tornarem viáveis economicamente. Segundo a Águia Resources (2012), o carbonatito Três Estradas é intrusivo no Complexo Granulítico Santa Maria Chico, de idade paleoproterozoica ou arqueana. Situa-se a 325 Km a oeste de Porto Alegre, na altura do paralelo 31° Sul. Apresenta forma elíptica alongada e teores e mineralogia similares aos da Mina Cajati, da Vale.

Mantos de Intemperismo e Aluviões Pós-Cretácicos

Fundamental para a gênese de importantes depósitos minerais no Brasil foi o clima tropical úmido que atuou e atua em todo o território situado a norte do Trópico de Capricórnio (Paralelo 22° Sul), região que esteve submetida, desde o Cretáceo Superior, a intenso processo de intemperismo químico. Esse, sob a ação da água e do oxigênio, destruiu os minerais originais das rochas silicáticas primárias, lixiviando alguns de seus elementos e concentrando *in loco* outros. Como consequência, formaram-se espessos mantos de intemperismo enriquecidos em Fe (lateríticos), em Al (bauxíticos) e em outros elementos presentes nas rochas originais, tais como Ni, Mn, Au, Nb, P e TR, que originaram os mais importantes depósitos minerais do país. Esses depósitos acham-se bem preservados nos platôs lateríticos de cimeira, onde a erosão física pós-cretácea, que modelou o relevo atual esculpido abaixo dos pediplanos cretácicos, não atuou, permitindo assim suas preservações. Costa (1997), Kotschoubey et al. (1997), Horbe (1991) e Marini et al. (2005) detalham as características e origens desses depósitos.

Rochas originais de idades desde arqueanas até cenozoicas condicionam os locais onde esses depósitos se formaram, porém, as concentrações em níveis econômicos formaram-se pelo processo de laterização pós-cretácea. É o caso dos depósitos das Províncias Ferríferas de Carajás (PA), de Vila Nova (AP), do Quadrilátero Ferrífero (MG), com formações ferríferas originais do arqueano e do paleoproterozoico, lateritizadas e enriquecidas em Fe (68%) no pós-Cretáceo. Da mesma origem são os inúmeros depósitos de Ni laterítico da Amazônia, Centro-Oeste e Sudeste brasileiro, associados a maciços básico-ultrabásicos arqueanos e proterozoicos. Nesses, o Ni contido originalmente em baixíssimos níveis em silicatos, concentrou-se no manto laterítico em teores econômicos da ordem de 2%. Similarmente, ocorreu a formação de outros importantes depósitos brasileiros dos elementos

supramencionados, como os distritos bauxíticos de Oriximiná/Porto Trombetas, Almeirim, Paragominas (todos no Pará), Poços de Caldas (MG), e Amargosa, no sul da Bahia. Também os depósitos de P_2O_5 , Nb e TR, associados a chaminés alcalinas devem suas altas concentrações nesses elementos ao enriquecimento laterítico, como é o caso dos distritos mineiros de Poços de Caldas (MG), Araxá (MG), Patrocínio (MG), Catalão (GO) e Seis Lagos (AM), entre outros.

Se, por um lado, o intemperismo químico resultante do clima vigente no país no pós-cretáceo, pelo processo de lateritização, concentrou alguns elementos *in situ*, por outro, reteve em seus solos ou concentrou pelo transporte físico da água nos vales e nos cordões litorâneos e aluviões, depósitos de minerais resistatos. Originaram-se assim importantes depósitos de Ouro (Au), Diamante, Cassiterita (Sn), Ilmenita (Ti), Zircão (Zr) e Monazita (U/Th). Exemplos notórios desse tipo de depósito mineral foram as já exauridas coluviões e aluviões da Província Aurífera de Ouro Preto (MG) e do Tapajós (PA), bem como as aluviões e coluviões das províncias diamantíferas de Diamantina (MG) e da Chapada Diamantina (BA). Ainda produtivas, ou a serem exploradas, cabem nessa classe, entre outras, as Províncias Estaníferas de Bom Futuro (RO), de Pitinga (AM), e de Surucucus (RR); assim como o Distrito Diamantífero do Rio Roosevelt (RO).

Dentre os distritos mineiros de minerais pesados são relevantes aqueles de Ilmenita (Ti) e Zircão (Zr) de São José do Norte, no cordão litorâneo do Rio Grande do Sul, e de Monazita (U/Th) do Espírito Santo.

Também a liberação do Al por intemperismo, a partir das rochas silicáticas primárias, seu transporte e sua deposição em planícies aluvionares, originou grandes depósitos de Caulim na Província Caulínica do Rio Capim (AM) e do Rio Jarí (PA).

Outros Ambientes Metalogenéticos e Distritos Mineiros Brasileiros de Menor Significado

Existe adicionalmente no Brasil um grande número de distritos mineiros menos importantes até o momento, sendo impossível apresentar todos nesta síntese. Pelas caracterizações e descobertas recentes cabem, porém, ser mencionados ainda: o Arco de Ilhas Neoproterozoico de Goiás, com seus depósitos de Cu e Au (Chapada-GO); a Bacia Cretácea do Araripe (CE), portadora de Gipsita; o Distrito Potássico de Sergipe (SE), portador de Silvinita/Carnalita (Taquari-Vassouras); o Distrito Diamantífero de Roosevelt (RO); o Distrito Polimetálico (Zn, Pb, Cu-Au) de Aripuanã (MT); o prospecto (Ni, Cu, EGP) de Limoeiro (PE); e o grande potencial nacional para Urânio.

Nas proximidades do Distrito Potássico de Sergipe, na plataforma marinha rasa a sul de Aracaju e a leste de Maceió, há possibilidade de serem delimitadas novas reservas de Silvinita/Carnalita. Ocorrências desses sais foram identificadas no pós-sal em alguns furos em água profunda da Petrobrás na Bacia de Campos.

O Distrito Diamantífero do Rio Roosevelt (RO), descoberto em área da reserva indígena dos Cinta Larga, vem sendo garimpado ilegalmente, já há duas décadas, em aluviões e coluviões. Trata-se de depósito de Diamante com grande potencial, seja pela alta qualidade das Gemas, seja pela possibilidade de serem encontrados Kimberlitos com teores elevados. No entanto, a exploração empresarial legal só será possível quando o Congresso Nacional regulamentar a mineração em área indígena, como prevista pela Constituição.

Embora o Brasil tenha sido o maior produtor mundial de Diamante de aluviões, e tenham sido identificados no país mais de dois mil kimberlitos cretácicos, ainda não foi descoberto nenhum distrito mineiro diamantífero primário produtivo associado ao lineamento AZ 125°, o que se constitui num paradoxo inexplicável da geologia brasileira.

No extremo noroeste do Estado do Mato Grosso, no contexto da Sequência Aripuanã/Granito Rio Branco, associado ao vulcano-plutonismo paleoproterozoico Uatumã foi descoberto, a partir de garimpo de Au, o depósito de sulfeto polimetálico (Zn, Pb, Ag, Cu-Au) da Serra do Santo Expedito-Aripuanã (RO) (LEITE et al., 2005), cuja mina entrou em produção em 2014. A identificação deste novo distrito, situado em região remota e de geologia regional ainda pouco conhecida, abre perspectivas para novas descobertas de sulfetos de metais base na porção sudoeste da área de ocorrência do vulcano-plutonismo Uatumã.

Em 2012, com base na interpretação de dados de levantamento aerogeofísico (Mag e Gama) realizado pelo Serviço Geológico do Brasil-CPRM, a Votorantim Metais identificou o depósito de sulfeto de Cu, Ni e EGP de Limoeiro, situado em terreno gnáissico à apenas 80 Km de Recife (PE) (JONES BELTHER, informação pessoal). O minério está hospedado em condutos sub-horizontais de rocha ultramáfica. Dezenas de pequenas áreas de afloramentos circulares desta rocha foram identificados na região, o que abre perspectivas para novas descobertas.

Os terrenos granito-gnáissicos da Borborema, como também outros do mesmo tipo em todo o Brasil, têm sido considerados como de baixo potencial para depósitos minerais de elementos metálicos. A descoberta do depósito de Limoeiro mostra ser necessária uma revisão deste conceito. Ressalta também ser a interpretação

criterosa de dados de levantamentos aerogeofísicos uma metodologia importante para prospecção mineral.

Por sua geologia favorável e pelas descobertas já efetivadas, o país possui elevado potencial para novos distritos mineiros de Urânio, além da mina de U exaurida de Poços de Caldas (MG), da mina de Caetité (BA) e da jazida de Urânio e Fosfato de Itataia (CE). Isto porque somente 25% do território nacional foi prospectado para o metal até o momento.

PERSPECTIVAS DA REALIZAÇÃO FUTURA DO POTENCIAL MINERAL BRASILEIRO

Por paradoxal que possa parecer, são os atrasos, as deficiências e demais dificuldades que vêm inibindo a exploração mineral e impedindo o pleno desenvolvimento da mineração no Brasil até o momento, que permitem também afirmar ser ainda elevado o potencial para descobertas de novos depósitos minerais no Brasil. Dentre esses pontos negativos destacam-se: baixo conhecimento geológico do território nacional e mesmo de nossas províncias minerais, pequenos investimentos realizados em pesquisa mineral no país, projetos de exploração mineral realizados apenas em superfície ou a pequena profundidade, carência de infraestrutura viária, legislação mineral pouco amigável e alto custo Brasil.

O conhecimento atual da geologia e da metalogenia das províncias e distritos minerais nacionais é ainda insuficiente para orientar devidamente a prospecção mineral. Enquanto em países como o Canadá, a Austrália e a África do Sul, as províncias minerais e os distritos mineiros possuem mapas geológicos nas escalas 1/20.000 ou 1/50.000, mesmo no leste do Brasil, raros são os distritos mineiros mapeados na escala 1/50.000 no Brasil. Na região amazônica os mapeamentos geológicos em execução são apenas de reconhecimento (1/250.000) e, muito localmente, de 1/100.000. As províncias e distritos mineiros brasileiros são ainda muito mal conhecidos, o mesmo sendo válido para os modelos e controles da maior parte dos depósitos minerais nelas existentes. O conhecimento sobre a metalogenia, tipologia, características e controles de muitos depósitos minerais do país, fundamentais para orientar corretamente os trabalhos de prospecção mineral, não obstante tenham sido motivo de um número crescente de teses e estudos por parte da comunidade acadêmica, é ainda muito incipiente.

Segundo Cox (2014), as descobertas de novos depósitos de metais base (Cu, Ni, Zn, Pb), Au e U em todo o planeta passaram a ocorrer nas últimas décadas cada

vez em maiores profundidades. No caso da Austrália, que até 1950 descobria depósitos na superfície ou até 50 metros de profundidade, nos últimos anos tem feito descobertas a mais de 300 metros, sendo muitas a 500 e até 1.000 metros de profundidade. As sondagens passaram a ser cada vez mais profundas, e os custos das descobertas cada vez maiores.

Não obstante os investimentos globais em exploração mineral tenham crescido de US\$ 8 bilhões em 2009 para US\$ 22 bilhões em 2012, as descobertas globais caíram de oito depósitos de classe internacional em 2009 para dois em 2012.

Cox (2014) observa ainda que os teores dos minérios dos depósitos descobertos têm caído constantemente; sendo que, em 1925, as minas de Cu operavam com minérios com teor de 7%; em 2005, com teores de 1% a 2%; e hoje operam com teores da ordem de 0,7%. O preço do Cu passou de US\$ 2.000,00 por tonelada, em 2001, para US\$ 8.000,00, em 2012. As minas de Au tinham em 1925, teores da ordem de 15g/t e, em 2005, 2 g/t. Atualmente, a Mina de Paracatu (MG) opera com teor de 0,4 g/t.

Por outro lado, a demanda por metais tem crescido continuamente. Segundo Heithersay (2014), para o Cu, a demanda global passou de menos de 1 Mt/ano em 1900, para 18 Mt/ano em 2012, sendo que a previsão é atingir 38 Mt/ano em 2038. Isto significa que nos próximos 24 anos necessitam ser minerados tanto quanto o total minerado desde 1900, isto é, 635 Mt de Cu metálico. No entanto, os investimentos globais no mundo ocidental em pesquisa de metais não ferrosos e fertilizantes, após crescerem de US\$ 6 bilhões em 2005 para US\$ 18,8 bilhões em 2012, caíram bruscamente para US\$ 12,3 bilhões em 2013. Não obstante, as descobertas significativas reportadas caíram de 60 minas para 10 por ano. O sucesso na viabilização de novas minas não acompanhou os investimentos três vezes maiores ocorridos entre 2005 e 2013.

Segundo Heithersay (2014) e Ferreira (2014), as descobertas globais de depósitos de metais preciosos realizados por garimpeiros decaíram de 60% entre 1900 e 1904, para 30% entre 1935 e 1939, para próximo a 0% em 2012. Por outro lado, as descobertas resultantes de prospecção por métodos geofísicos (magnetometria, gamaespectrometria, sísmica, gravimetria e eletromagnetometria) subiram de 0%, entre 1935 e 1939, para 45%, entre 2005 e 2009.

O DNPM estimou que, em 1994, existiam no Brasil cerca de 2.000 garimpos, onde atuavam cerca de 400.000 garimpeiros. Na atualidade, restam em atividade apenas algumas dezenas de garimpos e alguns milhares de garimpeiros.

A prospecção mineral no Brasil, para revelar todo o potencial mineral do país, necessita passar para uma fase de mapeamentos geológicos e geofísicos mais detalhados, modelos exploratórios mais elaborados, estudos técnico-científicos, sondagens mais profundas, emprego de métodos geofísicos avançados e de profissionais especializados. Nesse contexto cabe um papel especial à academia, não só na formação de pessoal especializado, mas também na definição das assinaturas, características e controles dos depósitos minerais.

No contexto internacional de raras descobertas, baixos teores dos minérios, grande profundidade das descobertas, o Brasil destoa em grande parte do quadro global, visto que nele as descobertas de depósitos minerais ocorreram ainda hoje em superfície ou em pequena profundidade.

Uma comparação com a Austrália e o Canadá (Figura 2) mostra que o Brasil tem área territorial e características geológicas similares aos dois gigantes mundiais da exploração mineral. No entanto, segundo o boletim anual do SNL/*Metal Economic Group* (2013), os investimentos globais em exploração mineral de metais preciosos, metais base e Diamante (o SNL/MEG não inclui metais ferrosos) foram, em 2012, de US\$ 21,5 bilhões. Destes, foram investidos no Brasil apenas 3% (US\$ 645 milhões), enquanto na Austrália 14% (US\$ 2.589 milhões) e no Canadá de 17% (US\$ 3.440 milhões). Considerando as respectivas áreas territoriais, os investimentos por km² foram de: US\$ 76 no Brasil, US\$ 226 na Austrália e US\$ 287 no Canadá. No mesmo ano foram investidos em exploração mineral, tanto no Chile como no Peru 5% dos investimentos globais, ou seja, da ordem de US\$ 1.000 milhões em cada um deles. Daí ser permitido concluir-se que, em termos de prospecção mineral, o Brasil é ainda um gigante adormecido. Como consequência, possui ainda elevado potencial mineral a ser revelado.



	Brasil	Canadá	Austrália
Área Continental (106 km ²)	8,5	9,9	7,7
Produção Au/Km ² (1969-1990) t	0,9	3,4	5,7
Investimentos em Prospecção, 2013 (106 US\$)	645	3.440	2.580
Investimentos por Km ² , 2013 (US\$)	76	287	226

Figura 2 Comparação da de Au (1969-1990) e de investimentos em prospecção mineral em 2013 entre Brasil, Canadá e Austrália (Fonte: ARANTES; MACKENZIE, 1995; SNL/MEG, 2013, modificado).

É necessário que se considere, também, algumas características intrínsecas do setor de pesquisa mineral/mineração que influenciam na realização do potencial mineral no país: 1) a rigidez locacional, visto que os depósitos minerais ocorrem onde a natureza os originou, em geral em áreas remotas; 2) o alto custo e o longo tempo de prospecção e da implantação de uma mina; 3) a existência de infraestruturas energética e de transporte adequadas; 4) o alto risco dos empreendimentos; 5) a exigência de recursos financeiros substanciais; 6) a estabilidade jurídica do setor e confiança no governo; 7) o alto custo país.

Estima-se que de cada 1.000 alvos preliminares (ocorrências minerais), apenas 100, após as fases exploratórias de prospecção geológica terrestre, geoquímica e geofísica (com duração entre 2 e 4 anos), passam para a fase de sondagem exploratória. Nesta fase, com 1 a 3 anos de duração, dos 100 alvos sondados, cerca de 15 são selecionados como potenciais. Na fase seguinte, com duração de cerca de 3 anos, faz-se a definição dos recursos (cubagem), seguido de estudo de viabilidade econômica, após o qual restam como potenciais 3 a 4 jazidas dentre os 15 depósitos selecionados. Apenas uma destas jazidas, após 2 anos das fases de definição de reservas e de implantação da mina, entra em operação.

Devido ao fato de que, em média, de cada 1.000 alvos preliminares visitados somente um se transforma efetivamente em mina, isto num período de 10 anos de estudos, há a tradição de desejar-se sorte ao investidor em exploração mineral. Pela mesma razão, as bolsas de valores classificam de *venture capital* os recursos

destinados à exploração mineral, pois os investimentos para viabilizar uma mina são muito elevados, de longo prazo e de alto risco.

Devido à pequena atratividade comparativa do Brasil para investimentos em exploração mineral no momento, mesmo as mais tradicionais empresas de mineração brasileiras estão migrando para fazer prospecção e mineração no Chile, Peru, Colômbia, México, USA, Canadá, Moçambique e países da Ásia e Indonésia.

Potencial mineral o Brasil possui, e grande. No entanto, o conhecimento geológico-metalogenético de seus distritos mineiros e depósitos minerais, a política mineral vigente, a confiança jurídica e a atratividade para investimentos em exploração mineral no país deixam muito a desejar.

REFERÊNCIAS

- ÁGUA RESOURCES. Estudos preliminares geotécnicos, de recursos hídricos e ambientais para o projeto Fosfato Três Estradas. *Estudos Geotécnicos e Hidrogeológicos*, v. 2, 26 p. 2012.
- ARANTES, D.; MACKENZIE, B. A Posição Competitiva do Brasil na Produção Mineral de Ouro. Brasília: DNPM. *Série Estudos de Política Mineral*, v. 7, 102 p. 1995.
- BETTENCOURT, J.S.; MONTEIRO, L.V.S.; BELLO, R.M.S.; OLIVEIRA, T.F.; JULIANI, C. Metalogênese do zinco e chumbo na região de Vazante, Paracatu, Minas Gerais. In: MARTINS NETO, M.; PINTO, C.P. (Orgs.). *Bacia do São Francisco. Geologias e Recursos Minerais*, 1ª Ed; Belo Horizonte: SBG-MG/CPRM, Publicação Especial, v. 1, p. 161-198. 2001.
- BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. (Coords.). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Texto, Mapas & SIG. Brasília: CPRM - Serviço Geológico do Brasil; 692 p. 2003.
- COSTA, M.L. Laterization as a Major Process of Ore Formation in the Amazon Region. *Exploration and Mining*, London, v. 6, n 1, p. 27-104. 1997.
- COUTINHO, M.G.N. *Provincia Mineral do Tapajós: Geologia, Metalogenia, e Mapa Previsional para Ouro em SIG*. Brasília: CPRM, 375 p. 2008.
- COX, D. World and Brazilian Exploration Trends. In: *Trends in Exploration Spending and Brazil's Competitive Position*. Ouro Preto. Brazil. 2014. Disponível em: <www.adimb.com.br/simexmin2014>. Acesso em 10 de janeiro de 2015.
- DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C. *Metalogênese do Brasil*; Brasília: CPRM/UnB, 392 p. 2001.
- FANTON, J. Novas Descobertas de Potássio na Bacia do Amazonas. In: *Potencial e Projetos de Minerais Estratégicos e Críticos*. Ouro Preto, Brasil. 2014. Disponível em: <www.adimb.com.br/simexmin2014>. Acesso em 10 de janeiro de 2015.
- FERREIRA, M. Tendências da Exploração Mineral. In: *Novas Fronteiras e Tendências em Exploração Mineral*. Ouro Preto, Brasil. 2014. Disponível em: <www.adimb.com.br/simexmin2014>. Acesso em 10 de janeiro de 2015.
- JOST, H.; BROD, J.A.; QUEIRÓZ, E.T. (Coords.). *Caracterização de Depósitos Auríferos em Distritos Mineiros Brasileiros*. Brasília: DNPM/ADIMB, 300 p. 2001.
- HEITHERSAY, P. Mineral Resources for Future Generations. In: *New Frontiers and Tendencies in Mineral Exploration*. Ouro Preto, Brasil. 2014. Disponível em: <www.adimb.com.br/simexmin2014>. Acesso em 10 de janeiro de 2015.
- HORBE, A.M.C. *Evolução mineralógica dos lateritos a Sn, Zr, Nb e Y da Serra da Madeira, Pitinga – AM*. Dissertação de Mestrado. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 245 p. 1991.
- IBRAM. *Informações e Análise da Economia Mineral Brasileira*. Brasília, 7ª Ed., 68 p. 2012.
- JULIANI, C.; RYE, R.O.; NUNES, C.M.D.; SILVA, R.M.C.; MONTEIRO, L.V.S.; NEUMANN, R.; ALCOVER NETO, A.; BETTENCOURT, J.S.; SNEE, L.W. Paleoproterozoic high-sulphidation mineralization in Tapajós Gold Province, Amazon Craton, Brazil: Geology, mineralogy, alunite argon age and stable isotopes constraints. *Chemical Geology*, v. 215, p. 95-125. 2005.
- KOTSCHOUBEY, B.; TRUCKENBRODT, W.; HIERONYMUS, B. Bauxite deposits of Paragominas. In: CARVALHO, A.; BOULANGÉ, B.; MELFI, A.F.; LUCAS, Y. (Eds.). *Brazilian Bauxites*. USP, FADESP, ORSTOM, p. 75-106. 1997.
- LEITE et al. Caracterização do Depósito Polimetálico (Zn, PB, Ag, Cu-Au) de Aripuanã, Mato Grosso. In: MARINI, O.J.; QUEIRÓZ, E.T.; RAMOS, W.B. (Eds.). *O Projeto Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia*. Brasília: DNPM/CT-MINERAL/ADIMB. p. 597-686. 2005.
- LEITE, J.A.D.; SAES, G.S. Geology of Southern Amazon Craton, in Southwestern Mato Grosso, Brazil: a review. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 1, p. 91-94. 2000.
- LIMA, T.M.; NEVES, C.A. (Coords.). *Sumário Mineral Brasileiro*, Brasília: DNPM/MME, v. 33, 137 p. 2013.
- LOBATO, L.M.; RODRIGUES, L.C.R.; VIEIRA, F.W.V. Brazil's premier gold province. Part II: Geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt. *Quadrilátero Ferrífero. Milenium Deposita*, Alemanha, v. 36, n. 3/4, p. 249-277. 2001.
- MARINI, O.J.; QUEIRÓZ, E.T. Main Geologic-Metallogenetic Environments and Mineral Exploration in Brazil: *Ciência e Cultura*, Brasil, v. 43, n. 2, p. 154-161. 1991.
- MARINI, O.J.; QUEIRÓZ, E.T.; RAMOS, W.B. (Eds.). *O Projeto Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia*. Brasília: DNPM/CT-MINERAL/ADIMB. 782 p. 2005.
- MISI, A.; TEIXEIRA, J. B.; SÁ, J. H. (Orgs.). *Mapa Metalogênico Digital do Estado da Bahia e Principais Províncias Minerais*. 1ª Ed. Salvador: CBMM/Série Publicações. 2012.
- MISI, A.; IYER, S.; COELHO, C.; TASSINARI, C.; FRANCAROCHA, W.; CUNHA, I.; GOMES, A.; DE OLIVEIRA, T.; TEIXEIRA, J.; FILHO, V. Sediment Hosted Lead Zinc Deposits of the Neoproterozoic Bambuí Group and Correlative Sequences, São Francisco Craton, Brazil: A review and a possible metallogenetic evolution model. *Ore Geology Reviews*, Amsterdam, v. 35, p. 35-46. 2005.
- MELLO, G. A. Panorama da Exploração Mineral no Brasil: Quem, Onde, O que. In: *Panorama da Exploração Mineral no Brasil*. Ouro Preto, Brasil. 2014. Disponível em: <www.adimb.com.br/simexmin2014>. Acesso em 10 de janeiro de 2015.
- ROSIÈRE, C.A.; SPIER, C.A.; RIOS, E.J.; SUKAN, V.E. The Itabirite from the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade ores: a review. *Reviews in Economic Geology*, v. 15, p. 223-243. 2008.
- SCHOBENHAUS, C.; COELHO, C.E.S. (Coords.). *Principais Depósitos Minerais do Brasil*; Vol. III – Metais Básicos Não Ferrosos, Ouro e Alumínio. Brasília: DNPM-CVRD. 670 p. 1988.
- SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R.; ASMUS, H.E. (Coords.). *Geologia do Brasil*: Texto Explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da Área Adjacente Incluindo Depósitos Minerais – Escala 1:2 500 000. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral- DNPM. 501 p. 1994.
- SILVA, M.G.; MISI, A. (Orgs.). *Base Metal Deposits of Brasil*. 1ª Ed. Belo Horizonte: MME/CPRM/DNPM, v. 1, 109 p. 1999.
- SILVA, M.G.; ROCHA NETO, M.T.; JOST, H.; KUYUNJIAN, R.M. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tetônicas Brasileiras*-Programa Geologia do Brasil/Recursos Minerais/Série Metalogenia. Belo Horizonte: CPRM. 589 p. 2014.
- SNL/Metal Economic Group. *Worldwide Exploration Trends*. SNL/Metals Economic Group. Toronto/Canadá: PDAC 2014. 6 p. 2013.
- TEIXEIRA, N. et al. Geotectônica e Metalogenia do Brasil. In: *Panorama da Exploração Mineral no Brasil: Novas Perspectivas*. Ouro Preto, Brasil. 2014. Disponível em: <www.adimb.com.br/simexmin2014>. Acesso em 10 de janeiro de 2015.

Formações ferríferas e minério de alto teor associado

O minério de ferro no Brasil – geologia, metalogênese e economia

Carlos Alberto Rosière

Professor Titular do Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.

Vassily Khoury Rolim

Doutorando do Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais
e diretor da PRCZ Consultores Associados.

RESUMO

Formações ferríferas são rochas químicas, geralmente bandadas, com teor em ferro (Fe) variável entre ca. 20 e 40%, constituídas predominantemente por chert e minerais de ferro, e que ocorrem em sucessões marinhas Pré-Cambrianas associadas a rochas pelíticas e carbonáticas, ou a sequências vulcano-sedimentares. Sua presença está ligada à oxigenação da atmosfera, sendo contínua no registro geológico entre o arqueano e o mesoproterozoico, e reaparecendo somente por um curto tempo no neoproterozoico. Processos mineralizadores hipogênicos e supergênicos provocaram seu enriquecimento a teores entre 60 e 68% em Fe, constituindo um minério de elevado valor econômico e estratégico para a economia do Brasil devido ao grande número de depósitos em suas extensas áreas cratônicas. Entretanto, os volumes muito altos de produção envolvidos e o baixo valor agregado por tonelada exigem que os depósitos, além de conter grandes quantidades de minério, tenham disponibilidade de uma logística de transporte estruturada demandando altos investimentos em ferrovias e portos.

Palavras-chave Formações ferríferas bandadas. Metalogênese do ferro. Distritos mineradores. Estratégia econômica.

FORMAÇÕES FERRÍFERAS BANDADAS: O SIGNIFICADO DESSAS ROCHAS NA HISTÓRIA DA TERRA

Formações Ferríferas Bandadas (Figura 1) são rochas sedimentares químicas, precipitadas sob condições oxidantes ou sub-oxidantes associadas à atividade microbiana (KONHAUSER et al., 2002), diretamente da água do mar fertilizada por emanções vulcânicas submarinas ricas em Ferro (Fe). O teor em Fe varia entre ca. 20 e 40%, em SiO_2 entre 40 e 60%, em CaO e MgO <10%. A mineralogia de Fe compreende óxidos (hematita/ Fe_2O_3 , magnetita/ Fe_3O_4), carbonatos (siderita/ FeCO_3 e ankerita/ $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{CO}_3)_2$), silicatos (greenalita/ $(\text{Fe}^{+2}, \text{Fe}^{+3})_2\text{-}3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e, localmente, pirita (Fe_2S). Sílica (SiO_2) ocorre na forma microcristalina (chert ou jaspe) ou cristalina (quartzo). A rara presença de álcalis em formações ferríferas é devida à contaminação ocasional por material de origem vulcânica (cinzas), e sua ocorrência é indicada pelos silicatos riebeckita ($\text{Na}_2(\text{Fe}, \text{Mg})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$) e stilpnomelana $\text{K}_{0,6}(\text{Fe}, \text{Mg})_6(\text{Si}_8\text{Al})(\text{O}, \text{OH})_{27,2}\text{-}4\text{H}_2\text{O}$.

Formações ferríferas ocorrem em sucessões marinhas (SIMONSON, 1985; BEUKES, 1983; KLEIN; BEUKES, 1989), associadas frequentemente a rochas pelíticas e carbonáticas, localmente com rochas vulcânicas e invariavelmente com folhelhos negros que registram a presença de matéria orgânica (atividade microbiana) e o ambiente redutor em que o Fe se encontrava solubilizado na forma do cátion Fe^{2+} . A característica primária mais proeminente das formações ferríferas é a alternância de finas camadas de minerais de ferro e chert ou quartzo desenvolvida em diferentes escalas denominadas de macro- meso- e microbandas, em função de sua espessura, que podem variar de decimétrica a sub-milimétrica quando são denominadas de

Formações Ferríferas Bandadas. Algumas formações ferríferas apresentam texturas que indicam erosão e deposição de lamas químicas ricas em ferro, tais como a presença de grânulos, associadas a um ambiente raso, recebendo, então, a denominação de Formação Ferrífera Granular. Rosière et al. (2008) sugerem a utilização do termo “itabirito” (ESCHWEGE, 1833) para as variedades metamórficas como aplicado por Dorr (1969) no Quadrilátero Ferrífero, acompanhado da mineralogia varietal (anfibólio, clorita, carbonato etc) (Figura 1).

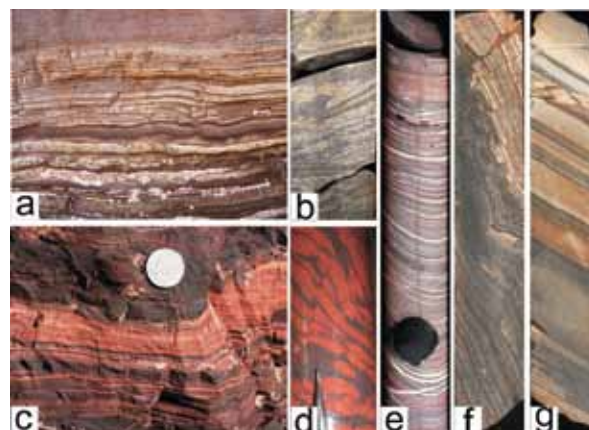


Figura 1 Variedades de formações ferríferas bandadas: (a) Formação ferrífera de ambiente plataformar (tipo Lago Superior) da Formação Brockman, membro Dales Gorge do Supergrupo Mt. Bruce, Bacia de Hamersley, Parque Nacional do Karinijini, Austrália Ocidental, (b) Anfibólio itabirito dobrado da Formação Cauê, Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero, (c) Formação ferrífera jaspilítica de sequência do tipo greenstone belt (tipo Algoma) do Iron Ore Group, Craton de Singhbhum, Índia (d) Jaspilito da Formação Carajás, Supergrupo Rio Itacaiúnas, Província Mineral de Carajás, (e) Itabirito dolomítico da Formação Cauê, Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero; (f e g) Formação ferrífera (itabirito) da Formação Cauê, Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero (Fonte: Carlos Alberto Rosière).

Como sedimentos químicos, formações ferríferas registram as transformações ambientais e a evolução da Terra por um longo período, desde o seu aparecimento, no início do arqueano (ca. 3.800 Ma – Isua na Groenlândia), até o proterozoico médio (1.800 Ma – Grupo Itapanhoacanga na Borda Leste da Serra do Espinhaço) (ROLIM; ROSIÈRE, 2011). Formações ferríferas reaparecem na coluna geológica entre 800 e 500 Ma (e.g. a Formação Rapitan, no Canadá, e a Formação Santa Cruz, no Distrito Mineral de Urucum, no Mato Grosso do Sul) (TRENDALL, 2002; CLOUT; SIMONSON, 2005; KLEIN, 2005). A abundância relativa de formações ferríferas na coluna geológica corresponde a um longo período de introdução nos oceanos de grande volume de Fe proveniente do manto através de condutos vulcânicos submarinos. O máximo de sedimentação foi atingida na idade de 2,5 bilhões de anos, mas desapareceu do registro geológico quase inteiramente há 1,7 bilhões de anos, possivelmente após total consumo do Fe disponível em excesso e acumulado desde o final do arqueano.

A descontinuidade da presença de formações ferríferas na coluna geológica auxilia no entendimento de mudanças no regime tectônico da Terra com geração de crosta continental e alterações na biosfera que levaram a um considerável aumento na concentração de oxigênio livre na atmosfera e nos oceanos. Essas mudanças radicais no planeta têm idade estimada em 2,3 bilhões de anos, que produziram rápido aumento de O₂ livre na atmosfera e nos oceanos, resultando em um rápido aumento na precipitação de Fe na água do mar e são denominadas, de forma genérica, como *The Great Oxidation Event* (GOE – O Grande Evento de Oxigenação). Devido à escassez de oxigênio na atmosfera antes do GOE, interpreta-se que a precipitação do Fe tenha sido controlada pela existência de um quimioclínio ou redoxclínio que divide a coluna de água dos oceanos em níveis de diferente potencial de oxirredução, causado pela presença de colônias de micro-organismos. O reaparecimento das formações ferríferas no neoproterozoico, entre 800 e 500 Ma está associado à estagnação da água do mar e à criação de zonas anóxicas em bacias abertas na crosta continental, que resultaram em novo acúmulo de Fe provocado pela formação de extensas e espessas coberturas de gelo durante períodos glaciais globais denominados *Snowball Earth*. Acredita-se que nesse período, toda (ou quase toda) a superfície do planeta estava coberta por geleiras e, após seu derretimento, o contato da água do mar com a atmosfera e o aumento do grau de oxidação das águas teriam provocado nova precipitação e acúmulo de óxido de ferro nas bacias, constituindo camadas de formação ferrífera.

Formações ferríferas ocorrem em três tipos de bacias em ambientes geotectônicos distintos (GROSS, 1983):

- Sequências do **tipo Algoma**, de menor extensão e espessura, associadas a sequências vulcano-sedimentares, proximal às fontes hidrotermais submarinas de ferro. Estas sequências ocorrem com maior frequência na era arqueana.
- Sequência do **tipo Lago Superior**, depositadas em grandes extensões em bacias de margem passiva, ocorrendo com maior frequência na era proterozoico. Nessas sequências estão hospedados os maiores depósitos de minério de ferro de alto teor, tais como na região do Lago Superior (Estados Unidos/Canadá), no distrito do Quadrilátero Ferrífero (Supergrupo Minas) no Brasil e nas bacias de Hamersley, na Austrália e Transvaal, na África do Sul.
- Sequências do **tipo Rapitan**, depositadas em fossas continentais, comumente associadas aos diversos ciclos de deposição de sedimentos de origem glacial no neoproterozoico, como a Formação Rapitan no Canadá e nos distritos mineradores de Urucum (Mato Grosso do Sul) e Mutum (Bolívia).

Minérios de Ferro de Alto Teor

Processos mineralizadores que envolvem a remoção, lixiviação dos minerais de ganga e oxidação de minerais ferrosos podem provocar grande enriquecimento nas formações ferríferas de modo a atingir teores entre 60 e 68% em Fe (Figura 2). Os processos envolvidos podem ser:

- Hipogênicos ou hidrotermais, quando a remoção se desenvolve em temperatura elevada pela ação de grande volume de fluídos metamórficos, baciais, magmáticos ou de origem meteórica infiltrados durante eventos tectônicos (e.g. BARLEY et al., 1999; HAGEMANN et al., 1999; TAYLOR et al., 2001; ROSIÈRE; RIOS, 2004).
- Supergênicos, que se desenvolvem pela ação do intemperismo.

Os maiores e mais ricos corpos de minério de ferro foram sujeitos a ambos processos de forma recorrente. Em uma primeira fase de enriquecimento, as formações ferríferas têm sua composição original modificada sob a ação de fluídos a temperaturas e profundidades relativamente elevadas, gerando corpos controlados por estruturas tectônicas. Quartzo, carbonato e outros minerais de ganga são lixiviados gerando corpos porosos e substituídos por carbonatos de Ca-Fe-Mg e óxidos de ferro. De forma associada, mas subordinada, ocorre remobilização do Fe constituindo veios e cor-

pos maciços de hematita e magnetita. Corpos assim enriquecidos, quando levados à superfície, sofrem a ação de águas meteóricas que lixiviam os componentes solúveis restantes, deixando um resíduo rico em Fe na forma de óxidos e hidróxidos (hematita/martita e goethita) e eventualmente contaminado por minerais secundários como oxi-hidróxidos de Mn e Al (pirolusita, psilomelana e gibbsita) e fosfatos de Fe (wavellita) formando-se em superfície uma crosta denominada **canga**.

O principal agente do enriquecimento supergênico nos grandes depósitos é o intemperismo tropical atuante durante a era cenozoica, embora paleosuperfícies de laterização tenham sido reconhecidas desde o paleoproterozoico (2,2 Ga) associadas à formação de depósitos importantes como Sishen na África do Sul. A espessura da zona de alteração supergênica é, em geral, inferior a 200m mas pode chegar a 400 m, (DORR, 1964; SPIER et al., 2003), como consequência da estrutura e da composição carbonática da rocha, que favorecem a infiltração da água meteórica a grandes profundidades. Esses fatores são particularmente favoráveis em zonas de mineralização hidrotermal onde a estruturação associada à alteração das rochas parcialmente mineralizadas permitem maior efici-

ência dos processos supergênicos. Os óxidos de Fe, particularmente magnetita, e carbonatos são alterados em oxihidróxidos e silicatos podem ser alterados em argilo-minerais ou sofrer substituição por oxihidróxidos de ferro.

Características do minério e seus produtos

A caracterização do minério de ferro *in situ* pode ser feita com base em seu teor, mineralogia, características físicas, estruturais, texturais e origem, e varia de acordo com o país e a finalidade da classificação. Na mineração procura-se dar ênfase nas características estruturais (maciça, bandada, laminada, foliada ou xistosa, conglomerática/brechada/detrítica), mineraloquímicas (magnetítica, hematítica, goethítica, com alto fósforo, com alto álcalis, quartzoso) e na resistência física (dura, friável, pulverulenta, “argilosa”) como critérios de identificação de campo e associação ao seu comportamento durante o tratamento mecânico e eventual concentração para obtenção dos produtos comercializados. Os produtos da mineração, por sua vez, são classificados em *lump ore* constituído de fragmentos de 31,5 a 6,3 mm, *sinter feed* (entre 6,3 e 0,15mm) e *pellet feed fines* (PFF<0,15mm), estes últimos utilizados para produzir aglomerados a quente (*sinter* e *pellet*). A faixa granulométrica do *lump ore*, na realidade, varia de acordo com a necessidade dos clientes, sendo que algumas adotam também a faixa entre 50 e 12,5 mm. No mercado brasileiro comercializa-se ainda a chamada hematitinha, que é minério granulado entre 12,5 e 6,3 mm com baixo teor de finos (<5% abaixo de 6,3 mm) consumido pelos pequenos produtores de ferro gusa da região metropolitana de Belo Horizonte que trabalham com fornos a carvão vegetal. A hematitinha deve ter característica química semelhante ao *lump* com baixo teor em SiO₂. Outro produto é o chamado *natural pellet ore*, denominação dada a granulados de diversas faixas de tamanho e alta pureza.

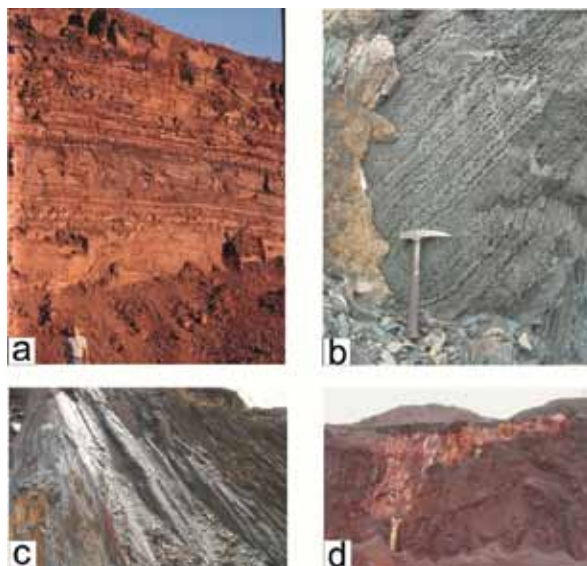


Figura 2 Tipos de minério de alto teor: (a) Minério de ferro hematítico goethítico “marrom” por enriquecimento supergênico de jaspilito de Urucum, Corumbá, Mato Grosso do Sul; (b) Minério hematítico-martítico “azul”, semi-friável, de origem hipogênica, de itabirito da Formação Cauê. A estruturação bandada da formação ferrífera permanece preservada no minério. (c) Minério duro xistoso, especularítico (d) Veio de minério maciço de composição martítica-hematítica, envolvido por minério friável (Fonte: Carlos Alberto Rosière).



Figura 3 Mina de ferro a céu aberto de Pau Branco da Vallourec Mineração, Quadrilátero Ferrífero. O corpo de minério encontra-se em uma faixa na zona de contato da Formação Cauê com filito da Formação Batatal subjacente que, por sua vez, encontra-se parcialmente mineralizado em ferro (Fonte: Carlos Alberto Rosière).



Figura 4 Mapa do Brasil com localização dos principais distritos ferríferos (Fonte: Compilada por Vassily Khoury Rolim, autor).

PRINCIPAIS PROVÍNCIAS FERRÍFERAS DO BRASIL: DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS DEPÓSITOS, PRODUÇÃO E RESERVAS CONHECIDAS

O Quadrilátero Ferrífero

O termo Quadrilátero Ferrífero (QF) (Figuras 4 e 5) cunhou a principal província mineral ferrífera do Brasil e nomeia a quadrícula ao sul da cidade de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais, mapeada de 1952 a 1969 pelo USGS (United States Geological Survey) dentro de um programa de cooperação com o DNPM (Departamento Nacional da Produção Mineral), compreendendo uma área de cerca de 15,000 km² entre as coordenadas 19°-20°S de latitude e 43°-44°W longitude. As formações ferríferas ali aflorantes são denominadas de itabirito, a partir de termo indígena introduzido no vocabulário geocientífico por W. L. von Eschwege, no início do século XIX, e pertencem à sequência plataformal do Superggrupo Minas de idade paleoproterozoica (ca. 2,4 bilhões de anos), que compreende rochas pelíticas, arenosas e carbonáticas. Itabiritos hospedam um grande número de depósitos de minério de alto teor de importância econômica cuja ocorrência é controlada por estruturas tectônicas. Corpos maciços e friáveis de minério se formam pela recorrência de processos supergênicos durante o período Neogeno, sobre minérios formados por enriquecimento hidrotermal (GUILD, 1957; DORR, 1964, 1965; ROSIÈRE et al., 2008) durante o período Riacciano (ROSIÈRE et al., 2013; SANGULARD et al., 2014).

Rosière et al. (2001) dividem o Quadrilátero Ferrífero em dois domínios estruturais (Figura 5). O ocidental, onde predominam estruturas associadas à orogênese riacciana/paleoproterozoica (aprox. 2,1-2,0 Ga), e o oriental, onde observa-se imbricamento de rochas de diferentes unidades e graus metamórficos pela superposição de estruturas tectônicas formadas durante a orogênese Brasileira ao final do neoproterozoico.

Nos depósitos do domínio ocidental (Feijão, Janagada, Tamanduá, Pico, Vargem do Lopes, Capitão do Mato) (Figura 5), o minério é geralmente maciço a bandado, com corpos tabulares ou aproximadamente colunares. Magnetita está quase sempre presente em corpos de minério no domínio ocidental do Quadrilátero Ferrífero oxidada em maghemita /kenomagnetita, na forma de relictos inclusos em agregados de grãos anédricos a subédricos de martita e hematita constituindo uma trama granoblástica. Em zonas de cisalhamento, a deformação produz uma trama orientada de cristais alongados de hematita (especularita). No domínio oriental, onde a deformação atuou de forma mais pervasiva, os corpos de alto teor (Fazendão, Timbopeba, Alegria, Brucutu, Cauê, Conceição) (Figura 5) são em grande parte xistosos com aumento da proporção de specularita.

Estudos geocronológicos em monazita de veios hidrotermais à hematita-martita, a oeste da Serra do Curral, indicam idade U-Pb SHRIMP de 2034 ± 11 Ma para a mineralização de ferro (ROSIÈRE et al., 2013). Os veios resultam da mobilização de Fe em fraturas, comumente em frentes de falha nos níveis superiores de alguns depósitos, como Bocaina e Esperança, no ramo oeste da Serra do Curral (Figura 5).

No QF são lavrados corpos de minério de ferro de alto teor, compacto a semi-friável e friável, com teores históricos $\geq 64\%$ Fe, além de itabirito enriquecido com teores entre 30 e 60% Fe. Os principais depósitos em produção compreendem o chamado Complexo Itabira (Cauê, Conceição, Dois Córregos, Onça, Esmeril, Chacrinha e Periquito), Minas Centrais (Água Limpa, Brucutu, Córrego do Meio e Gongo Soco), Complexo Mariana (Alegria, Timbopeba, Fábrica Nova, Fazendão e Morro da Mina) e Minas do Oeste (Córrego do Feijão e Fábrica) (Figura 5) minerados pela VALE. O Complexo de Alegria é explorado pela sociedade BHP Billiton/VALE e o depósito de Casa de Pedra, que contém o

maior corpo de alto teor do Quadrilátero Ferrífero, pela Companhia Siderúrgica Nacional. Todos esses corpos foram intensivamente minerados nos últimos 30 anos, tendo a VALE atingido, em 2013, a produção total de 190 milhões de toneladas (Mt). Estima-se, para a VALE, uma reserva restante da ordem de 600 Mt para minérios de alto teor ($>62\%$), além de 2.100 Mt fora das áreas atuais de lavra. As reservas de minério de baixo teor (itabirito friável e semi-friável - 30 a 60% Fe) estão entre 6.000 e 8.000 Mt sendo 4.000 Mt. minério com teor em Fe $>52\%$, e os recursos inferidos chegam a aprox. 25.000 Mt (VALE, 2013).

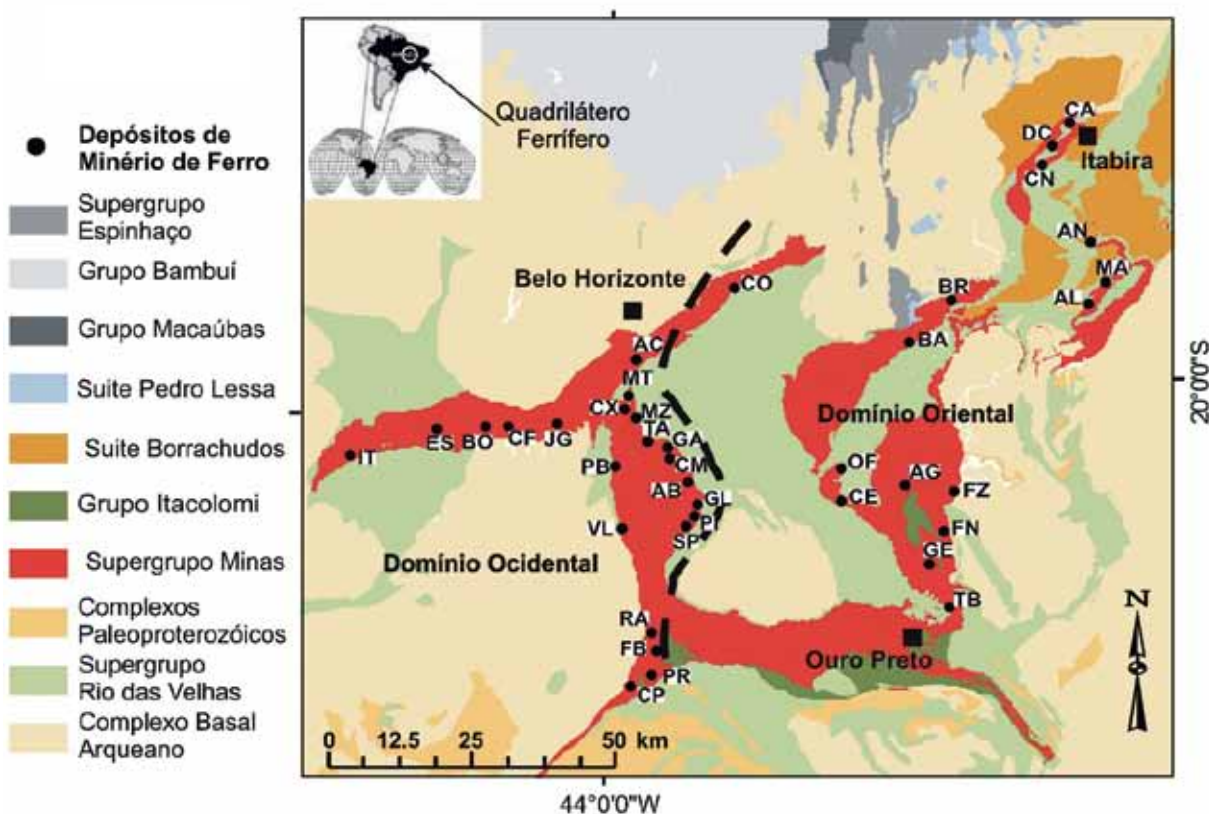


Figura 5 Mapa Geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero com localização dos domínios estruturais (Fonte: DORR, 1969, modificado). Principais depósitos: AB - Abóboras, AC - Aguas Claras, AG - Alegria, AL - Agua Limpa, AN - Andrade, BA - Bau, BO - Bocaina, CA - Cauê, CF - Córrego do Feijão, BR - Brucutu, CM - Capitão do Mato, CE - Capanema, CN = Conceição, CO - Córrego do Meio, CP - Casa de Pedra, CX - Capão Xavier, DC - Dois Córregos, ES - Esperança, FB - Fábrica, GL - Galinheiro, FN - Fábrica Nova, FZ - Fazendão, GE - Germano, IT - Itatiaiuçu, JG - Jangada, MA = Morro Agudo, MT - Mutuca, MZ - Mar Azul, OF - Ouro Fino, PI - Pico, PB - Pau Branco, VL - Vargem do Lopes, PR - Pires, RA - Retiro das Almas, SP - Sapecado, TA - Tamanduá, TB - Timbopeba.

Borda Leste da Serra do Espinhaço

A Borda Leste da Serra do Espinhaço Meridional corresponde a uma faixa geográfica de orientação geral norte-sul, com cerca de 30 km de largura e 150 km de comprimento, balizada a norte pela cidade de Serra Azul de Minas a sul por Santa Maria do Itabira, no centro-leste do Estado de Minas Gerais (Figuras 4 e 6). Nessa região, afloram sequências metassedimentares subjacentes às unidades do Supergrupo Espinhaço, entre as quais o Grupo Serra da Serpentina (ROLIM; ROSIÈRE, 2011) que contém espessas camadas de formações ferríferas bandadas constituídas predominantemente de óxido de ferro e quartzo, fortemente deformadas e metamorfasadas na fácies anfibolito. O pacote foi depositado em um ambiente de plataforma continental com sedimentos argilosos e arenosos. As formações ferríferas da região de Conceição do Mato Dentro (Figura 6) são conhecidas desde o século XVIII, e já no início do século XIX foram usadas para alimentar o primeiro alto forno da América do Sul, instalado em 1808 em Morro do Pilar. Todos os depósitos desta região apresentam composição dentro dos valores médios das formações ferríferas (30-35% de Fe total) sugerindo a pouca importância do enriquecimento hipogênico na região. Rocha sã perfaz cerca de 55% do total, enquanto que a rocha friável a pulverulenta, intemperizada, atinge 45%, com teores médios de 43% de Fe por enriquecimento supergênico, mas pobre em goethita. As características mineralógicas e químicas são muito semelhantes em toda a região: quartzo, hematita e blastos de magnetita subordinada constituem uma trama lepidoblástica a granolepidoblástica com predomínio de hematita lamelar (especularita).

Os três principais depósitos de ferro são Serra do Sapo, Serra da Serpentina e Morro do Pilar. O primeiro tem 15 km de extensão, direção N-NW e camadas de formação ferrífera com até 300 m de espessura (100 m em média), mergulhando 20° para E-NE. A Serra da Serpentina tem 32 km de comprimento, direção N-W a W-NW, e mergulho suave para NE. O Morro do Pilar tem extensão de 22 km, direção N-S e inflete bruscamente para leste no seu extremo sul. A camada ferrífera tem espessura variável, até 250 m a sul, e entre 10 e 50 m no trecho a norte. Corpos hipogênicos de alto teor são poucos e de dimensões modestas restringindo-se a lentes de 10 a 30 m de espessura, por 200 a 300 m de comprimento, associados a falhas de empurrão, e tem teores médios de: 66,93% de ferro total; 3,13% de SiO₂; 0,025% de P; 0,85% de Al₂O₃ e 0,55% de FeO.

O potencial atual de recursos geológicos é estimado em 6 a 8 bilhões de toneladas (Bt) de minério na Serra do Sapo, explorados dentro do chamado Projeto Minas-



Figura 6 Mapa simplificado da Borda Leste da Serra do Espinhaço meridional com as localizações das sequências de formação ferrífera do Grupo Serra da Serpentina e Grupo Guanhanês. (Fonte: seg. ROLIM; ROSIÈRE, 2011; GROSSI-SAD et al., 1997, modificado; PEDROSA-SOARES et al., 1994).

-Rio da Anglo American Brasil; 8 a 10 Bt na Serra da Serpentina, cujo direito mineral pertence à VALE, e 2 a 4 Bt. em Morro do Pilar. Na primeira fase do Projeto Minas-Rio, está sendo lavrado itabirito friável com teor de 38,8% Fe, cujas reservas calculadas perfazem 1,4 Bt. Ainda são conhecidos na região vários outros depósitos em Serro e no entorno de Guanhanês (Figura 5), ainda não totalmente avaliados, supondo-se um recurso de 400 milhões de toneladas.

Distrito Ferrífero de Nova Aurora

Na região ao sul da cidade de Nova Aurora, norte do Estado de Minas Gerais (Figura 4), são encontrados diamictitos de matriz ferruginosa com teores de ferro total variando de 8 a 56% (Figura 7). A Formação Nova Aurora do Grupo Macaúbas é um depósito glaciomarinheiro do período Criogeniano (PEDROSA-SOARES et al., 2011), com espessura máxima estimada de 600m,

composto por metadiamictitos, com intercalações de quartzitos, filitos e xistos micáceos e granatíferos. O Membro Riacho Poções é a porção basal da Formação Nova Aurora e engloba metadiamictitos ferruginosos a hematita e/ou magnetita, e/ou sulfetos que, quando possuem teores de ferro acima de 15%, são correspondentes à uma variedade de rocha ferrífera associada a sequências do tipo Rapitan (VILELA et al., 2014). Os corpos a serem lavrados tem direção norte-sul, mergulham suavemente para leste (10° - 15°); com teores de até 40% Fe. A presença de apatita compromete a qualidade do minério, mas os teores finais no concentrado ($\text{Fe} > 65\%$, $\text{P} < 0,065\%$, $\text{SiO}_2 < 3\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 1\%$, $\text{LOI} < 1\%$) tornam o produto final do beneficiamento mineral atrativo para o mercado consumidor (SAM, 2012).

Diversas empresas desenvolveram trabalhos de exploração mineral na região (VALE, MIBA, SAM), mas foi somente a SAM (Sul Americana de Metais) que desenvolveu um projeto de complexo mineiro composto por mina, mineroduto e porto. A mina deverá ser instalada nos municípios de Grão Mogol e Padre Miguel, no norte de Minas; o mineroduto terá extensão de 482 km e transportará o minério para um porto em Ilhéus no sul do estado da Bahia. As reservas lavráveis foram definidas em 2,614 bilhões de toneladas com teor médio de Fe de 20,04%. Estima-se um potencial de 20 bilhões de toneladas para o distrito mineral, garantindo uma vida útil de pelo menos 25 anos para o empreendimento, com produção de 25 milhões de toneladas/ano de *pellet feed* e início de atividades previsto para o primeiro semestre de 2015.

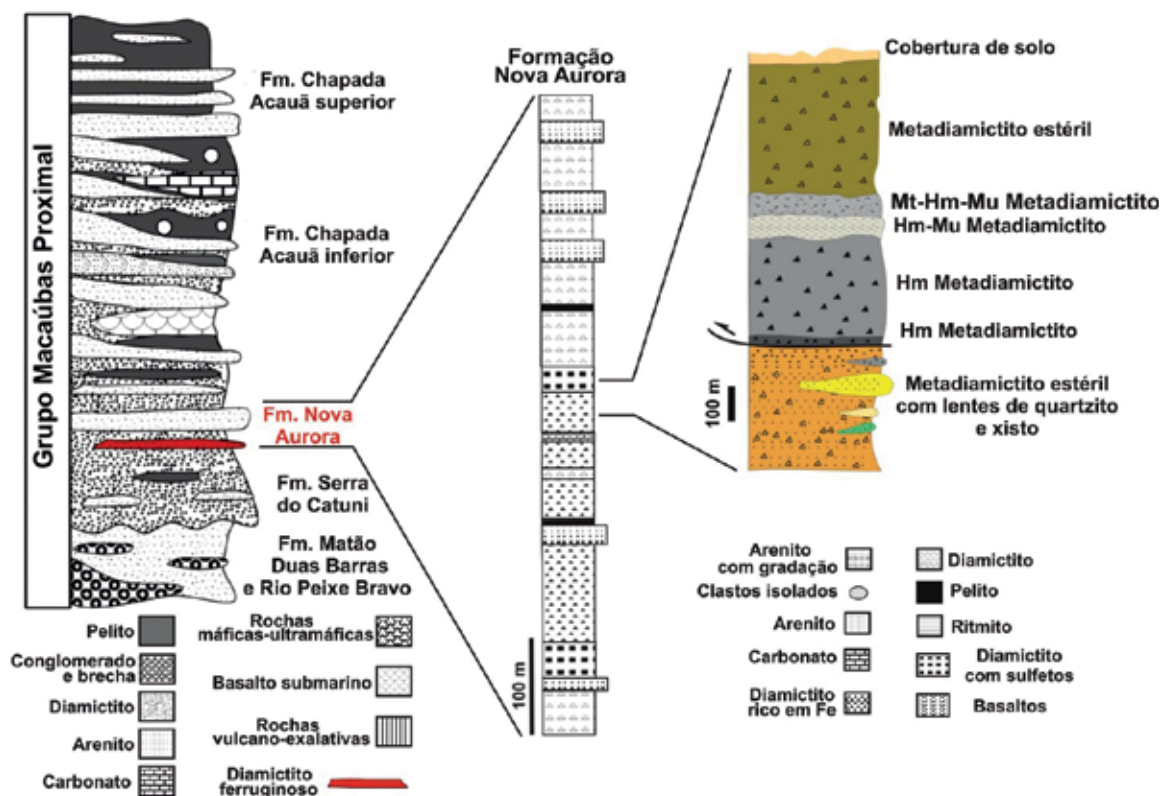


Figura 7 Estratigrafia da sequência portadora de mineralizações em ferro no Grupo Macaúbas no distrito ferrífero de Nova Aurora, MG (Fonte: SAM, 2012).

Distrito Ferrífero de Caetité

As formações ferríferas bandadas localizadas na região de Caetité, no centro sul do Estado da Bahia (Figura 4), pertencem à Formação Mosquito do Complexo Urundi-Licínio de Almeida e estão associadas a mármore, rochas calcissilicáticas, quartzitos e xistos, compondo um ambiente de *greenstone-belt* encravado no complexo TTG do Bloco Gavião (SILVA; CUNHA, 1999). As rochas mineralizadas em ferro são itabiritos friáveis ou compactos com 30 a 120 m de espessura, e teor de ferro total variando de 15 a 35%, com intercalações de corpos ricos hematíticos ($\text{Fe} > 60\%$) de até 25 m de espessura. O maior depósito conhecido é denominado Pedra de Ferro, situado 38 km ao sul da cidade de Caetité, nos municípios de Caetité e Pindaí, e é explorado pela Bahia Mineração, sociedade empresária controlada pela Eurasian Natural Resources Corporation - ENRC, do Cazaquistão.

Segundo estudos da SRK Consulting a jazida do projeto Pedra de Ferro tem uma reserva estimada em 470,5 milhões de toneladas de minério de ferro com teor médio de 40% Fe. A produção anual projetada para a mina é de 20 milhões de toneladas de minério com teor médio do produto de 66 a 68%. Visando garantir a exportação do minério concentrado, a Bahia Mineração construirá um terminal de embarque privativo na região de Aritaguá, em Ilhéus, litoral sul do estado da Bahia, no mesmo porto a ser utilizado pela SAM. No porto, o minério será levado para o píer de embarque *off-shore* construído a 3,5 km da praia através de uma esteira transportadora. Toda a produção será escoada até o terminal privativo de embarque pela Ferrovia de Integração Oeste-Leste, em processo de construção pela VALEC, que vai ligar o município de Figueirópolis (TO) a Ilhéus, na costa atlântica.

Província de Carajás

A Província Mineral Carajás situa-se no núcleo de idade arqueana denominado Província Amazônica Central, com idade superior a 2.500 milhões de anos (BIZZI et al., 2001), no centro-norte do Estado do Pará (Figura 4). É considerada a segunda principal província mineral do Brasil, com produção e potencial crescente para Fe, Mn, Cu, Au, Ni, U, Ag, Pd, Pt e Os, entre outros. Após seu reconhecimento como depósito em 1965, o Projeto Carajás foi iniciado em 1978, pela então Companhia Vale do Rio Doce, tendo a primeira mina entrado em operação oficialmente em 1985, com a inauguração das instalações de transporte e embarque de minério.

Os depósitos de ferro da Província Mineral Carajás (Figura 8) são classificados em três distritos, a saber, as Serras Norte, Sul e Leste onde ocorrem 39 corpos descontínuos de minério de alto teor. O distrito de

Serra Norte (N) contém as minas N4 e N5, além dos depósitos N1 a N3 e N6 a N9. A espessura dos corpos mineralizados varia entre 250 e 300 m, o comprimento entre 200 m (N3, N6, N7 e N9) até 10 Km (N4), e a extensão, segundo o mergulho, pode atingir até 600 m. Na Serra Sul (S), sobressai o depósito S11, cuja operação deverá ampliar consideravelmente a produção de minério na região, havendo a expectativa de sua duplicação (VALE, 2012).

Os depósitos estão localizados nas proximidades da cidade de Parauapebas, dentro da área da Floresta Nacional de Carajás (FLONACA). Seu acesso é realizado pela rodovia que liga Belém a Marabá e Cuiabá-MT (PA-150), seguindo a Trans-Carajás (PA-275) até o Núcleo Urbano de Carajás, num total de 700 km de extensão. Outro acesso possível é pela ferrovia instalada pela Companhia Vale do Rio Doce, que liga o depósito de N4E ao Porto de Itaquí em São Luiz (MA), numa extensão de 887 km.

Na Província de Carajás, a unidade que hospeda as formações ferríferas e delinea a estrutura tectônica da região é o Grupo Grão-Pará que representa uma sequência vulcano-sedimentar de idade arqueana (2.751 ± 4 milhões de anos) (KRYMSKY et al., 2002) hospedeira de camadas de formação ferrífera com expressivas intercalações de jaspe (jaspilito) (Figura 1).

O principal alvo de exploração em Carajás são os grandes corpos de minério de alto teor ($\text{Fe} > 65\%$), de composição magnetítica/martítica e hematítica. Os minérios podem ser duros ou friáveis, apresentando estrutura maciça, bandada ou brechada. Minérios duros ocorrem como corpos descontínuos e veios no meio de grandes massas de minério friável a pulverulento. Localmente, encontram-se associados a rochas dolomíticas, mas a participação de alteração carbonática ainda é subestimada. As rochas vulcânicas subjacentes mostram intensa alteração em clorita e hematita de origem hidrotermal ao longo do contato com os corpos de minérios. Isso demonstra a importância dos processos hidrotermais na formação dos corpos mineralizados. Dalstra e Guedes (2004); Rosiere et al. (2006); Figueiredo e Silva et al. (2008, 2013); Lobato et al. (2005, 2008) interpretam a estrutura da província como resultado de dobramento como efeito de encurtamento N-S, evoluindo progressivamente para zonas transcorrentes regionais de direção ESE-WNW, que serviram de condutos para os fluidos mineralizantes.

A produção anual de minério, durante o ano de 2013, no complexo minerador de Carajás da VALE, a partir dos corpos N4W, N4E e N5, foi de 105 milhões de toneladas. Com a operação de lavra no gigantesco corpo S11 (Serra Sul), a empresa deverá aproximadamente duplicar sua produção (VALE, 2012).

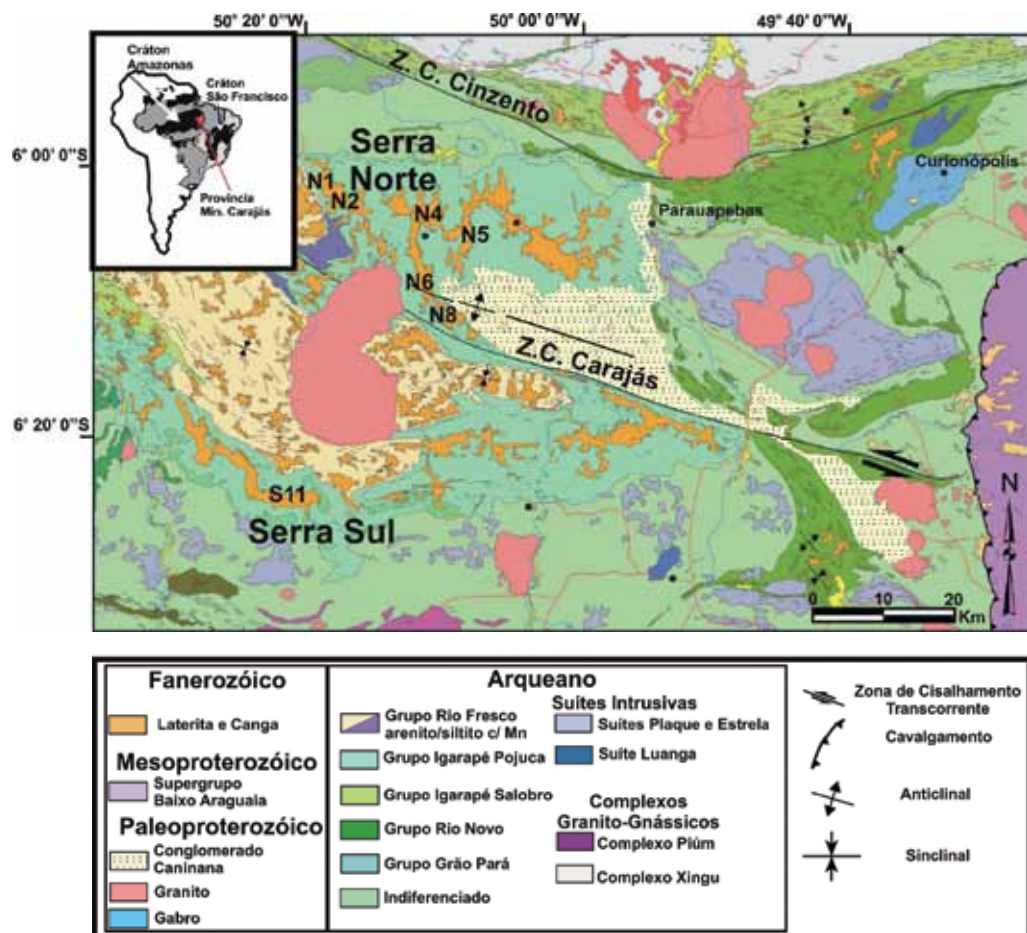


Figura 8 Mapa geológico da Província Mineral de Carajás com a localização dos principais depósitos nas Serras Norte e Sul (N1, N2, N4, N5, N6 e N8 e S11). (Fonte: LOBATO et al., 2005; a partir das interpretações de Rosière et al. (2006) e Seoane et al. (2004)). Baseado em imagens Landsat ETM7, RGB 321, 752, PC1-52 e dados de Araújo e Maia (1991) e CVRD (1996 e 2004). Litoestratigrafia adaptada com dados de campo de Costa (2007) e Pereira (2009).

Distrito de Urucum

O Distrito de Urucum, ou Distrito Ferro-Manganesífero da região de Corumbá-Ladário, está localizado próximo das margens do Rio Paraguai, nas adjacências da localidade de Corumbá, no Mato Grosso do Sul (Figura 4). A mineração começou nessa área em 1930, mas teve maior impulso vinte anos depois, na década de 50, e depois na década de 80, com a criação do Polo Mínero-Siderúrgico de Corumbá. O Distrito compreende os morros em forma de mesa (ou morrarias como são regionalmente denominadas) de Tromba dos Macacos, Urucum, Santa Cruz, São Domingos, Grande, Rabichão e Jacadigo onde afloram as camadas sub-horizontais de formações ferríferas do tipo Rapitan, que compõem a Formação Santa Cruz, Grupo Jacadigo (Figura 9). Essas unidades foram depositadas na Bacia de Jacadigo, do tipo *rift* continental de idade neoproterozoica, intercaladas com rochas ricas em Mn, associadas a

sedimentos de geleiras (arenito e diamictitos) e carbonatos. A composição das formações ferríferas é predominantemente hematítica, apresentando uma fina laminação e estruturas primárias (sedimentares/diagenéticas), como concreções de SiO_2 . As formações ferríferas sofreram enriquecimento supergênico no cenozoico, com o desenvolvimento de níveis de minério de alto teor (60 a 67% Fe) paralelos à atual superfície de erosão, que são lavrados de forma seletiva paralelamente ao acamamento.

Segundo o Anuário Mineral Brasileiro de 2010, as reservas são superiores a 3 bilhões de toneladas de minério com teor de 55% Fe. Pela sua elevada pureza, o minério de alto teor tem sido vendido para redução direta. Em 2013, a VALE, principal detentora de direitos minerários na região, apresentou uma produção de 6,5 milhões de toneladas.

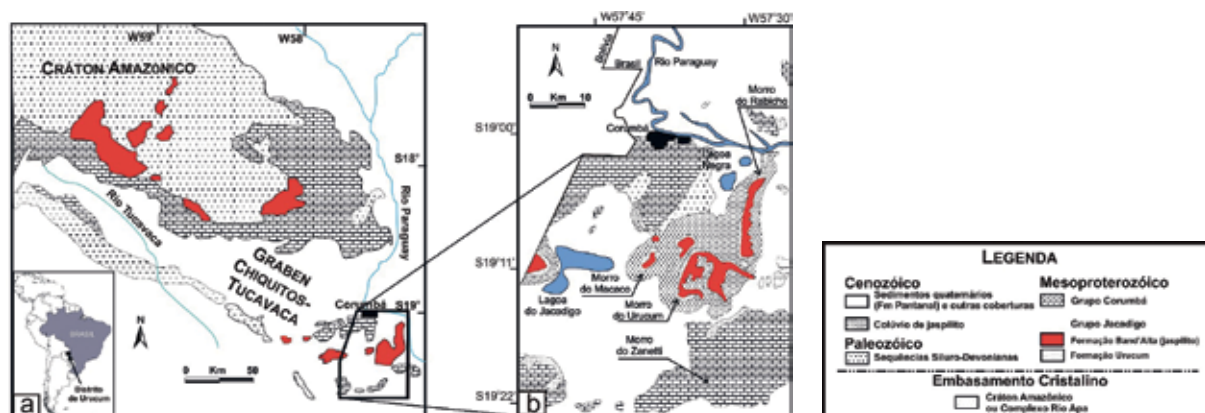


Figura 9 Mapa geológico do Distrito de Urucum, em Mato Grosso do Sul, fronteira com a Bolívia. (a) mapa com o posicionamento geológico das sequências metassedimentares com formação ferrífera dentro do quadro geotectônico regional. (b) Mapa de detalhe com a localização das morrarias onde afloram as formações ferríferas e manganíferas. Em torno dos morros, ocorre um grande acúmulo de detritos, produto da erosão do jaspilito. (Fonte: SCHOBENHAUS; OLIVA, 1979; URBAN et al., 1992); TROMPETTE et al., 1998). Mapa Geológico da Embrapa Pantanal, baseado em imagens TM-Landsat-5, WRS 227/73D, em papel fotográfico, composições coloridas bandas 2, 3 e 4 (15/5/1988), e 3, 4 e 5 (23/8/1995), na escala de 1:100.000; TM-Landsat-5, WRS 227/73D, em formato digital, bandas 3, 4 e 5 (21/6/1984); cartas topográficas, Folhas Corumbá (SE.21-Y-D-II, MI 2469) e Albuquerque (SE.21-Y-D-III, MI 2470) e cartas geológicas na escala de 1:1.000.000 e 1:250.000 (Fonte: DEL' ARCO et al., 1982; TRINDADE et al., 1997).

RECURSOS E RESERVAS DE MINÉRIO DE FERRO: PERSPECTIVAS

As reservas mundiais de minério de ferro totalizam 170 bilhões de toneladas. As reservas lavráveis brasileiras, com um teor médio de 49,0% de ferro, representam 13,6% das reservas mundiais. Os principais estados brasileiros detentores de reservas de minério de ferro são: Minas Gerais (72,5% das reservas e teor médio de 46,3% de Fe), Mato Grosso do Sul (13,1% e teor médio de 55,3%) e Pará (10,7% e teor médio de 64,8%).

A análise da evolução de recursos e reservas para minério de ferro é bem específica em virtude de suas particularidades. Os volumes muito altos de produção envolvidos e o baixo valor agregado por tonelada exige que os depósitos encontrados contenham enormes quantidades de minério de ferro e que os recursos avaliados sejam superficiais, em grande parte aflorantes. A prospecção de depósitos de ferro grandes e aflorantes é facilmente feita por mapeamento geológico e/ou por levantamentos aerogeofísicos em escalas regionais. Se levarmos ainda em consideração que os custos de CAPEX e OPEX da logística de transporte para implantação dos projetos pode restringir a área de prospecção de ferro para uma distância de até 700 km de um porto marítimo, veremos que é pouco provável que novos recursos de minério de ferro sejam descobertos em regiões onde sejam economicamente explotáveis e que, conseqüentemente, as reservas mudem significativamente nos próximos anos.

IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E ESTRATÉGICA PARA O PAÍS

O minério de ferro é a principal *commodity* mineral do Brasil (excetuando-se óleo e gás) responsável por 60% do valor da produção mineral brasileira e por 80% do valor das exportações minerais brasileiras. A produção mundial de minério de ferro, em 2013, foi estimada em 3 bilhões de toneladas (praticamente a mesma quantidade registrada no ano anterior), e o Brasil foi avaliado como o terceiro maior produtor mundial (13,1%) com 386,27 Mt (DNPM, 2015). O maior produtor mundial é a China (840 Mt) embora o minério desse país contenha baixos teores em ferro, o que torna o Brasil maior produtor em termos de conteúdo de metal por ser seu minério de alto teor (> 66% de Fe).

No ano 2000 o setor mineral era responsável por 0,59% do PIB brasileiro, percentual que chegou a 5% em 2013, dos quais 60% foi gerado pelo minério de ferro. Os principais estados produtores são Minas Gerais (68,8%), Pará (27,3%), Mato Grosso do Sul (2,0%) e Amapá (1,6%). As principais empresas produtoras foram: VALE S/A (MG, MS e PA), Samarco Mineração S/A (50,0% VALE) (MG), Companhia Siderúrgica Nacional-CSN (MG), Mineração Usiminas (MG), Itaminas Comércio de Minérios (MG), MMX Sudeste Mineração (MG) e Anglo American Amapá Mineração (AP) que, juntas, foram responsáveis por 89,9% da produção (DNPM, 2015). Por tipo de produto a produção se divide em: granulados (10,7%) e finos (89,3%), estes

distribuídos em *sinter feed* (64,2%) e *pellet feed* (25,1%). As usinas de pelletização brasileiras absorveram 59,3% da produção de minério do tipo *pellet feed*. Apesar da produção de bens minerais primários representar uma parcela reduzida do PIB brasileiro, ela tem um elevado efeito multiplicador na economia, provocando um círculo virtuoso na geração de emprego e renda. A indústria mineral brasileira é de fato uma atividade voltada para a exportação e a geração de divisas.

Em 2013, o Brasil exportou 329,6 Mt de minério e pelotas, o que representa 85% da produção nacional, com um valor de US\$-FOB 32,5 bilhões. Os principais países de destino foram: China (51,0%), Japão (10,0%), Coreia do Sul e Países Baixos (5,0% cada) e Alemanha (3,0%). O preço médio de exportação de minério, em 2013, foi US\$-FOB 92,14/t. China é o maior importador mundial dessa matéria-prima, consumindo quase 60% de todo o minério de ferro disponível no mercado internacional. O saldo da balança comercial mineral brasileira em 2013 (US\$ 32 bilhões) foi 12,5 vezes maior que o saldo total da balança comercial do país (US\$ 2,6 bilhões) e, pelos dados do IBRAM, os embarques que puxaram as exportações do setor foram os de minério de ferro, com US\$ 32,5 bilhões (4,8% a mais que em 2012).

A indústria da mineração de ferro para exportação no Brasil é, entretanto, muito mais uma indústria de logística de transporte do que realmente de produção de minério. Cerca de 2/3 do custo de produção e venda de uma tonelada de minério de ferro colocada no porto do país comprador se referem ao custo de transporte. A falta de uma logística estruturada (porto e ferrovia) dificulta a entrada no mercado de novas regiões produtoras e restringe a pesquisa por novas jazidas a uma distância em torno de 700 km de um porto. Assim sendo, mesmo os depósitos já conhecidos necessitam da construção de sistemas de transporte (porto e ferrovia ou mineroduto) e a implantação destes sistemas é cara e demorada. O CAPEX e o custo ambiental de implantação de um sistema de transporte para exportação de minério de ferro são tão elevados que inviabilizam que cada mina tenha o seu sistema isoladamente. A implantação de um sistema de transporte – porto e ferrovia – para um conjunto de minerações, orquestrado pelo poder público, seria uma possível solução para a viabilização de novos polos produtores como, por exemplo, a região centro norte de Minas Gerais.

Os preços do minério de ferro subiram muito no mercado internacional no período entre 2004 e 2013, puxados principalmente pelo aumento gigantesco da demanda chinesa. A partir de 2013 os preços do minério de ferro caíram bruscamente até atingirem, no final

de 2014, patamares semelhantes àqueles praticados no fim do século XX (US\$50 a US\$60 por tonelada) forçando a interrupção de diversos novos projetos minerais por todo o mundo, embora alguns tenham conseguido entrar em produção sendo o maior deles o Minas-Rio da Anglo American Brasil que deve atingir sua capacidade projetada de produção em 2017.

As causas da queda dos preços do minério de ferro a partir de 2013 continuam sendo motivo de debates pelos analistas de mercado. A diminuição do crescimento econômico chinês e a consequente queda na demanda é o fator mais óbvio e o mais comumente citado em qualquer análise conjuntural. A entrada em produção de novos projetos, tanto no Brasil como em outras partes do mundo, e o aumento da oferta de minério, também seriam outros fatores importantes. Na conjuntura atual de preços, em pouco tempo, somente restarão produzindo as minerações de ferro que dispuserem de sistemas baratos de transporte e/ou com minérios de alta qualidade. Para melhorar a posição competitiva brasileira no mercado internacional de minério de ferro, o país necessita realizar investimentos em ferrovias e portos, considerando ser o setor altamente dependente da eficiência e dos custos da infraestrutura.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N. *Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil*. Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás: Subprojeto Recursos Minerais, Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A. Brasília, DNPM/Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais-CPRM, p.152. 1991.
- BARLEY, M.E.; PICKARD, A.L.; HAGEMANN, S.C.; FOLKERT, S.L. Hydrothermal origin for the 2 billion year old Mount Tom Price giant iron ore deposit, Hamersley province, Western Australia: *Mineralium Deposita*, v. 34, p. 784-789. 1999.
- BEUKES, N. J. Palaeoenvironmental setting of iron-formations in the depositional basin of the Transvaal Supergroup, South Africa. In: TRENDALL, A.E.; MORRIS, R.C. (Eds.). *Iron-formation: Facts and problems*. Amsterdam: Elsevier, p. 131-209. 1983.
- BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; GONÇALVES, J.H.; BAARS, F.J.; DELGADO, I.M.; ABRAM, M.B.; LEÃO NETO, R.; DE MATOS, G.M.M.; SANTOS, J.O.S.; *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*: Sistema de Informações Geográficas. CPRM, Brasília, 4ª Edição. 02/08/2002. Escala 1:2 500 000. 2001. [CDs-ROM].
- CLOUT, J. M. E.; SIMONSON, B. M. Precambrian iron formations and iron formation-hosted iron ore deposits. In: HEDENQUIST, J. W.; THOMPSON, J. F. H.; GOLDFARB, R. J.; RICHARDS, J. P. (Eds.). *Economic Geology 100th Anniversary Volume*: Littleton, *Society of Economic Geologists*, p. 643-679. 2005.
- COSTA, L.P. *Caracterização das seqüências metavulcanossedimentares da porção leste da Província Mineral Carajás, Pará*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. 113 p.
- CVRD. Resumo dos aspectos geológicos da Província Mineral Carajás. In: *Guia de excursão*: DIGEB/DEPAB/GIMB/SUMIC, 1996. 392-403 p.
- CVRD. Atualização dos recursos e reservas provadas e prováveis das minas de N4 e N5. In: *Relatório de pesquisa*: Departamento Nacional de Produção Mineral-DNPM, v. I, 197 p. 2004.
- DALSTRA, H. J.; GUEDES, S. C. Giant hydrothermal hematite deposits with Mg-Fe metasomatism: a comparison of the Carajás, Hamersley and other ores. *Econ. Geol.*, v. 99, 1793-1800. 2004.
- DEL' ARCO, J.O.; SILVA, R. H.; TARAPANOFF, I.; FREIRE, E.A.; PEREIRA, L. G.; SOUZA, S. L.; LUZ, D.S.; PALMEIRA, R.C. B.; TASSINARI, C.C.G. *Geologia*. Projeto RADAMBRASIL, Folha SE.21, Corumbá. Rio de Janeiro, *Levantamento de Recursos Naturais*, v. 27, p. 25-160.
- DNPM. *Sumário mineral brasileiro – Ferro*. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2014>>. Acesso em 13 de junho de 2015.
- DORR, J. V. N. Supergene ores of Minas Gerais, Brazil. *Econ. Geol.* v. 59, p. 1203-1240. 1964.
- DORR J. V. N. Nature and origin of the high-grade hematite ores of Minas Gerais, Brazil. *Econ. Geol.*, v. 60, p. 1-46. 1965.
- DORR, J.V.N. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *US Geol. Surv. Prop. Pap.* p. 110-641. 1969.
- Embrapa Pantanal. Mapa de Geologia. Laboratório de Geoprocessamento. Disponível em: <<http://www.cpap.embrapa.br/agencia/001bdado1.htm>>. Acesso em 13 de junho de 2015
- ESCHWEGE, W.L. *Pluto brasiliensis*. Berlim: G. Reimer. 622 p. 1833.
- FIGUEIREDO E SILVA, R.; LOBATO, L.M.; ROSIÈRE, C.A.; ZUCCHETTI, M.; HAGEMANN, S.; ZUCCHETTI, M.; BAARS, F.J.; MORAIS, R.; ANDRADE, I. Hydrothermal origin for the jaspilite-hosted, giant Serra Norte iron ore deposits in the Carajás mineral province, Para State, Brazil. *Reviews in Economic Geology*, v. 15, p. 255-290. 2008.
- GROSSI-SAD, J.H.; MOURÃO, M.A.A.; GUIMARÃES, M.L.V.; KNAUER, L.G. Geologia da Folha Conceição do Mato Dentro. In: GROSSI-SAD, J.H.; LOBATO, L.M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; SOARES-FILHO, B.S. (Eds.). *Projeto Espinhaço. COMIG* (textos, mapas e anexos). p. 2533 e 2693. 1997. [CD-ROM]
- GROSS, G. A. Tectonic systems and the deposition of iron-formation. *Precambrian Research*, v. 20, p. 171-187. 1983.
- GUILD, P.W. Geology and mineral resources of the Congonhas district, Minas Gerais, Brazil. *US Geological Survey Professional Paper*, v. 290, 90 p. 1957.
- HAGEMANN, S.G.; BARLEY, M.E.; FOLKERT, S.L.; YARDLEY, B.W.; BANKS, D.A. A hydrothermal origin for the giant Tom Price iron ore deposit. In: STANLEY, C.J. et al., (Eds.). *Mineral deposits: Processes to processing*: Rotterdam, A.A. Balkema, p. 41-44. 1999.
- KLEIN, C. Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin. *American Mineralogist*, v. 90, p. 1473-1499. 2005.
- KLEIN, C.; BEUKES, N.J. Geochemistry and sedimentology of a facies transition from limestone to iron-formation deposition in the Early Proterozoic Transvaal Supergroup, South Africa: *Econ. Geol.*, v. 84, p. 1733-74. 1989
- KONHAUSER, K.O.; HAMADE, T.; RAISWELL, R.; MORRIS, R.C.; FERRIS, F.C.; SOUTHAM, C.; CANFIELD, D. Could bacteria have formed the Precambrian banded iron formations? *Geology*, v.30, p. 1079-1082. 2002.
- KRYMSKY, R.SH.; MACAMBIRA, J.B.; MACAMBIRA, M.B.J. Geocronologia U-Pb em zircão de rochas vulcânicas da Formação Carajás, Estado do Pará. In: Simpósio sobre vulcanismo e ambientes associados, 2nd, 2002, Belém. *Abstract: Simpósio sobre vulcanismo e ambientes associados*, 2nd, Belém, p. 41. 2002.
- LOBATO, L.M.; FIGUEIREDO e SILVA, R.C.; HAGEMANN, S.; THORNE, W.; ZUCCHETTI, M. Hypogene alteration associated with high-grade banded iron formation-related iron ore. *Reviews in Economic Geology*, v. 15, p. 107-128. 2008.
- LOBATO, L.M.; ROSIÈRE, C.A.; FIGUEIREDO e SILVA, R.C.; ZUCCHETTI, M.; BAARS, F.J.; SEOANE, J.C.S.; RIOS, F.J.; PIMENTEL, M.; MENDES, G.E.; MONTEIRO, A.M. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás—Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. In: MARINI, O.J., de QUEIROZ, E.T.; RAMOS, B.W. (Eds.). *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM)/Fundo Setorial Mineral (CT-Mineral/FINEP)/Agência para o Desenvolvimento

- Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira (ADIMB), Brasília, Brazil., p. 25-92. 2005.
- PEDROSA-SOARES, A.C.; DARDENNE, M.A.; HASUI, Y.; CASTRO, F.D.C.; CARVALHO, M.V.A. *Nota Explicativa dos Mapas Geológico, Metalogenético e de Ocorrências Minerais do Estado de Minas Gerais*, Escala 1:1.000.000. 1994.
- PEDROSA-SOARES, A.C.; BABINSKI, M.; NOCE, C.M.; MARTINS, M.; QUEIROGA, G. VILELA, F. The Neoproterozoic Macaúbas Group (Araçuaí Orogen, SE Brazil). In: Arnaud, E.; Halverson, G.P.; Shields-Zou, G. (Eds). *The Geological record of Neoproterozoic glaciations. Memoirs, Geol. Soc. London*, v. 35, p. 523-534. 2011.
- PEREIRA, R. M. P. *Geologia da Região Sul da Serra Norte e Características do Minério de Ferro do depósito N8, Província Mineral Carajás*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil. 131 p. 2009.
- ROLIM, V.K.; ROSIÈRE, C.A. The Conceição do Mato Dentro Iron Formation Province in southeastern Brazil. In: *Proceedings of the Eleventh Biennial SGA Meeting*, Antofagasta, Chile. Let's Talk Ore Deposits. p. 927-929. 2011.
- ROSIÈRE, C.A.; SIEMES, H.; QUADE, H.; BROKMEIER, H.G.; JANSEN, E.M. Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite. *Journal of Structural Geology*. v. 23, p. 1429-1440. 2001.
- ROSIÈRE, C.A.; RIOS, F.J. The origin of hematite in high-grade iron ores based on infrared microseopy and fluid inclusion studies: the example of the Conceição mine, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Economic Geology*, v. 99, p. 611-624. 2004.
- ROSIÈRE, C.A.; BAARS, F.J.; SEOANE, J.C.S.; LOBATO, L.M.; da SILVA, L.L.; de SOUZA, S.R.C.; MENDES, G.E. Structure and iron mineralization of the Carajás province. *Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*, sec. B, v. 115, p. 126-136. 2006.
- ROSIÈRE, C.A.; SPIER, C.A.; RIOS, F.J.; SUCKAU, V.E. The itabirites of the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade iron ore deposits: an overview. In: HAGEMANN, S.; ROSIÈRE, C.A.; GUTZMER, J.; BEUKES, N. (Eds.). *Banded Iron Formation-Related High-Grade Iron Ore*, Society of Economic Geologist, Littleton, Colorado. *Reviews in Economic Geology*, v.15, p. 223-254. 2008.
- ROSIÈRE, C.A.; SANGLARD, J.; SABADINI JR, R.; HENSLER, A.S.; HAGEMANN, S. G.; SANTOS, J. O. S.; MCNAUGHTON, N.; FLETCHER, I. Iron mineralization in the Quadrilátero Ferrífero: Structural Control, Age and Mineral-Chemical Changes. In: *12th SGA Biennial Meeting*, Uppsala. 2013.
- ROSIÈRE, C. A.; SIEMES, H.; QUADE, H.; BROKMEIER, H.G.; JANSEN, E. M. Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite. *Journal of Structural Geology*, v. 23, p. 1429-1440. 2001.
- SAM. *Geologia e Desenvolvimento do Projeto Vale do Rio Pardo*. Disponível em: <www.sammetais.com.br>. Acesso em 12 de junho de 2015.
- SANGLARD, J.; ROSIÈRE, C.A.; SANTOS, J.O.S.; MCNAUGHTON, N.J.; FLETCHER, I. A estrutura do segmento oeste da Serra do Curral, Quadrilátero Ferrífero, e o controle tectônico das acumulações compactas de alto teor em Fe. *Geologia USP. Série Científica*, v. 13, p. 81-95. 2014.
- SCHOBENHAUS, C.; OLIVA, L.A. *Carta geológica do Brasil ao milionésimo: folha Corumbá* (SE.21), Brasília: DNPM. Escala de 1:1.000.000. 1979.
- SEOANE, J. C. S.; ROSIÈRE, C. A.; BAARS, F. J.; LOBATO, L. M. Mapeamento Litoestrutural 3-D do Grupo Grão Pará, Província Mineral de Carajás. In: Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, 2004, Ouro Preto. *Anais do Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral*, Brasília: Adimb. 2004. [CD-ROM].
- SILVA, M.G.; CUNHA, J.C. Greenstone belts and equivalent volcano-sedimentary sequences of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil, - geology and mineral potencial. In: SILVA, M.G.; MISI, A. (Orgs). *Base Metal deposits of Brazil*. Belo Horizonte, Ministério das Minas e Energias, p. 1-108. 1999.
- SIMONSON, B.M. Sedimentological constraints on the origins of Precambrian iron formations. *Geological Society of America Bulletin*, v. 96, p. 244-252. 1985.
- SPIER, C.A.; OLIVEIRA, S.M.B.; ROSIÈRE, C.A. Geology and geochemistry of the Aguas Claras and Pico iron ore mines, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 751-774. 2003.
- TAYLOR, D.; DALSTRA, H.J.; HARDING, A.E.; BROADBENT, G.C.; BARLEY, M.E. Genesis of high-grade hematite orebodies of the Hamerley Province, Western Australia. *Econ. Geol.*, v. 96, p. 837-873. 2001.
- TRENDALL, A. F. The significance of iron-formation in the Precambrian stratigraphic record. *International Association of Sedimentologists. Special Publication*, v. 33, p. 33-66. 2002.
- TRINDADE, C.A.H.; TARAPANOFF, I.; POTIGUAR, L. Geologia. In: BRASIL Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai (Pantanal) - PCBAP. *Diagnóstico dos meios físico e biótico: meio físico*. Brasília: MMA, v. 2, t.1, p.1-75. 1997.
- TROMPETTE, R.; ALVARENGA, C.J.S.; WALDE, D. Geological evolution of the Neoproterozoic Corumbá graben system (Brazil). Depositional context of the stratified Fe and Mn ores of the Jacadigo Group. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 11, p. 587-597. 1998.
- URBAN, H.; STRIBRNY, B.; LIPPOLT, H.J. Iron and manganese deposits of the Urucum district, Mato Grosso do Sul, Brazil. *Economic Geology*, v. 87, p. 1375-1392. 1992.
- VALE. *Projeto Ferro Carajás S11D*. Disponível em: <www.vale.com/brasil/pt/initiatives/s11d/paginas/default.aspx>. Acesso em 11 de junho de 2015.
- VALE. *Relatório de Produção 2013 e 4T13*. Disponível em: <http://www.vale.com/PT/investors/information-market/quarterly-results/ResultadosTrimestrais/PREPORT4T13_p.pdf>. Acesso em 12 de junho de 2015.
- VILELA, F.T.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CARVALHO, M.T.N.; ARIMATÉIA, R.; SANTOS, E.; VOLL, E.; Metalogênese da Faixa Araçuaí: o distrito ferrífero de Nova Aurora (Grupo Macaúbas, norte de Minas Gerais) no contexto dos recursos minerais do Orogênio Araçuaí. In: SILVA, M.G.S.; NETO, M.B.R.; KUYUMJIAN, R.J.H. (Org.). *Metalogênese das Províncias tectônicas brasileiras*, p. 415-530. 2014.

Ouro no Brasil: principais depósitos, produção e perspectivas

Lydia Maria Lobato

Marco Aurélio da Costa

Instituto de Geociências-CPMTC, Universidade Federal de Minas Gerais

Steffen G. Hagemann

Centre for Exploration Targeting, University of Western Australia

Rodrigo Martins

AngloGold Ashanti Brasil

RESUMO

A produção brasileira de ouro se estende por vários séculos. A vocação exploratória do país para ouro é traduzida pelo expressivo número de depósitos em terrenos de idades desde o Arqueano até o final do Neoproterozoico, em especial em sistemas do tipo orogênico *gold-only*. A maioria está hospedada em sequências metavulcanossedimentares, em especial do tipo granito-*greenstone* de idade arqueana ou paleoproterozoica, em regiões de Minas Gerais - Quadrilátero Ferrífero, Bahia e Goiás, principalmente. Contudo, é em cinturão metassedimentar do Neoproterozoico que localiza-se o nosso maior depósito de ouro orogênico, Morro do Ouro, em Minas Gerais, apontando a importância desse período geológico para a exploração aurífera brasileira. A distribuição dos principais depósitos de ouro no Brasil, sua produção e reservas é apresentada em formato de tabela, gráfico de setores e mapas, com sessenta e dois agrupamentos de depósitos, ou depósitos individuais produtores (> 0,1 Moz, cerca de 3 t de ouro contido). Esta distribuição mostra grande concentração nas porções do centro, sudeste e norte do país, denotando não só o maior conhecimento geológico dessas regiões, mas também o maior investimento, infraestrutura e melhor acesso às áreas. Isso indica um potencial crescente, em especial em áreas relativamente pouco conhecidas da Província Carajás, Tapajós e em partes de Mato Grosso, Maranhão, província Borborema e cinturão Dom Feliciano do sul do Brasil, além de regiões de conhecimento mais avançado, como o Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais.

Palavras-chave Ouro. Brasil. Sequências metavulcanossedimentares. Produção. Potencial aurífero.

INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca como um grande produtor de ouro no cenário mundial há vários séculos. Pouco depois da descoberta do país pelos portugueses, várias expedições (entradas e bandeiras) buscaram metais preciosos e gemas por diversas partes do interior. Desta forma, quantidades relativamente pequenas de ouro foram encontradas ao longo do século XVI, com melhores resultados sendo alcançados no final do século XVII. Durante os séculos XVIII e XIX, o Brasil liderou a produção aurífera mundial, com pequena produção entre 5 até 8 t de ouro por ano, no final do século 19 até o final do século 20. Pelo menos oito minas foram abertas entre 1983 e 1990, período considerado o primeiro grande *boom* brasileiro de ouro dos tempos modernos. A produção aurífera em 1992, por empresas de mineração, alcançou 40 t. Entre 1982 e 1999, o país tinha dez minas de ouro grandes (> 20 t Au) e sete menores (3-8 t Au). Nesse período, 66% do ouro produzido era advindo de rochas do Arqueano, e 19% e 15% do Paleoproterozoico e Neoproterozoico, respectivamente. Tal relato é apresentado de forma simplificada na revisão de Thorman et al. (2001), que introduzem excelente histórico da geologia, da distribuição das principais minas de ouro do país na metade final do século 20, e do cenário brasileiro da produção de ouro.

Do início a meados dos anos 2000, o segundo *boom* de ouro iniciou-se com aumento da produção, em parte devido à abertura de novas minas, como Chapada (Goiás-GO), Cuiabá, Lamego, Turmalina (em Minas Gerais-MG) e Mamão (Pará-PA) (Tabela 1 e Figura 1).



Figura 1 Localização dos principais depósitos de ouro (> 0,1 Moz de ouro) no Brasil. As regiões de Carajás e QF (Quadrilátero Ferrífero) marcadas no mapa são detalhadas nos mapas das Figuras 2 e 3 (Fonte: Elaborada pelos autores).

De 2001 a 2007, a produção anual de ouro variou entre 38 e 47 t (DNPM, Brasil). Desde então, vários novos depósitos entraram em produção (Tabela 1), sendo exemplos Caeté (MG) da Jaguar Mining, em 2010; Aurizona da Luna Gold (Maranhão-MA) e Tucano (antigo Amapari) da Beadell Resources (Amapá-AP), ambos em 2011; e uma mina da Yamana (C1-Santa Luz, BA), em 2013.

Tabela 1 Principais depósitos de ouro (> 0,1 Moz de ouro) no Brasil, sua localização em províncias e/ou regiões, e período de vida de operação de mina, ouro contido (em toneladas e Moz), teor (g/t Au), grupo empresarial atual proprietário e fonte de informação. Os dados não incluem produção garimpeira no passado.

Nome do Depósito	Província ou Região	Período de Vida da Mina	Commodity	Toneladas (Ouro)	Moz (Ouro)	Teor g/t Ouro	Grupo Empresarial	Fonte da Informação
Amapari-Tucano ¹	Greenstone belt Vila Nova - AP	2003-	Au	167,12	5,37	1,67	Beadell Resources Ltd.	Beadell website: Tabelas de Recursos e Reservas (2014)
Lourenço ²	Distrito Aurífero Lourenço - AP	1984-1995	Au	19,96	0,64	7,35	CMA Mineração	Companhia de Mineração do Amapá-CMA
C1-Santa Luz ¹	Greenstone belt Itapicuru - BA	1990-1996	Au	37,25	1,19	2,19	Yamana Gold Inc.	Relatório Anual (2013)
Fazenda Brasileiro ¹	Greenstone belt Itapicuru - BA	1988-	Au	4,49	0,15	5,30	Yamana Gold Inc.	Relatório Anual (2013)
Jacobina ¹	Serra de Jacobina - BA	1983-	Au	64,51	2,07	2,82	Yamana Gold Inc.	Relatório Anual (2013)
Posse ¹	Distrito Chapada-Mara Rosa - GO	1987-1995	Cu-Au	41,33	1,33	1,85	Amarillo Gold Corp.	Mara Rosa: Relatório Técnico de Estimativa de Recursos (2011)
Chapada ¹	Distrito Chapada-Mara Rosa - GO	2007-	Cu-Au	127,29	4,08	0,25	Yamana Gold	Yamana website: Tabelas de Recursos e Reservas (2014)
Mina Nova & Mina III (Crixás) ¹	Greenstone belt Crixás - GO	1989-	Au	92,98	2,99	4,18	Anglogold Ashanti	Anglogold Ashanti Ltd. Mineral reserve Resource Report (2013)
Premier ¹	Greenstone belt Crixás - GO	2014-	Au	3,56	0,11	1,53	Cleveland Mine Co. Ltd.	Relatório Técnico JORC (2013)
Pilar ¹	Greenstone belt Pilar de Goiás - GO	2013-	Au	42,10	1,36	3,98	Yamana Gold	Yamana website: Tabelas de Recursos e Reservas (2014)
Aurizona ¹	Província Gurupi - MA	2006-2009; 2011-	Au	145,41	4,67	1,47	Luna Gold Corp.	Relatório Técnico NI 43101 (2014)
Cachoeira ¹	Província Gurupi - PA	Previsto para 2017	Au	38,24	1,23	1,07	Brazil Resources Inc.	Cachoeira Relatório Técnico (2014)
Gurupi ¹	Província Gurupi - MA	Previsto para 2017	Au	96,41	3,21	1,09	Jaguar Mining Inc.	Relatório Recursos Minerais - Estudos de Viabilidade (2011)
Morro do Ouro ¹	Faixa Brasília - MG	1987-	Au	321,46	10,34	0,40	Kinross Gold Corp.	Kinross Gold Corp. website: Tabelas de Recursos e Reservas (2014)
Riacho dos Machados ¹	Ouro Fino, Paramirim - MG	1989-1987; 2012-	Au	47,38	1,52	1,75	Carpathian Gold Inc. *	Relatório Estimativa de Recursos e Atualização do Estudo de Viabilidade (2011)

Nome do Depósito	Província ou Região	Período de Vida da Mina	Commodity	Toneladas (Ouro)	Moz (Ouro)	Teor g/t Ouro	Grupo Empresarial	Fonte da Informação
Bicalho ²	Província Quadrilátero Ferrífero - MG	1964-1996	Au	8,78	0,29	7,25	Anglogold Ashanti Ltd.	Saint John del Rey Mining Co. Ltd., Morro Velho e AngloGold: Relatórios Anuais
Caeté (Pilar e Roça Grande) ¹	Província Quadrilátero Ferrífero - MG	1996-2001; 2008-	Au	70,58	2,31	4,20	Jaguar Mining Inc.	Jaguar website: Tabelas de Recursos e Reservas (2014)
Córrego do Sítio ¹	Província Quadrilátero Ferrífero - MG	1990-1998; 2002-	Au	168,62	5,42	5,06	Anglogold Ashanti Ltd.	Anglogold Ashanti Ltd. Mineral reserve Resource Report (2013)
Cuiabá ¹	Província Quadrilátero Ferrífero - MG	1934-1939; 1985 -	Au	174,80	5,62	9,62	Anglogold Ashanti Ltd.	Anglogold Ashanti Ltd. Mineral reserve Resource Report (2014)
Faria ²	Província Quadrilátero Ferrífero - MG	1934-1995	Au	8,97	0,28	7,44	Anglogold Ashanti Ltd.	Saint John del Rey Mining Co. Ltd., Morro Velho e AngloGold: Relatórios Anuais
Gongo Soco ²	Província Quadrilátero Ferrífero - MG	1919-1998	Au	13,26	0,41		Vale	Ferrand (1913)
Itabira ²	Província Quadrilátero Ferrífero - MG	1987-1990	Au	0,71	0,02	82,8	Vale	Olivo et al. (2001)
Lamego ¹	Província Quadrilátero Ferrífero - MG	2004-	Au	38,53	1,24	4,45	Anglogold Ashanti Ltd.	Anglogold Ashanti Ltd. Mineral reserve Resource Report (2013)
Maquíné ²	Província Quadrilátero Ferrífero - MG	1865-1896	Au	5,28	0,16	14,49	Vale	Bensunsan (1908)
Morro Velho ²	Província Quadrilátero Ferrífero - MG	1834 -2003	Au	332,02	10,71	7,19	Anglogold Ashanti Ltd.	Saint John del Rey Mining Co. Ltd., Morro Velho e AngloGold: Relatórios Anuais
Passagem de Mariana ²	Província Quadrilátero Ferrífero - MG	1864-1974	Au	35,08	1,09	8,33	CMP	Companhia Minas de Passagem (CMP): Relatórios Anuais
Raposos ²	Província Quadrilátero Ferrífero - MG	1982-1999	Au	67,11	2,16	9,50	Anglogold Ashanti Ltd.	Saint John del Rey Mining Co. Ltd., Morro Velho e AngloGold: Relatórios Anuais
São Bento ²	Província Quadrilátero Ferrífero - MG	1987-2007; 2014-	Au	56,80	1,77	9,28	Anglogold Ashanti Ltd.	São Bento Annual Reports

Nome do Depósito	Província ou Região	Período de Vida da Mina	Commodity	Toneladas (Ouro)	Moz (Ouro)	Teor g/t Ouro	Grupo Empresarial	Fonte da Informação
São Sebastião ¹	Região de Onça/ Pitangui - MG	----	Au	19,86	0,64	4,88	Iamgold Corp.	Iamgold Corp. Press Release (2014)
Turmalina ²	Região de Onça/ Pitangui - MG	1992-1997, 2004-	Au	35,41	1,14	6,00	Jaguar Mining Inc.	Mineral Resources, Relatório Técnico sobre a Mina Turmalina (2015)
Cabaçal ¹	Alto Jauru - MT	1987-1991	Au-Cu	4,34	0,14	5,20	IMS	Mineração Santa Martha (1989): Reservas Residuais e Produção Acumulada
Ernesto/ Pau a Pique ¹	Faixa Móvel Aguapeí - MT	----	Au	9,99	0,32	3,53	Yamana Gold	Yamana website: Tabelas de Recursos e Reservas (2014)
São Francisco ¹	Faixa Móvel Aguapeí - MT	1995-1997	Au	10,42	0,34	0,92	Aura Minerals Inc.	São Francisco Relatório Técnico NI 43101 (2012)
São Vicente ¹	Faixa Móvel Aguapeí - MT	2008-2011	Au	5,57	0,18	0,87	Aura Minerals Inc.	São Vicente Relatório Técnico NI 43101 (2012)
Cajueiro ¹	Juruena-Teles Pires - MT	----	Au	14,94	0,47	0,98	ECI Exploration and Mining	Relatório Técnico NI 43101 (2013)
União-Ouro Paz ¹	Juruena-Teles Pires - MT	----	Au	21,26	0,68	2,49	International Gold Field Ltd.	Relatório Técnico de Estimativa de Recursos (2014)
X1 ¹	Juruena-Teles Pires - MT	----	Au	11,44	0,37	4,55	Rio Novo Gold Inc.	Garantã: Relatório Técnico de Estimativa de Recursos - Preliminar (2010)
Araés ¹	Nova Xavantina - MT	2009-	Au	13,40	0,43	3,57	Mineração Caraíba	Mineração Caraíba (2012): Relatório Técnico: Viabilização da Mina de Ouro do Araés
Volta Grande ¹	Greenstone belt Três Palmeiras- PA	----	Au	214,36	6,89	1,86	Belo Sun	2014 Avaliação Econômica Preliminar NI 43-101, Belo Sun
118 ¹	Província Carajás - PA	----	Cu-Au	51,00	1,64	0,30	Vale	Grainger et al. (2008)
Águas Claras ¹	Província Carajás - PA	----	Au-Cu	23,09	0,74	2,43	Vale	Grainger et al. (2008)
Alemão ¹	Província Carajás - PA	----	Cu-Au	133,73	4,30	0,80	Vale	Ronzê et al. (2000)
Antas North ¹	Província Carajás - PA	----	Cu-Au	3,74	0,12	0,60	Avanco Resources Ltd.	2014 JORC Antas North Relatório Técnico, Avanco

Nome do Depósito	Província ou Região	Período de Vida da Mina	Commodity	Toneladas (Ouro)	Moz (Ouro)	Teor g/t Ouro	Grupo Empresarial	Fonte da Informação
Breves ¹	Província Carajás - PA	----	Cu-Au	37,48	1,21	0,75	Vale	Grainger et al. (2008)
Cristalino	Província Carajás - PA	----	Cu-Au	150,00	4,82	0,30	Vale	Grainger et al. (2008)
Igarapé Bahia ¹	Província Carajás - PA	1990-2000	Au-Cu	97,00	3,10	0,86	Vale	Xavier et al. (2012)
Pedra Branca ¹	Província Carajás - PA	----	Cu-Au	15,48	0,50	0,34	Avanco Resources Ltd.	Avanco Pedra Branca - Recursos Minerais em Junho de 2013
Salobo ¹	Província Carajás - PA	2012-	Cu-Au	426,38	13,71	0,38	Vale	2013 Relatório Técnico NI-43101 (Micom Silver Wheeler Corp.)
Serra Pelada ²	Província Carajás - PA	----	Au-Pd	56,24	1,81	15,20	Vale	Grainger et al. (2008)
Sossego ¹	Província Carajás - PA	2004-	Cu-Au	99,40	3,20	0,28	Vale	Grainger et al. (2008)
Castelo dos Sonhos ¹	Província Tapajós - PA	----	Au	8,71	0,28	2,07	TriStar Gold Inc.	Relatório Técnico NI43101 (2014)
Coringa ¹	Província Tapajós - PA	----	Au	28,30	0,91	8,47	Magellan Minerals Ltd.	Relatório Técnico NI 43101 (2015)
Cuiú-Cuiú ¹	Província Tapajós - PA	----	Au	40,60	1,30	1,18	Magellan Minerals Ltd.	Relatório Técnico NI 43101 (2015)
Palito ¹	Província Tapajós - PA	2006-2010; 2014-	Au	18,64	0,56	0,25	Serabi Gold	Relatório Técnico NI 43101 (2012)
São Chico ¹	Província Tapajós - PA	----	Au	30,21	0,97	26,91	Serabi Gold	Relatório Técnico NI 43101 (2012)
São Domingos ¹	Província Tapajós - PA	----	Au	4,20	0,14	2,00	Aurora Gold Corp.	Relatório Técnico NI 43101 (2013)
São Jorge ¹	Província Tapajós - PA	----	Au	54,34	1,71	1,32	Brazil Resources Inc.	São Jorge Relatório Técnico NI 43101 (2014)
Tocantinzinho ¹	Província Tapajós - PA	----	Au	79,04	2,49	1,30	Eldorado Gold Corp.	Relatório Técnico - Tocantinzinho Gold Project, Brazil (2011)
Andorinhas ¹	Rio Maria, sul de Carajás - PA	2007-	Au	4,91	0,16	4,70	Troy Resources Ltd.	2014 Relatório Anual Troy Resources Ltd.
São Francisco ¹	Província Borborema - RN	1988-1993; 2001-2005	Au	75,46	2,43	1,10	Crusader Resources	Crusader website: Tabelas de Recursos e Reservas (2014)
Butiá (Lavras do Sul) ¹	Lavras do Sul - RS	----	Au	15,99	0,52	0,83	Amarillo Gold Corp.	Butiá: Relatório Técnico NI 43-101 (2010)
Almas ¹	SE Tocantins - TO	1996-2001	Au	27,31	0,88	0,79	Rio Novo Gold Inc.	Rio Novo PEA (2012)

1 = Apenas recursos minerais, não incluindo dados de produção

2 = Apenas produção mineral acumulada

* = Adquirida pela Yamana em 2016

Através do Sumário Mineral do Departamento Nacional da Produção Mineral-DNPM (LIMA; NEVES, 2014), dados oficiais do governo federal indicam que, em 2013, o Brasil produziu cerca de 79,6 t de ouro, sendo 68 t primário, posicionando-se como o 11º produtor mundial. Os maiores grupos mineradores de ouro no país foram: AngloGold Ashanti, Kinross, Yamana, Beadell, Aura, Jaguar, Luna e Troy. O Estado de Minas Gerais detém a maior produção de ouro primário, com 45,6%, seguido por Goiás (12,3%), Mato Grosso (11%), Pará (11%), Amapá (7,6%), Bahia (7,4%) e Maranhão (3,6%). A produção de garimpos atingiu cerca de 11,6 t no Mato Grosso (47,1%) e Pará (40,19%). A Yamana iniciou em 2013 os projetos Ernesto/Pau-a-Pique (MT), Pilar (GO) e C1-Santa Luz (BA), e a empresa Carpathian o projeto Riacho dos Machados (MG), adquirido pela Yamana em 2016. A Serabi reativou a Mina Palito no PA e a Beadell reativou o projeto Tucano em Pedra Branca do Amapari (AP). A Orinoco está abrindo a nova mina Cascavel, município de Faina em Goiás (GO).

Este trabalho apresenta a distribuição dos principais depósitos de ouro no Brasil, sua produção e reservas, além de discutir sucintamente aspectos da geologia, importância econômica, estratégica e perspectivas futuras. Para tanto, são apresentadas brevemente informações básicas do arcabouço geológico brasileiro e a contextualização dos principais terrenos favoráveis a concentrações de ouro no país. Para a construção da presente revisão, aspectos do trabalho de Thorman et al. (2001) são fundamentais, além das contribuições de Porto et al. (2002), Mendo (2009) e Hagemann (2014).

CONTEXTO TECTÔNICO

Há três unidades cratônicas no Brasil, crátons Amazonas, São Francisco, e Rio de la Plata, sendo os mesmos contornados por orógenos do ciclo orogênico neoproterozoico Brasileiro (900-550 Ma), definidos em quatro pulsos por Brito Neves et al. (2014). Orógenos tardi-mesoproterozoicos (~1,2 Ga) ocorrem no oeste e noroeste do cráton Amazonas (e.g. HASUI, 2012).

Sistemas auríferos no Brasil são encontrados em grande variedade litológica, e em diversas idades, mas a maioria em terrenos do Neoarqueano e Paleoproterozoico, sendo apenas alguns no Neoproterozoico. Contudo, um dos nossos maiores depósitos, e com o menor teor de ouro, é Morro do Ouro, Paracatu-MG (10,34 Moz de Au contido a 0,4 g/t Au; Tabela 1), em filitos carbonosos neoproterozoicos da Faixa Brasília.

Hartmann e Delgado (2001) apresentam um resumo dos ambientes geotectônicos para a formação de sistemas auríferos no Brasil, destacando-se:

1. Cinturões tipo granito-*greenstone* do Arqueano ao Paleoproterozoico, que contêm numerosos depósitos de ouro orogênico, tipo *gold-only*, no sentido de Groves et al. (1998), de pequeno porte (< 10 t Au) a classe mundial (> 100 t Au), como é o caso do *greenstone belt* Rio das Velhas (BALTAZAR; ZUCHETTI, 2007) da província mineral Quadrilátero Ferrífero (QF-MG) (DORR, 1969) (Figura 2).
2. Província mineral Carajás (PA) (Figura 3), onde há sistemas *iron-oxide-copper-gold-IOCG* (como definido por HITZMANN et al., 1992), depósitos tipo *intrusion-related* (no sentido de HART, 2007) de Cu-Au, e a jazida de classe mundial de Au-Pd-Pt Serra Pelada (e.g. GRAINGER et al., 2002).
3. Rochas paleoproterozoicas sedimentares de cobertura, que recobrem *greenstone belts*, e que podem hospedar depósitos de ouro. Incluem metaconglomerados na base de sequências fluviais e de praia como os pequenos depósitos da Formação Moeda (QF). Aqueles da Serra de Jacobina (BA), classicamente entendidos também como do Paleoproterozoico, recentemente foram datados por Teles et al. (2015) como paleoarqueanos. Uma classe especial de depósitos de ouro paladiado, chamada jacutinga, associa-se a formações ferríferas bandadas-FFB do Grupo Itabira, Supergrupo Minas do QF (RENGER et al., 1994), destacando-se Itabira e Gongo Soco.
4. Províncias auríferas Tapajós e Juruaena (PA), onde há sistemas *intrusion-related* auríferos do Paleoproterozoico. Os mesmos relacionam-se à acreção de crosta juvenil, e podem formar-se em rochas plutônicas e vulcânicas sin-orogênicas, pós-orogênicas e anorogênicas (~2,1-1,8 Ga). São de natureza cálcio-alcálica a subalcalina, e incluem sistemas a Au-Cu e epizonais a Au-Ag.
5. Cinturões de empurrão e dobramento do Mesoproterozoico ao Neoproterozoico, que contêm grandes sistemas auríferos orogênicos de baixo teor (< 1 g/t Au), como Morro do Ouro (MG) em filitos carbonosos da Faixa Brasília, entre Paracatu e Brasília.
6. Rochas plutônicas e vulcanossedimentares cálcio-alcálicas do Neoproterozoico, que hospedam depósitos metamorfizados de sulfetos maciços vulcanogênicos (*volcanic-hosted massive sulphide*).

des), de Au-Zn, e sistemas porfíricos a Au-Cu que, localmente, podem ser superimpostos por sistemas auríferos orogênicos. Exemplos são os depósitos do distrito Chapada-Mara Rosa (GO).

7. Bacias tipo *foreland* do fim do Neoproterozoico ao Paleozoico, com pequenos sistemas *stratabound* a venulares de Cu-Au hospedados em rochas sedimentares detríticas, ou rochas vulcânicas e subvulcânicas ácidas alcalinas de ambiente continental, como a antiga mina de cobre de Camaquã (Rio

Grande do Sul-RS) e os pequenos depósitos de Butiá-Lavras do Sul (RS) e Gaspar (Santa Catarina-SC), sul do Brasil (e.g. RENAC et al., 2014, e referências).

8. Rochas de cobertura cenozoica, com enriquecimento supergênico de sistemas auríferos hipogênicos, além de sedimentos recentes que incluem sistemas *placer* de ouro, particularmente na Amazônia, com exemplos em diversos aluviões de tributários dos rios Tapajós, Juruena, Teles Pires, etc.

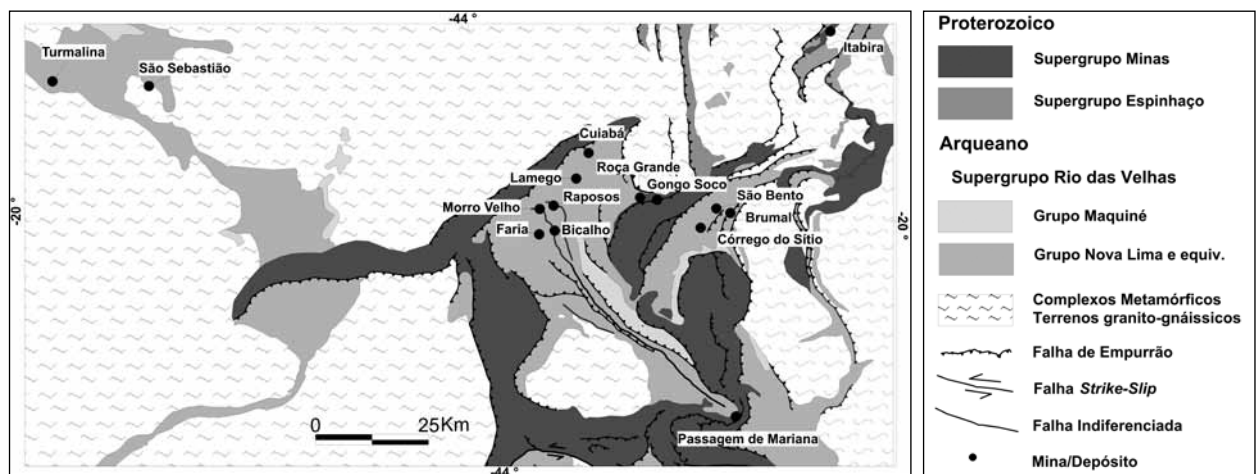


Figura 2 Mapa geológico simplificado da província mineral QF e arredores, com localização dos principais depósitos de ouro mencionados no texto (> 0,1 Moz de ouro). (Fonte: DORR, 1969, modificado).

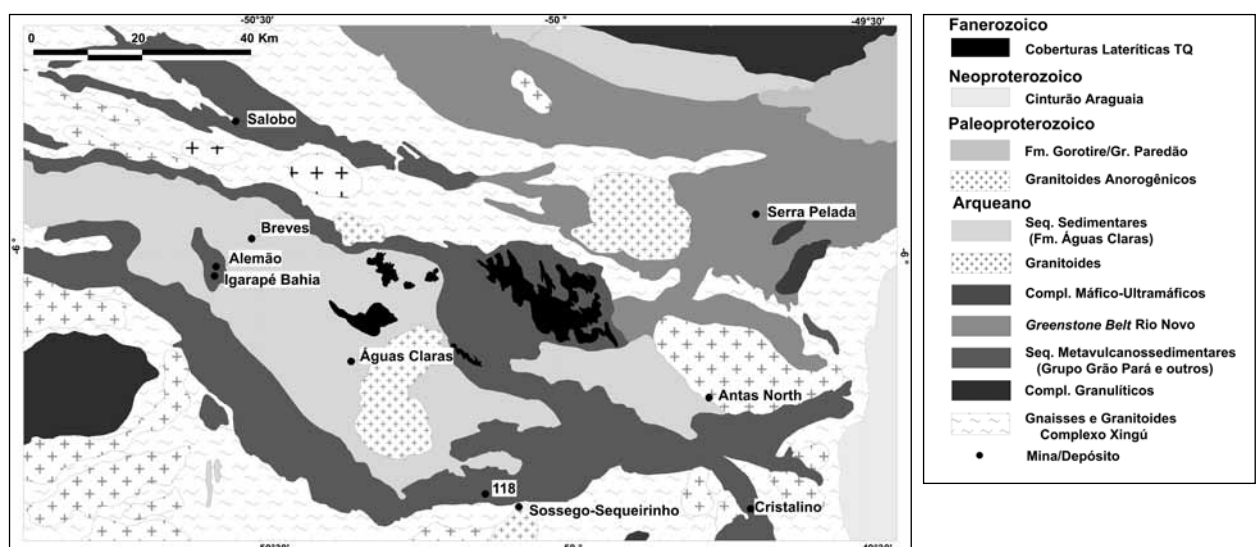


Figura 3 Mapa geológico simplificado da província mineral de Carajás, com a localização dos principais depósitos de ouro mencionados no texto (> 0,1 Moz de ouro). (Fonte: DOCEGEO, 1988, modificado).

PRINCIPAIS DEPÓSITOS DE OURO, PROVÍNCIAS E REGIÕES PRODUTORAS NO BRASIL

A Tabela 1 lista sessenta e dois agrupamentos de depósitos, ou depósitos individuais produtores de > 0,1 Moz de ouro contido, cuja reprodução gráfica acha-se na Figura 4. Os sessenta e dois itens da Tabela 1 estão localizados na Figura 1 e, para os casos do QF e Carajás, os mesmos são detalhados nas Figuras 2 e 3, respectivamente. Muitos acham-se em províncias auríferas de diferentes estados do país, sendo que as maiores são listadas a seguir com seus respectivos depósitos e referências bibliográficas:

1. QF MG (Figura 2) — depósitos orogênicos no *greenstone belt* Rio das Velhas (e.g. LOBATO et al., 2014), incluindo os de classe mundial Morro Velho (VIAL et al., 2007a) e Cuiabá (a maior mina subterrânea do país; e.g. RIBEIRO RODRIGUES et al., 2007); além de Raposos (e.g. JUNQUEIRA et al., 2007), São Bento (e.g. MARTINS PEREIRA et al., 2007), Lamego (e.g. VIAL et al., 2007b; MARTINS et al., 2016), e os do lineamento Córrego do Sítio (e.g. LIMA, 2011; RONCATO et al., 2015). Ainda de importância, cita-se Passagem de Mariana em rochas do Supergrupo Minas (e.g. VIAL et al., 2007b e referências).
 2. Carajás, PA (Figura 3) — sistemas *IOCG* (Cu-Au) Salobo, Alemão-Igarapé Bahia, Sossego-Sequeirinho (e.g. XAVIER et al., 2012; MONTEIRO et al., 2014), com destaque para Salobo (MORETO et al., 2015) com o maior recurso de ouro (Tabela 1); e os tipos polimetálicos (MONTEIRO et al., 2014) incluindo Breves a Cu-Au-W-Bi-Mo-Sn (BOTELHO et al., 2005; GRAINGER et al., 2008); além da jazida de classe mundial de Au-Pd-Pt Serra Pelada, considerada como *unconformity related* por Berni et al. (2014).
 3. Distrito Chapada-Mara Rosa (GO) — depósito Au-Cu Chapada (RICHARDSON et al., 1986; KUYU-MJIAN et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2014).
 4. Crixás (GO) — depósitos orogênicos de *greenstone belts*, em Crixás, incluindo Mina Nova e Mina III, além dos depósitos de Pilar (JOST et al., 2001, 2014); e também a sudoeste de Pilar, no *greenstone belt* Faina do arqueano (e.g. JOST et al., 2014).
 5. Gurupi, Maranhão e Pará — depósitos orogênicos Cachoeira, Gurupi e Aurizona (e.g. KLEIN, 2014).
- Outros depósitos estão em províncias auríferas, ou em cinturões metavulcanossedimentares auríferos, onde apenas um ou mais depósitos contêm > 0,1 Moz Au (Tabela 1, Figura 1):
1. Tucano (AP), onde sequências metavulcanossedimentares paleoproterozoicas hospedam muitos depósitos menores de ouro, tipo orogênicos em FFB (e.g. HORIKAWA, 2008; KLEIN et al., 2014).
 2. Tocantinzinho, Palito, Cuiú-Cuiú, São Jorge, São Chico, São Domingos e Coringa, todos na província Tapajós (PA; e.g. JULIANI et al., 2014), do tipo *intrusion-related* de ouro.
 3. Fazenda Brasileiro (BA; e.g. SILVA et al., 2001, 2014), na sequência metavulcanossedimentar Rio Itapicuru, de idade paleoproterozoica, que é um depósito de ouro orogênico.
 4. Mamão e Lagoa Seca, no terreno granito-*greenstone* Andorinhas no domínio Rio Maria, sul de Carajás (PA), que são depósitos orogênicos hospedados em rochas metavulcânicas (SILVA et al., 2012; MONTEIRO et al., 2014).
 5. Riacho dos Machados, janela estrutural do complexo Porteirinha (MG), em sequência metavulcanossedimentar de idade incerta (e.g. FONSECA et al., 1997; MONTEIRO et al., 2004).
 6. Mato Grosso: depósitos na Faixa Móvel Aguapeí, Nova Xavantina, Cabaçal (MASON; KERR, 2000), Jaurú e Província Juruena-Teles Pires.
- Finalmente, há ainda depósitos individuais em cinturões metamórficos, em alguns casos tipo *greenstone belts*, ou ainda em cinturões móveis do Proterozoico, tais como:
1. Morro do Ouro (MG), que é um sistema orogênico em filitos carbonosos na Faixa Brasília do Neoproterozoico (MG; FREITAS SILVA et al., 1991; OLIVER et al., 2015). Modelo similar é Chapada Cuiabana-Poconé, com veios de ouro em filitos micáceos (e.g. COSTA et al., 2015).
 2. Volta Grande, no *greenstone belt* paleoproterozoico Três Palmeiras (PA), que é um sistema orogênico hospedado em rochas dioríticas (VASQUEZ, 2006; KLEIN et al., 2014).
 3. Jacobina na Serra de Jacobina (BA; e.g. TEIXEIRA et al., 2001; SILVA et al., 2014) e depósitos menores da Formação Moeda (QF, MG; e.g. KOGLIN et al., 2010), que tanto podem ser do tipo *paleoplacer* e/ou orogênico.
 4. Turmalina na região de Onça de Pitangui (MG; e.g. TASSINARI et al., 2014), que é um tipo orogênico.
 5. Jacutingas associadas às FFBs do Grupo Itabira, Supergrupo Minas, QF (e.g. OLIVO et al., 2001; GALBIATTI et al., 2007).

DISCUSSÕES E PERSPECTIVAS

Embora o Brasil mostre grande variedade de sistemas auríferos, indubitavelmente, os depósitos orogênicos dominam tanto no que diz respeito ao número quanto ao conteúdo metálico, sendo a maioria hospedada em sequências metavulcanossedimentares. São formados em níveis mesozonais como Morro Velho (e.g. LOBATO et al., 2001), e vários outros depósitos do QF (Figura 2; vide artigos publicados no *Ore Geology Reviews*, 2007), além de Fazenda Brasileiro (SILVA et al., 2001), Morro do Ouro (FREITAS SILVA et al., 1991; OLIVER et al., 2015), Mina Nova e Mina III (Crixás; JOST et al., 2001, 2014). Embora Jacobina tenha sido considerado como um sistema arqueano *paleoplacer*, como Witwatersrand na África do Sul, Teixeira et al. (2001) e Milesi et al. (2002) sugerem uma origem epigenética, similar aos sistemas do tipo orogênico. Outros sistemas significantes são também os *IOCGs* ricos em ouro (e.g. Salobo, Alemão, Igarapé Bahia) e os *intrusion-related* Cu-Au, com destaque para Breves, todos localizados em Carajás (Figura 3; e.g. XAVIER et al., 2012). O depósito

de ouro Chapada representa um dos raros exemplos de sistema porfirítico metamorfoisado de Au-Cu (e.g. OLIVEIRA et al., 2016).

O acervo geocronológico atual permite identificar ciclos tectônicos no país (quadro 1, de HASUI, 2012) que encerram algumas das mais importantes épocas metalogenéticas auríferas. As mesmas estão relacionadas principalmente ao Neoarqueano, Riáciano, Orosiriano, Estateriano e diferentes eventos do ciclo Brasileiro no Neoproterozoico.

A Figura 1 e a Tabela 1 (Figura 4), construídas com base nos maiores depósitos de ouro do país, revelam que, de fato, a maior parte desses sistemas minerais são do tipo orogênico, em especial em terrenos granito-*greenstone* de idade arqueana ou paleoproterozoica. Contudo, o depósito de classe mundial Morro do Ouro (Grupo Paranoá) aponta não só a importância do Neoproterozoico para o ouro no Brasil, mas também chama atenção para a importância dos folhelhos negros como portadores de ouro conforme aponta Oliver et al. (2015), assunto amplamente discutido por outros autores (e.g. LARGE et al., 2011).

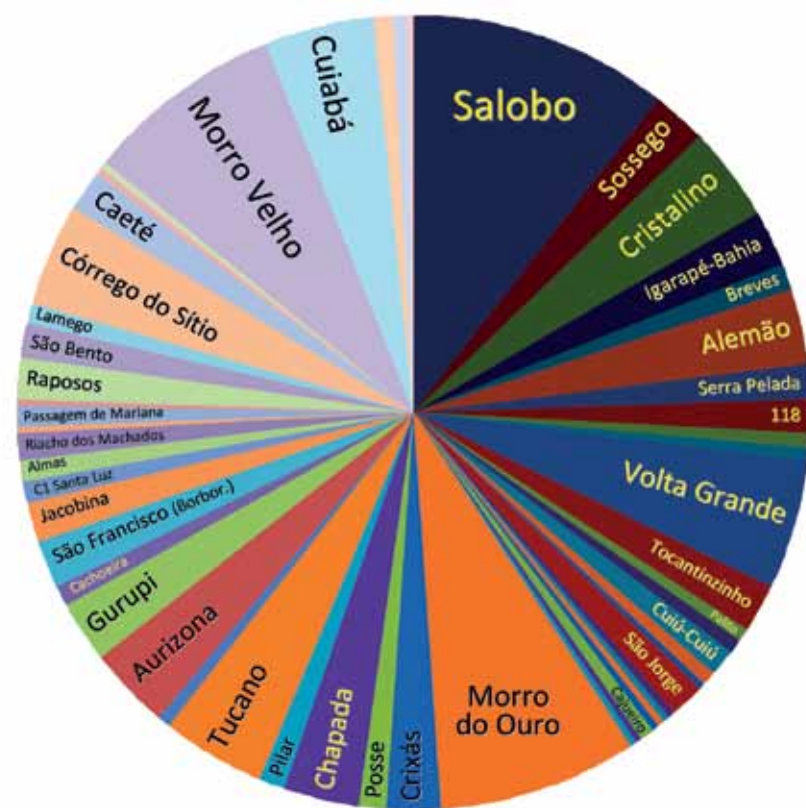


Figura 4 Gráfico de setores que reproduz os sessenta e dois agrupamentos de depósitos, ou depósitos individuais produtores de > 0,1 Moz de ouro contido, listados na Tabela 1, e localizados nos mapas das Figuras 1, 2 e 3 (Fonte: Elaborada pelos autores).

Muitos terrenos do Arqueano, Paleoproterozoico e Neoproterozoico ainda alojam incontáveis depósitos pequenos (< 300.000 oz Au), garimpos e/ou cavas de baixa profundidade, como é o caso das províncias auríferas Tapajós (e.g. JULIANI et al., 2014) e Jurueña (SILVA; ABRAM, 2008). Em vista de forte exploração passada e atual nessas províncias, e da exploração dos depósitos menores ($50.000 - 250.000$ oz Au), é possível que novos grandes depósitos de ouro (> 1 Moz Au) sejam ainda descobertos no futuro próximo.

Em termos potenciais, muitos depósitos de pequeno porte (< 250.000 oz Au), garimpos em minérios primários e secundários (aluvionares), que são ou já foram trabalhados, representam forte evidência de que muito ainda há para se descobrir em termos de mineralizações de ouro. De fato, algumas empresas têm investido em terrenos com potencial promissor, sendo exemplos (i) a província Borborema, onde existem diferentes tipos de jazidas auríferas orogênicas em rochas supracrustais e em granitoides, além de escarnitos auríferos (e.g. ARAÚJO et al., 2005); (ii) o cinturão Dom Feliciano do sul do Brasil, onde o potencial aurífero é atualmente objeto de exploração, com ocorrências de ouro, cobre-ouro, e ouro com outros metais-base descritas por Camozzato et al. (2014).

A distribuição dos principais depósitos de ouro no Brasil (Tabela 1, Figuras 1 a 3) mostra grande concentração nas porções do centro, sudeste e nordeste do país, denotando não só o maior conhecimento geológico dessas regiões, mas também o maior investimento, infraestrutura e o melhor acesso às áreas. Com a constante evolução e acúmulo de conhecimento geológico, através de mapeamentos geológicos básicos e levantamentos aerogeofísicos de órgãos governamentais e de empresas de mineração, muitas dessas áreas já trabalhadas vêm sendo viabilizadas. Isso aponta para um potencial crescente, em especial em áreas relativamente pouco conhecidas da Província Carajás, Tapajós e em partes de Mato Grosso, além do Maranhão, o mesmo ocorrendo em regiões de conhecimento mais avançado, tais como o QE, como é o caso dos depósitos do lineamento Córrego do Sítio (e.g. LIMA, 2012).

REFERÊNCIAS

- ANGLOGOLD ASHANTI. *Mineração de Ouro*. Disponível em: <<http://www.anglogoldashanti.com.br/>>. Acesso em 16 de setembro de 2015.
- ARAÚJO, M.N.C.; VASCONCELOS, P.M.; SILVA, F.C.A.; JARDIM de SÁ, E.F.; SÁ, J.M. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of gold mineralization in Brasiliano strike-slip shear zones in the Borborema province, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 19, p. 445-460. 2005.
- BENSUNSAN, A.J. Compilação de antigos Relatórios (Annual Reports), mapas e documentos datados de 1865 a 1898 referentes a “Don Pedro North del Rey Gold Mining Company, Limited”. Inédito. 1908.
- BERNI, G.V.; HEINRICH, C.A.; LOBATO, L.M.; WALL, V.J.; ROSIÈRE, C.A.; FREITAS, M.A. The Serra Pelada Au-Pd-Pt deposit, Carajás, Brazil: geochemistry, mineralogy and zoning of hydrothermal alteration. *Economic Geology*, v. 109, p. 1883-1899. 2014.
- BOTELHO, N.F.; MOURA, M.A.; TEIXEIRA, L.M.; OLIVO, G.R.; CUNHA, L.M.; SANTANA, M.U. Caracterização geológica e metalogenética do depósito de Cu $\pm$ (Au, W, Mo, Sn) Breves, Carajás. In: MARINI, O.J.; QUEIROZ, E.T.; RAMOS, B.W. (Eds.), *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM)/Fundo Setorial Mineral (CT-Mineral/FINEP)/Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira (ADIMB), Capítulo VI, p. 335-390. 2005.
- BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A.; PIMENTEL, M.M. The Brasiliano collage in South America: a review. *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, n. 3, p. 493-518. 2014.
- COSTA, B.S.; SILVA, C.H.; COSTA, A.C.D. Caracterização estrutural do domínio interno da Faixa Paraguai na região de cangas, porção centro-sul do Estado de Mato Grosso. *Brazilian Journal of Geology*, v. 45, n. 1, p. 35-49. 2015.
- CAMOZZATO, E.; TONIOLO, J.A.; LAUX, J.H. Metalogênese do Cinturão Dom Feliciano e fragmentos paleocontinentais associados (RS/SC). In: SILVA, M.G.; ROCHA NETO, M.B.; JOST, H.; KUYUMJIAN, R.M. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Belo Horizonte, p. 517-556. 2014.
- DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: *Anexo dos Anais*, SBG, 35º Congresso Brasileiro de Geologia, Belém, PA, Província Mineral de Carajás - Litoestratigrafia e principais depósitos minerais, 165 p. 1988.
- DORR, J.V.N. *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. United States Geological Survey, Professional Paper 641-A, p. 115. 1969.
- DNPM. *Publicações*. Disponível em: <www.dnpm.gov.br/>. Acesso em 16 de setembro de 2015.
- ELDORADO GOLD. *Assets - South America*. Disponível em: <<http://www.eldoradogold.com/>>. Acesso em 16 de setembro de 2015.
- FERRAND, P. L'Or a Minas Geraes (Brésil). Étude publiée par les soins de la commission de l'Exposition Préparatoire de L'Etat de Minas Geraes, a Ouro Preto à l'occasion de l'Exposition Minière et Métallurgique de Santiago (Chile) en 1894. *Imprensa Oficial do Estado de Minas Geraes*, Belo Horizonte, v. I, 171 p., 1913.
- FONSECA, E.; LOBATO, L.M.; BAARS, F.J. The petrochemistry of the auriferous, volcano-sedimentary Riacho dos Machados Group, central-eastern Brazil: Geotectonic implications for shear-hosted gold mineralization. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 10, p. 423-443. 1997.
- FREITAS SILVA, F.H.; DARDENNE, M.A.; JOST, H. Lithostructural control of the Morro do Ouro gold deposit, Paracatu, Minas Gerais. In: LADEIRA, E.A. (Ed.), *Brazil Gold'91*, Balkema, p. 681-683. 1991.
- GALBIATTI, H.F.; FONSECA, M.A.; PEREIRA, M.C.; POLÔNIA J.C. Structural control of Au-Pd mineralization (Jacutinga): An example from the Cauê Mine, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 614-628. 2007.
- GRAINGER, C.J.; GROVES, D.I.; COSTA, C.H.C. The epigenetic sediment hosted Serra Pelada Au-PGE deposit and its potential genetic association with Fe-oxide Cu-Au mineralization within the Carajás mineral province, Amazon craton, Brazil: *Society of Economic Geologists Special Publication*, v. 9, p. 47-64. 2002.
- GRAINGER, C.J.; GROVES, D.I.; TALLARICO, F.H.B.; FLETCHER, I.R. Metallogenesis of the Carajás Mineral Province, Southern Amazon Craton, Brazil: Varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base- and precious-metal mineralisation. *Ore Geology Reviews*, v. 33, p. 451-489. 2008.
- GROVES, D.I.; GOLDFARB, R.J.; GEBRE-MARIAM, M.; HAGEMANN, S.G.; ROBERT, F. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, v. 13, p. 7-27. 1998.
- HAGEMANN, S.G. Gold in Brazil. In: Gold 14@Kalgoorlie, *International Symposium*, Curtin University, Kalgoorlie, Western Australia, Res. Exp. 2014.
- HART, C.J.R. Reduced intrusion-related gold systems. In: GOODFELLOW, W.D. (Ed.). *Mineral deposits of Canada: A Synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, n. 5, p.95-112. 2007.
- HARTMANN, L.A.; DELGADO, I.M. Cratons and orogenic belts of the Brazilian shield and their contained gold deposits. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 207-217. 2001.
- HASUI, Y. Compartimentação geológica do Brasil. In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C. DAL RE; ALMEIDA, F.F.M.; BARTORELLI, A. (Orgs.). *Geologia do Brasil*. Beca, São Paulo, p. 112-130. 2012.
- HITZMANN, M.W.; ORESKES, N.; EINAUDI, M.T. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, v. 58, p. 241-288. 1992.
- HORIKAWA, E.H. *Assinatura geoquímica de solo da região do depósito de ouro do Amapari, Amapá, e implicações metalogenéticas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geologia, Belo Horizonte. 2008.
- JAGUAR MINING. *Overview*. Disponível em: <<http://www.jaguarmining.com/>>. Acesso em 16 de setembro de 2015.

- JOST, H.; FORTES, P.T.F.O. Gold deposits and occurrences of the Crixás goldfields, central Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 358-376. 2007.
- JOST, H.; CARVALHO, M.J.; GOMES, V.; RODRIGUES, V.G.; MARTINS, R. Metalogênese dos greenstones belts de Goiás. In: SILVA, M.G.; ROCHA NETO, M.B.; JOST, H.; KUYUMJIAN, R.M. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Belo Horizonte, p. 141-168. 2014.
- JUNQUEIRA, P.A.; LOBATO, L.M.; LADEIRA, E.A.; SIMÕES, E.J.M. Structural control and hydrothermal alteration at the BIF-hosted Raposos lode-gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 629-650. 2007.
- JULIANI, C.; VASQUEZ, M.L.; KLEIN, E.L.; VILLAS, R.N.N.; MISAS, C.M.E.; SANTIAGO, E.S.B.; MONTEIRO, L.V.S.; CARNEIRO, C.C.; FERNANDES, C.M.D.; USRO, G. Metalogênese da Província Tapajós. In: SILVA, M.G.; ROCHA NETO, M.B.; JOST, H.; KUYUMJIAN, R.M. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Belo Horizonte, p. 229-268. 2014.
- KINROSS. *Conheça a Kinross*. Disponível em: <<http://www.kinross.com/>>. Acesso em 16 de setembro de 2015.
- KLEIN, E.L. Metalogênese do cráton São Luis e do cinturão Gurupi. In: SILVA, M.G.; ROCHA NETO, M.B.; JOST, H.; KUYUMJIAN, R.M. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Belo Horizonte, p. 195-214. 2014.
- KLEIN, E.L.; ROSA COSTA, L.T.; VASQUEZ, M.L. Metalogênese da borda oriental do Cráton Amazônico. In: SILVA, M.G.; ROCHA NETO, M.B.; JOST, H.; KUYUMJIAN, R.M. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Belo Horizonte, p. 171-194. 2014.
- KOGLIN, N.; FRIMMEL, H.E.; MINTER, W.E.L.; BRÄTZ, H. Trace-element characteristics of different pyrite types in Mesoarchean to Paleoproterozoic placer deposits. *Mineralium Deposita*, v. 45, p. 259-280. 2010.
- KUYUMJIAN, R.M.; OLIVEIRA, C.G.; OLIVEIRA, F.B.; BORGES, C.E.P. Depósito de cobre-ouro porfírico Chapada, Goiás. In: BRITO, R.S.C.; SILVA, M.G.; KUYUMJIAN, R.M. (Eds.). *Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao Intemperismo*. Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Brasília, p. 49-69. 2010.
- LARGE, R.R.; BULL, S.; MASLENNIKOV, V.V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Economic Geology*, v.106, p. 331-358. 2009.
- LIMA, L.C. *Depósito lode Au-As-Sb Laranjeiras, em metatúbitos do Grupo Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geologia, Belo Horizonte. 2011.
- LIMA, M.L.; NEVES, C.A.R. (Coords.). *Sumário Mineral-2014*, Departamento Nacional de Pesquisa Mineral, Ministério de Minas e Energia, Brasília, Distrito Federal, 152 p. 2014.
- LOBATO, L.M.; RIBEIRO-RODRIGUES, L.C.; VIEIRA, F.W.R. Brazil's premier gold province. Part II: geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 249-277. 2001.
- LOBATO, L.M.; RENGGER, F.E.; FIGUEIREDO E SILVA, R.C.; ROSIÈRE, C.A.; BAARS, F.J.; ROLIM, V.K. Metalogênese do setor meridional do Cráton São Francisco. In: SILVA, M.G.; ROCHA NETO, M.B.; JOST, H.; KUYUMJIAN, R.M. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Belo Horizonte, p.119-140. 2014.
- MARTINS, B.S.; LOBATO, L.M.; ROSIÈRE, C.A.; HAGEMANN, S.G.; FIGUEIREDO E SILVA, R.C.; VILLANOVA, F.L.S.P.; LEMOS, L.H.A. The Archean BIF-hosted Lamego gold deposit, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero: Evidence for Cambrian structural modification of an Archean orogenic gold deposit. *Ore Geology Reviews*, v. 72, p. 963-988. 2016.
- MARTINS PEREIRA, S.L.; LOBATO, L.M.; FERREIRA, J.E.; JARDIM, E.C. Nature and origin of the BIF-hosted São Bento gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil, with special emphasis on structural controls. *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 571-595. 2007.
- MASON, R.; KERR, D. *Cabaçal 1 Mine* – Mato Grosso state, Brazil. Definition of ore zones and potential for new ore reserves. On behalf of Mineração Santa Martha (private report). Rio de Janeiro, Brazil.1990.
- MILESI, J.P.; LEDRU, P.; MARCOUX, E.; MOUGEOT, R.; JOHAN, V.; LEROUGE, C.; SABATÉ, P.; BAILLY, L.; RESPAUT, J.P.; SKIPWITH, P. The Jacobina Paleoproterozoic gold-bearing conglomerates, Bahia, Brazil: a “hydrothermal shear-reservoir” model. *Ore Geology Reviews*, v. 19, p. 95-136. 2002.
- MENDO, J. Perfil do Ouro. Ministério de Minas e Energia-MME, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral-SGM. *Relatório Técnico* 28. 2009.
- MONTEIRO, L.V.S.; XAVIER, R.P.; SOUZA FILHO, C.R.; MORETO, C.P.N. Metalogênese da Província Carajás. In: SILVA, M.G.; ROCHA NETO, M.B.; JOST, H.; KUYUMJIAN, R.M. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Belo Horizonte, p. 43-92. 2014.
- MONTEIRO, R.N.; FYFE, W.S.; CHEMALE, JR., F. The impact of the linkage between grade distribution and petrofabric on the understanding of structurally controlled mineral deposits: Ouro Fino gold mine, Brazil. *Journal of Structural Geology*, v. 26, p. 1195-1214. 2004.
- MORETO, C.P.N.; MONTEIRO, L.V.S.; XAVIER, R.P.; CREASER, R.A.; DUFRANE, S.A.; TASSINARI, C.C.G.; SATO, K.; KEMP, A.I.S.; AMARAL, W.S. Neoproterozoic and Paleoproterozoic iron oxide-copper-gold events at the Sossego deposit, Carajás Province, Brazil: Re-Os and U-Pb geochronological evidence. *Economic Geology*, v. 110, p. 809-835. 2015.
- OLIVEIRA, C.G.; KUYUMJIAN, R.M.; OLIVEIRA, F.B.; MARQUES, G.C.; PALERMO, N.; DANTAS, E.L. Metalogênese do Arco Magmático Goiás. In: SILVA, M.G.; ROCHA NETO, M.B.; JOST, H.; KUYUMJIAN, R.M. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Belo Horizonte, p. 455-466. 2014.

- OLIVEIRA, C.G.; OLIVEIRA, F.B.; GIUSTINA, M.E.S.; MARQUES, G.C.; DANTAS, E.L.; PIMENTEL, M.M.; BUHN, B.M. The Chapada Cu-Au deposit, Mara Rosa magmatic arc, Central Brazil: Constraints on the metallogenesis of a Neoproterozoic large porphyry-type deposit. *Ore Geology Reviews*, v. 72, p. 1-21. 2016.
- OLIVER, N.H.S.; THOMSON, B.; FREITAS-SILVA, F.H.; HOLCOMBE, R.J.; RUSK, B.; ALMEIDA, B.S.; FAURE, K.; DAVIDSON, G.R.; ESPER, E.L.; GUIMARÃES, P.J.; DARDENNE, M.A. Local and regional mass transfer during thrusting, veining, and boudinage in the genesis of the giant shale-hosted Paracatu Gold Deposit, Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, v. 110, p. 1803-1834. 2015.
- OLIVO, G.R.; GAUTHIER, M.; WILLIAMS-JONES, A.E.; LEVESQUE, M. The Au-Pd mineralization at the Conceição iron mine, Itabira district, southern São Francisco craton, Brazil: an example of a jacutinga-type deposit. *Economic Geology*, v. 96, p. 61-74. 2001.
- PORTO, C.G.; PALERMO, N.; PIRES, F.R.M. Panorama da Exploração e Produção do Ouro no Brasil. In: TRINDADE, R.B.E.; BARBOSA FILHO, O. (Eds.). *Extração de Ouro - Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente*. CETEM, Rio de Janeiro, p.1-22. 2002.
- RENAC, C.; MEXIAS, A.S.; GOMES, M.E.B.; RONCHI, L.H.; NARDI, L.V.S.; LAUX, J.H. Isotopic fluid changes in a Neoproterozoic porphyry-epithermal system: The Uruguay mine, southern Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 60, p. 146-160. 2014.
- RENGER, F.E.; NOCE, C.M.; ROMANO, A.W.; MACHADO, N. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Geonomos*, v. 2, p. 1-11. 1994.
- RIBEIRO RODRIGUES, L.C.; OLIVEIRA, C.G.; FRIEDRICH, G. The Archean BIF-hosted Cuiabá Gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 543-570. 2007.
- RICHARDSON, S.V.; KESLER, S.E.; ESSENE, E.J.; JONES, L.M. Origin and geochemistry of the Chapada Cu-Au deposit, Goiás, Brazil: a metamorphosed wall-rock porphyry copper deposit. *Economic Geology*, v. 81, p. 1884-1898. 1986.
- RONCATO JR., J.G.; LOBATO, L.M.; LIMA, L.C.; PORTO, C.G.; FIGUEIREDO E SILVA, R.C. Metatubidite-hosted gold deposits, Córrego do Sítio Lineament, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 45, p. 5-22. 2015.
- RONZÊ, P.C.; SOARES, A.D.V.; GIOVANNI, S.; BARREIRA, C.F. Alemão copper-gold (U-REE) deposit, Carajás, Brazil. In: PORTER, T.M. (Ed.). *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*. Australian Mineral Foundation, Adelaide, p. 191-202. 2000.
- SILVA, M.G.; ABRAM, M.B. (Orgs.). *Metalogenia da província aurífera Jurruena-Teles Pires, Mato Grosso*. Informe de Recursos Minerais, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Brasília, Série Ouro 16, 2008.
- SILVA, M.G.; COELHO, C.E.S.; TEIXEIRA, J.B.G.; DA SILVA, E.C.A.; SILVA R.A.; SOUZA, J.A.B. The Rio Itapicuru greenstone belt, Bahia, Brazil: geologic evolution and review of gold mineralization. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 345-357. 2001.
- SILVA, E.C.; SILVA, A.M.; TOLEDO, C.L.B.; MOL, A.G.; OTTERMAN, D.W.; SOUZA, S.R.C. Mineral potential mapping for orogenic gold deposits in the Rio Maria granite greenstone terrane, southeastern Pará State, Brazil. *Economic Geology*, v. 107, p. 1387-1402. 2012.
- SILVA, M.G.; TEIXEIRA, J.B.G.; MISI, A.; CRUZ, S.C.P.; SILVA SÁ, J.H. Metalogênese do setor setentrional do Cráton São Francisco. In: SILVA, M.G.; ROCHA NETO, M.B.; JOST, H.; KUYUMJIAN, R.M. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Belo Horizonte, p. 93-118. 2014.
- TASSINARI, C.C.G.; MATEUS, A.M.; VELÁSQUEZ, M.E.; MUNHÁ, J.M.U.; LOBATO, L.M.; BELLO, R.M.; CHIQUINI, A.P.; CAMPOS, W.F. Geochronology and thermochronology of gold mineralization in the Turmalina deposit, NE of the Quadrilátero Ferrífero Region, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 67, p. 368-381. 2015.
- TEIXEIRA, J.B.G.; SOUZA, J.A.B.; DA SILVA, M. da G.; LEITE, C.M.M.; BARBOSA, J.S.F.; COELHO, C.E.S.; ABRAM, M.B.; FILHO, V.M.C.; IYER, S.S.S. Gold mineralization in the Serra de Jacobina region, Bahia Brazil: tectonic framework and metallogenesis. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 332-344. 2007.
- TELES, G.S.; CHEMALE JR., F.; OLIVEIRA, C.G. Paleoproterozoic record of the detrital pyrite-bearing, Jacobina Au-U deposits, Bahia, Brazil. *Precambrian Research*, v. 256, p. 289-313. 2015.
- THORMAN, C.H.; DEWITT, E.; MARCOS, A.C.; MARON, E.; LADEIRA, E.A. Major Brazilian gold deposits – 1982 to 1999. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 218-227. 2001.
- TROY RESOURCES. *Andorinhas*. Disponível em: <<http://troyres.com.br/operations/brazil>>. Acesso em 16 de setembro de 2015.
- VIAL, D.S.; ABREU, G.; SCHUBERT, G.; RIBEIRO RODRIGUES, L.C. Smaller gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 651-673. 2007b.
- VIAL, D.S.; DEWITT, E.; LOBATO, L.M.; THORMAN, C. The geology of the Morro Velho gold deposit in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 511-542. 2007a.
- VIAL, D.S.; GROVES, D.I.; COOK, N.J.; LOBATO, L.M. (Eds.). Special issue on gold deposits of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 32, n. 3-4, p. 469-688. 2007.
- XAVIER, R.P.; MONTEIRO, L.V.S.; MORETO, C.P.N.; PESTILHO, A.L.S.; MELO, G.H.C.; SILVA, M.A.D.; AIRES, B.; RIBEIRO, C.; FREITAS, F.H. The iron oxide copper-gold systems of the Carajás Mineral Province, Brazil. Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world: a tribute to Richard Sillitoe. In: HEDENQUIST, J.W.; HARRIS, M.; CAMUS, F. (Eds.). *Special Publication of the Society of Economic Geologists*, v. 16, p. 433-453. 2012.
- YAMANA GOLD. *Our Portfolio*. Disponível em: <<http://www.yamana.com/English/portfolio/producing-mines/default.aspx>>. Acesso em 16 de setembro de 2015.
- VASQUEZ, M.L. *Geocronologia em zircão, monazita e granada e isótopos de Nd das associações litológicas da porção oeste do domínio Bacajá: evolução crustal da porção meridional da Província Maroni-Itacaiúns – sudeste do cráton Amazônico*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém. 2006.

Nióbio – desenvolvimento tecnológico e liderança

Tadeu Carneiro

Presidente, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM)

RESUMO

O nióbio não é um elemento raro. Mais de quinhentos carbonatitos foram identificados no mundo, sendo 58 deles com dados publicados na literatura mostrando os recursos de nióbio que contêm. A importância estratégica no caso do nióbio está associada ao desenvolvimento tecnológico associado a ele e desenvolvido pela CBMM – Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração ao longo de seis décadas. O programa da CBMM criou produtos de nióbio e o mercado de aplicações para o consumo dos mesmos. Esse programa é reconhecido como o melhor exemplo de sucesso de uma política de agregação de valor a produto mineral em qualquer país exportador em que o mercado interno não confere economia de escala. O nióbio é um metal utilizado, na sua grande maioria, pela siderurgia. Nos aços microligados em que é principalmente usado, o nióbio confere maior resistência mecânica com simultâneo aumento de tenacidade, graças ao refino de grão que o nióbio proporciona a esses aços quando de seu processamento termomecânico durante o processo de laminação.

Palavras-chave Nióbio. Carbonatito. Bario-pirocloro. Columbita-tantalita. Aços microligados. Superligas. Ferronióbio. Óxido de nióbio. Niquelnióbio. Siderurgia. Flotação. Pirometalurgia. Forno de feixe de elétrons. Catálise.

NIÓBIO

Apesar de ser um dos cinco metais refratários, ao lado de tungstênio, tântalo, molibdênio e háfnio, o elemento de número atômico 41 da tabela periódica é principalmente utilizado (mais de 90% de sua utilização) como elemento de liga em aços. Quando puro, é um metal refratário dútil e de aparência cinza prateada. Possui estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, ponto de fusão igual a 2.468°C e densidade de 8.66 g/cm³. O nióbio é obtido principalmente do mineral pirocloro, mas também é encontrado no mineral columbita usualmente associado à tantalita.

Foi descoberto em 1801 pelo químico britânico Charles Hatchett como resultado da análise de uma rocha do museu britânico. Como a amostra era proveniente do Estado de Connecticut, nos Estados Unidos, deu o nome de Columbita ao mineral e de Colúmbio ao novo elemento em homenagem descobridor das Américas, Cristóvão Colombo. Em 1844, o químico alemão Heinrich Rose imaginou ter descoberto um novo elemento ao analisar uma tantalita (mineral de onde se obtém o tântalo e que havia sido descoberto em 1802) e o batizou de nióbio, já que Níobe era a filha do rei Tântalo na mitologia grega. Em 1951, o nome oficial do elemento passou a ser nióbio por decisão da *International Union of Pure and Applied Chemistry*.

GEOLOGIA E ABUNDÂNCIA

Os carbonatitos são as principais rochas contendo os depósitos minerais enriquecidos em nióbio. Carbonatitos são definidos como rochas ígneas contendo

mais de 50% de minerais carbonáticos. São comuns em complexos de origem magmática associados com rochas alcalinas.

Segundo Woolley e Kjarsgaard (2008) existem 527 carbonatitos já identificados no mundo, sendo 21 destes localizados no Brasil. Berger, Singer e Orris (2009) apresentam resultados dos 58 principais depósitos carbonatíticos com dados publicados na literatura e que já foram caracterizados com relação aos recursos de nióbio que contêm. Poucos já foram explorados ou tiveram seus recursos quantificados e estudados de modo a se tornarem reservas de fato. Assim sendo, o nióbio não é um elemento raro no mundo.

As reservas de nióbio de Araxá (MG) somam 829 milhões de toneladas de minério intemperizado com teor médio de 2,40% Nb₂O₅. Estima-se que os recursos de nióbio na rocha são sob o minério intemperizado de Araxá (MG) sejam de, aproximadamente, 900 milhões de toneladas com teor médio de 1,5% Nb₂O₅. Essas reservas conhecidas e dimensionadas (principalmente as da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração – CBMM) fazem parecer que o nióbio é principalmente encontrado no Brasil. Contudo, essa é uma distorção da realidade, ocasionada pelo fato de não se ter estudado a fundo as centenas de carbonatitos conhecidos e identificados ao redor do planeta.

Mesmo no Brasil, os recursos de nióbio estimados para o carbonatito de Seis Lagos, em São Gabriel da Cachoeira, no Estado do Amazonas, são considerados um dos maiores do mundo, com estimativa de 2.9Gt de minério (JUSTO; SOUZA, 1986) e, portanto, maior do que a própria reserva da CBMM em Araxá, que, por sua vez, é a maior reserva de nióbio em exploração do mundo. Contudo, sabe-se que o nióbio de Seis Lagos,

cujo direito mineral pertence à CPRM, é um rutilo-niobífero e se encontra na forma de, pelo menos, oito diferentes niobatos complexos, não sendo certo qual deles é o de maior concentração. Além disso, não existe tecnologia conhecida para o aproveitamento de qualquer um dos niobatos dessa ocorrência mineral.

Até o início dos anos 60, o nióbio provinha da columbita dos pegmatitos. A partir da exploração dos depósitos de pirocloro no Canadá e no Brasil, o nióbio passou a ser obtido deste mineral presente nos carbonatitos. Ainda hoje, o nióbio é obtido como subproduto da obtenção do tântalo a partir de minérios de columbita-tantalita, mas esta fonte representa fração menor do que 3% de todo o suprimento de nióbio.

O nióbio ocorre na natureza em diversos minerais destacando-se, pelo aspecto econômico, o Bariopirocloro $(\text{Ba,Sr})_2(\text{Nb,Ti})_2(\text{O,OH})_7$ presente no minério do carbonatito de Araxá, explorado pela CBMM, o Pirocloro $(\text{Na,Ca})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH,F})$ presente no minério explorado em Quebec, no Canadá, pela IAMGOLD, a Columbita-tantalita $(\text{Fe,Mn})(\text{Nb,Ta})_2\text{O}_6$ do minério de estanho e tântalo da Mineração Taboca, controlada pela peruana Minsur, e a Loparita $(\text{Ce,Na,Ca})_2(\text{Ti,Nb})_2\text{O}_6$ presente no minério russo da península de Kola.

Diante da abundância de recursos de nióbio no mundo todo, a importância estratégica dos recursos brasileiros de nióbio é reduzida. A importância estratégica, se existente no caso do nióbio, está associada ao desenvolvimento tecnológico associado a ele. O exemplo de desenvolvimento tecnológico do metal e suas aplicações ao longo de quase seis décadas pela CBMM pode ser usado como referência para o desenvolvimento de outros bens minerais presentes no país.

Assim, o nióbio já foi detectado em ocorrências nos Estados Unidos, Canadá, Rússia, Austrália, Angola, Arábia Saudita, Groenlândia, Egito, Uganda, República Democrática do Congo, Finlândia, Tanzânia, Nigéria, Gabão, Quênia, Malawi, Moçambique, Ruanda, Namíbia, Zimbábue, Tailândia, Etiópia, Guiana Francesa, Cazaquistão, Bolívia, Paraguai e Afeganistão. Em vários destes países existem múltiplas ocorrências já detectadas, como é o caso dos Estados Unidos, com ocorrências no Alasca, Arizona e Nebraska.

Publicações recentes na literatura dão conta de desenvolvimentos em minas de nióbio dos Estados Unidos (Niocorp, Elk Creek no Nebraska), Quênia (Pacific Wildcat, Mrimba Hills), Rússia (Grupo ICT, Tomtor), Gabão (Eramet, Mabounie), Malawi (Globe Metals, Kanyika), Canadá (Taseko Mining, Aley; Commerce Resources, Blue River), Austrália (Alkane, Dubbo). Estes são alguns dos exemplos publicados recentemente na literatura especializada e apresentados por país (companhia

controladora, nome do projeto) como potenciais novos fornecedores de nióbio a partir de 2016-2017.

UMA HISTÓRIA DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO

Embora o nióbio tenha sido descoberto há mais de duzentos anos, foi somente nas últimas cinco décadas que se tornou importante como solução tecnológica a partir do desenvolvimento dos aços microligados.

O Brasil é líder mundial em todos os aspectos relacionados à indústria do nióbio. Essa liderança é resultado do programa da CBMM, que, desde a sua fundação em 1955, comprometeu-se com o desenvolvimento tecnológico aplicado aos seus processos de fabricação, ao desenvolvimento de produtos de nióbio de maior valor agregado e ao desenvolvimento tecnológico associado aos usos finais do nióbio. O programa da CBMM criou produtos de nióbio e o mercado de aplicações para o consumo dos mesmos.

O programa da CBMM é reconhecido como o melhor exemplo de sucesso de uma política de agregação de valor a produto mineral em qualquer país exportador em que o mercado interno não confere economia de escala. De fato, hoje não sai de Araxá qualquer quantidade de minério bruto de nióbio, mas somente produtos de nióbio acabados e de elevado valor agregado. A CBMM é o único fornecedor de todos os produtos de nióbio para qualquer das aplicações finais do elemento. Seja o ferronióbio para a siderurgia, as ligas a vácuo para a fabricação de superligas, os óxidos e compostos especiais de nióbio, ou o nióbio metálico. As pesquisas tecnológicas simultâneas na área de aplicações finais do nióbio e na área de mineração e processamento mineral e metalúrgico em Araxá foram fundamentais para o atingimento dessa liderança do Brasil com relação ao nióbio.

O nióbio é um metal utilizado na sua grande maioria pela siderurgia. Mais de 90% do nióbio produzido no mundo é consumido na fabricação de aços na forma da liga ferronióbio que contém cerca de 66% de nióbio. A classe de aços microligados ao nióbio representa seu principal uso. Nestes aços, o nióbio é adicionado na proporção de algumas centenas de gramas por tonelada de aço. Essa adição de nióbio confere ao aço maior resistência mecânica com simultâneo aumento de tenacidade, graças ao refino de grão que o nióbio proporciona a esses aços quando de seu processamento termomecânico durante o processo de laminação.

A pesquisa fundamental que resultou no desenvolvimento dos aços microligados ao nióbio aconteceu

na Inglaterra, no final dos anos 50 e início dos anos 60, especialmente na Universidade de Sheffield (com J. H. Woodhead, W. B. Morrison e J. M. Gray), nos Laboratórios Swinden (com K. J. Irvine, T. Gladman e F. B. Pickering) e nos laboratórios da *British Iron and Steel Research Association* (com J. J. Irani e W. E. Duckworth).

A primeira corrida de aço em escala industrial foi feita pela *U.S. Steel* em sua planta de Homestead, em Pittsburgh, Pensilvânia, sob a orientação de Bill Wilson. Nessa ocasião, um dos pioneiros do desenvolvimento tecnológico em Sheffield (J. M. Gray) transferiu-se para a *U.S. Steel* e acelerou o desenvolvimento comercial dos aços microligados ao nióbio nos Estados Unidos. Esse desenvolvimento continuou, simultaneamente, na siderúrgica de Great Lakes da *National Steel*, também em Pittsburgh, sob a orientação de Norman Tisdale, que produziu placas em laminador de tiras a quente, usadas pela primeira vez em um gasoduto sob a orientação Jerry Barko. O resultado obtido foi tão superior que a solução tecnológica foi adotada muito rapidamente pela indústria de transporte de óleo e gás. A crise do petróleo de 1973 ajudou a intensificar o desenvolvimento de aços mais avançados para o transporte mais seguro e mais eficiente de óleo e gás. Dessa maneira, nos anos 60, 70 e boa parte dos anos 80, o principal usuário final do nióbio foi a indústria do transporte de gás.

Enquanto isso, em Araxá (MG), continuados esforços de desenvolvimento tecnológico fizeram com que a mina de nióbio descoberta em 1953 pudesse ter seu minério transformado em produtos industrializados de nióbio para que pudesse ser adicionado à composição dos aços microligados. O espírito pioneiro de desenvolvimento do processo tecnológico, sem a existência prévia de um mercado para o nióbio à época, fez com que o nióbio estivesse disponível para ser usado pela indústria siderúrgica mundial dos países desenvolvidos em quantidades irrestritas a partir do início dos anos 60.

A partir dos anos 70, a CBMM iniciou seu programa de abrangência mundial para o desenvolvimento de aplicações do nióbio. Esse programa de desenvolvimento de tecnologia de aplicação final para o nióbio começou nos Estados Unidos em 1972 e se estendeu com a formação de escritórios técnicos na Alemanha e no Japão em anos subsequentes. A CBMM estabeleceu programas de pesquisa e desenvolvimento nas principais universidades do Brasil e do mundo e, com isso, adquiriu legitimidade tecnológica para propor soluções envolvendo a aplicação do nióbio para seus clientes e usuários finais especialmente nas aplicações da siderurgia.

As soluções tecnológicas envolvendo o nióbio ajudam a solucionar os principais desafios do mundo moderno por meio da otimização de recursos naturais, da obtenção de maiores eficiências energéticas e de menores impactos ambientais.

PRINCIPAIS MECANISMOS DE ATUAÇÃO DO NIÓBIO NOS AÇOS E SUPERLIGAS

A literatura científica sobre a influência do nióbio como elemento de liga nos aços e em outras ligas metálicas é extensa (CBMM, 1984, 2002, 2004, 2006, 2010, 2013) e os principais mecanismos pelos quais o nióbio melhora as propriedades dos aços e superligas são descritos a seguir de maneira resumida.

Nos aços microligados, onde é adicionado em proporções de gramas por tonelada de aço, o nióbio atua por meio de quatro mecanismos principais – refina os grãos; retarda a recristalização da austenita; endurece por precipitação, e fixa átomos deletérios às propriedades dos aços. Esse último mecanismo é mais importante para os aços inoxidáveis ferríticos e para os conhecidos como “IF – *Interstitial Free*” enquanto os três primeiros são os responsáveis pelas melhorias de propriedades de todos os aços microligados.

A prática de conformação mecânica de aços conhecida como “laminação controlada” permite a obtenção de microestruturas com refino de grão acentuado para os aços em seu estado como laminado, i.e., sem a necessidade de qualquer tratamento térmico adicional. No início do processo de laminação controlada, o nióbio encontra-se presente na forma de carbo-nitretos não dissolvidos durante o aquecimento inicial e na forma de átomos dissolvidos na matriz austenítica do aço. Os carbo-nitretos de nióbio não dissolvidos influenciam o tamanho de grão austenítico do aço antes do início do processo de laminação. A presença desses carbo-nitretos faz com que os grãos austeníticos iniciais sejam reduzidos. O nióbio dissolvido reduz acentuadamente a taxa de recristalização da austenita durante a laminação a quente promovendo a formação de grãos de austenita alongados durante a laminação. Além disso, o resfriamento e a deformação durante a laminação induzem a precipitação de carbonetos de nióbio muito finos que, além de retardarem a recristalização, também proporcionam um endurecimento por dispersão das partículas precipitadas na matriz do aço. Embora existam outros elementos químicos também considerados microligantes (e.g. titânio e vanádio), nenhum deles é tão efetivo como o nióbio ao proporcionar o refino de grão dos aços e a obten-

ção das propriedades mecânicas para os aços como laminados (GLADMAN, 1997). Esses outros elementos não são efetivos no retardamento da recristalização da austenita embora possam promover endurecimento por precipitação como o nióbio.

Uma das características mais importantes da tecnologia dos aços microligados ao nióbio é sua melhor soldabilidade. O fato das propriedades mecânicas serem obtidas com reduzidos teores de carbono quando se usa o nióbio como elemento microligante resulta em propriedades superiores para as juntas soldadas desses aços. Nos aços “*interstitial free*” e nos aços inoxidáveis ferríticos, o nióbio é adicionado para complementar a ação do titânio na fixação de carbono e nitrogênio. Entretanto, a adição de nióbio nesses aços tem efeitos adicionais ao da estabilização. Esses aços são utilizados em aplicações que demandam elevado grau de estampabilidade, tais como os observados na indústria automobilística e na de eletrodomésticos. A adição de nióbio a esses aços também contribui para a obtenção de texturas favoráveis a uma maior estampabilidade e à eliminação de defeitos superficiais. Além disso, nos aços inoxidáveis utilizados em temperaturas elevadas, a adição de nióbio promove o aumento da resistência à fluência e da resistência à oxidação.

O uso do nióbio na composição de superligas de níquel está principalmente associado ao aumento da resistência mecânica da liga em temperaturas elevadas. As principais superligas de níquel contendo nióbio são os Inconeis 718, 706 e 625. O principal aumento de resistência promovido pela adição de nióbio dá-se pela precipitação de um composto intermetálico (Ni_3Nb) na matriz de níquel durante o tratamento térmico. Além disso, a adição de nióbio às ligas de níquel também promove o aumento da precipitação do composto intermetálico (Ni_3Al). O nióbio tem a capacidade de evitar fratura associada ao envelhecimento por deformação da liga durante a fabricação de componentes acabados, sobretudo quando é necessário utilizar processos de soldagem. Como o nióbio propicia uma resposta mais lenta ao envelhecimento, as tensões nos componentes podem ser termicamente aliviadas antes que ocorra a fratura do mesmo.

PRINCIPAIS APLICAÇÕES FINAIS DO NÍOBIO

O nióbio é um metal utilizado na sua grande maioria pela siderurgia. Mais de 90% do nióbio produzido no mundo é consumido na fabricação de aços na forma da liga ferronióbio que contém cerca de 66% de nióbio.

A classe de aços microligados ao nióbio representam seu principal uso. Nestes aços, o nióbio é adicionado na proporção de algumas centenas de gramas por tonelada de aço, conferindo a este aumento simultâneo de resistência mecânica e tenacidade. Algumas classes de aços inoxidáveis também utilizam nióbio para melhorar suas propriedades de resistência em temperaturas elevadas e sua capacidade de conformação mecânica.

Atualmente, cerca de 10% de todo o aço produzido no mundo contém nióbio como elemento de liga em sua composição química. Estes aços são principalmente utilizados pela indústria automobilística, de transporte de gás e óleo e em aplicações estruturais. Ainda como elemento de liga, cerca de 5% do nióbio são usados em superligas de níquel com resistência mecânica a temperaturas elevadas e resistência à corrosão. Estas ligas são principalmente utilizadas em turbinas de avião, na prospecção de óleo e gás e na indústria química.

Apesar de ser um metal refratário quando puro, apresentando elevado ponto de fusão (2.468°C) com propriedades de fácil conformabilidade, resistência a temperaturas elevadas e resistência à corrosão pela ação de ácidos e bases, o nióbio é pouco utilizado (menos de 3%) em aplicações onde não é um elemento de liga em combinação com outros metais. Por ser o metal refratário de menor densidade, o nióbio foi objeto de pesquisas avançadas realizadas no âmbito do programa espacial americano. No entanto, somente uma das ligas de nióbio tornou-se comercial e ainda hoje é utilizada em pequenas quantidades (representando demanda de menos de dez toneladas de nióbio por ano em média). As soluções para as quais o nióbio estava sendo pesquisado acabaram sendo resolvidas com materiais cerâmicos avançados e que não contêm nióbio em sua composição química.

O nióbio converte-se em supercondutor quando submetido a temperaturas criogênicas. Quando puro e à pressão atmosférica, tem a mais alta temperatura crítica entre os metais supercondutores. A principal aplicação do nióbio como supercondutor é a dos magnetos usados em equipamentos de diagnóstico médico por ressonância magnética. Nestes casos, a supercondutividade é conseguida em ligas nióbio-titânio e nióbio-estanho. O nióbio metálico puro e suas ligas supercondutoras de titânio e estanho também são utilizados em equipamentos de física avançada.

Os esforços de desenvolvimento de mercado para o nióbio em todo o mundo faz com que a elaboração de uma lista de potenciais aplicações para o nióbio seja tarefa bastante difícil. De qualquer maneira, podem-

-se citar, como exemplos, o uso do nióbio metálico como alvos de evaporação usados na indústria de vidros especiais, em lâminas de barbear e em circuitos eletrônicos. Ligas a base de nióbio-titânio têm sido desenvolvidas para aplicações em implantes cirúrgicos. Óxidos especiais de nióbio são usados na composição de lentes para câmeras e copiadoras e estão sendo estudados como solução alternativa em catalisadores na indústria química.

De todo o modo, mesmo com inúmeros empregos potenciais para o metal, os usos principais do nióbio quando medidos em volume de material utilizado, continuarão sendo os ligados à siderurgia. O potencial de crescimento da utilização do nióbio em aços não será ultrapassado por qualquer outra utilização potencial. Desta maneira, a discussão relativa a suprimento e demanda do metal sempre será ditada pela predominância do volume de nióbio utilizado na fabricação de aços em todo o mundo.

OS PRODUTOS DE NÍÓBIO, SUA TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO E PRINCIPAIS MERCADOS

A CBMM é a única produtora de nióbio com presença em todos os segmentos de mercado. As atividades de mineração são feitas a céu aberto e sem explosivos. As unidades de concentração possuem uma capacidade conjunta de concentração instalada de 150 mil toneladas de ferronióbio equivalentes, ou 300 mil toneladas de concentrado de nióbio. Os seguintes processos de produção são utilizados nestas unidades: moagem úmida, separação magnética, deslame e flutuação.

Para atingir as especificações exigidas pela indústria, o concentrado de nióbio é refinado por meio de um processo pirometalúrgico desenvolvido pela CBMM, que inclui pelletização e sinterização do concentrado flutuado, seguido de fusão redutora em forno elétrico a arco para a remoção de chumbo e fósforo. Na sinterização, os gases contendo o enxofre eliminado no processo são lavados e o produto é utilizado em outras unidades fabris na fabricação dos produtos de nióbio. O concentrado refinado é granulado com jatos de água. Operando desde o início de 2000, a nova planta pirometalúrgica para refino do concentrado resultou em maior eficiência, em redução de emissões e em maior qualidade dos produtos. Esta nova unidade de refino do concentrado apresenta capacidade que permite a produção de 100 mil toneladas de ferronióbio equivalentes ou 170 mil toneladas de concentrado de nióbio refinado. O concentrado refinado não é comer-

cializado, sendo usado como matéria prima para os produtos de nióbio fabricados pela CBMM. A companhia não comercializa qualquer produto intermediário do seu processo de fabricação. Nenhuma quantidade de minério ou produto intermediário de nióbio é comercializada pela CBMM. Somente produtos acabados e de maior valor agregado são comercializados pela companhia. O concentrado refinado é transferido para a fabricação do ferronióbio ou para a rota de fabricação do óxido de nióbio e dos demais produtos de nióbio derivados do óxido.

A CBMM desenvolveu um processo para a obtenção de óxido de nióbio de elevada pureza a partir do concentrado refinado de nióbio. Esse processo é um dos mais importantes avanços tecnológicos já feitos na área, especialmente do ponto de vista econômico, e é mantido pela CBMM como segredo industrial. A partir de 1980, com o início de operação da unidade de produção de óxido de nióbio, esta unidade foi objeto de um programa de melhorias que levaram a ganhos de produtividade e qualidade. Atualmente a produção independe de matérias-primas importadas.

A unidade de produção de óxido de nióbio especial, estabelecida em junho de 1998, destina-se à produção de óxido de nióbio de grau óptico, de maior pureza e, sobretudo, usado em lentes especiais. A planta representa um exemplo dos esforços da CBMM em pesquisa e desenvolvimento, e evidencia o empenho da companhia em desenvolver compostos de nióbio de elevada pureza e de maior valor agregado. Exemplos mais recentes são os dos compostos de nióbio para aplicações químicas que a CBMM vem desenvolvendo junto ao mercado. A empresa já investiu em unidade fabril para a fabricação de óxido hidratado de nióbio, conhecido como nióbia, ou HY380, e de um complexo amoniacal de nióbio, conhecido como ANO. Ambos fazem parte do esforço atual da CBMM em desenvolver o mercado de catálise para produtos de nióbio.

A CBMM também produz ferronióbio padrão para a indústria siderúrgica desde 1965. Como já explicado anteriormente, é do ferronióbio usado na fabricação de aços que vem a maior participação na formação dos resultados da CBMM. Em 1994, foi introduzida a aluminotermia em forno elétrico. Com o desenvolvimento de processos e investimentos adicionais realizados pela CBMM em anos recentes, a companhia já possui capacidade instalada (unidade Metalurgia) para a produção de ferronióbio a partir de concentrado refinado igual a 150 mil toneladas de ferronióbio equivalentes.

Uma nova planta para fabricação de óxido de nióbio foi recentemente comissionada e elevou a capacidade de produção anual para 10 mil toneladas de óxido de

nióbio. Somente cerca de 2.000 toneladas de óxido de nióbio são comercializados nesta forma. O restante do óxido que é produzido pela CBMM é transformado nos demais produtos de nióbio, tais como as ligas a vácuo de ferronióbio e níquelnióbio, os óxidos especiais para aplicações ópticas e químicas e o nióbio metálico.

Para fabricar o nióbio metálico puro e a liga nióbio-1% zircônio, a CBMM utiliza fornos de feixe de elétrons. A companhia possui dois fornos com capacidade total de 260 toneladas por ano de lingotes cilíndricos, fabricados de acordo com os padrões ASTM B-391. O primeiro dos fornos entrou em operação em maio de 1989.

O estabelecimento da CBMM como fornecedora líder dos produtos de maior valor agregado, tais como as ligas a vácuo e o nióbio metálico, demonstrou o comprometimento da companhia com a participação nos mercados de tecnologia avançada com produtos de maior conteúdo tecnológico fabricados no Brasil. Nestes produtos, a CBMM sofre concorrência acirrada das unidades de nióbio obtidas como subproduto do processamento de tântalo, provenientes dos minérios de columbita-tantalita. A China é o principal mercado para o nióbio no mundo, consumindo cerca de 25% de todo ferronióbio produzido, sendo a produção doméstica muito pequena. Assim, a China tem sido o principal importador de nióbio dos últimos anos.

O desenvolvimento do mercado chinês para o nióbio é de enorme importância para o futuro do metal, já que o país é responsável pela produção da metade do aço do mundo. Apesar da China ser o país que mais consome nióbio no mundo, seu consumo específico de nióbio (medido através da quantidade de nióbio utilizada em cada tonelada de aço produzido) ainda é muito reduzido em comparação com outras economias do mundo (cerca de 20 gramas de ferronióbio por tonelada de aço produzida). Os esforços realizados pela CBMM para o desenvolvimento do mercado brasileiro fizeram com que o consumo específico de nióbio no Brasil atingisse os níveis de países tecnologicamente avançados. Assim é que o Brasil consome entre 80 e 100 gramas de nióbio para cada tonelada de aço produzida no país. Este consumo específico é da mesma ordem de grandeza do apresentado por países tais como EUA, Alemanha, Suécia, Coreia e Japão.

REFERÊNCIAS

- BERGER, V.I.; SINGER, D.A.; ORRIS, G.J. Carbonatites of the World, Explored Deposits of Nb and REE—Database and Grade and Tonnage Models. Open-File Report 2009-1139. *U.S. Geological Survey*. Reston, Virginia: 2009
- CBMM. Niobium – *Proceedings of the International Symposium*. TMS. 1984. 1.257p.
- CBMM. Niobium – *Science and Technology*. TMS. 2002. 1162p.
- CBMM. Niobium – *High Temperature Applications*. TMS. 2004. 280p.
- CBMM. *International Symposium on Niobium Microalloyed Sheet Steel for Automotive Applications*. TMS. 2006. 594p.
- CBMM. *Niobium Bearing Structural Steels*. TMS. 2010. 506p.
- CBMM. *Welding of High Strength Pipeline Steels*. TMS. 2013. 530p.
- GLADMAN, T. The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels. *The Institute of Materials*. 1997. p. 247 e 259.
- JUSTO, L.J.E.C.; SOUZA, M.M. Jazida de nióbio do Morro dos Seis Lagos, Amazonas. In: Brasil. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. *Principais Depósitos Minerais do Brasil*. Brasília, 1986. v.2, cap. 37, p. 463-468.
- WOOLLEY, A.R.; KJARSGAARD, B.A. Paragenetic types of carbonatite as indicated by the diversity and relative abundances of associated silicate rocks-evidence from global database. *The Canadian Mineralogist*, v. 46, p. 741–752. 2008.

Os elementos terras raras e sua importância para o setor mineral do Brasil

Milton Luiz Laquintinie Formoso

Vitor Paulo Pereira

Egydio Menegotto

Lauro Valentin Stoll Nardi

Artur Cezar Bastos Neto

Maria do Carmo Lima e Cunha

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

Os elementos terras raras são importantes na geologia, agricultura, química, bioquímica, metalurgia, eletroeletrônica, medicina, entre outros. Por serem de grande aplicabilidade, principalmente na indústria eletroeletrônica, sua cotação no mercado deve aumentar, em especial na China, que detém 97% da produção mundial devido ao crescimento na demanda por veículos com energias alternativas e incremento em novos mercados, como os de cerâmicas e PVC. Este aumento depende dos pleitos sociais, ambientais e trabalhistas, bem como do crescimento das economias emergentes. Embora os principais depósitos de ETR no Brasil constituam menos de 1% das reservas mundiais, o país tem grande potencial para a descoberta de novas jazidas. Para o desenvolvimento da indústria mineral de ETR no Brasil são necessários o estudo das áreas produtoras já conhecidas, o aprimoramento dos processos de beneficiamento de minérios, a capacitação da infraestrutura e dos recursos humanos voltados para estes processos, a interação das universidades com as empresas públicas e privadas, programas de intercâmbio internacional e incremento da pesquisa científica na pós-graduação.

Palavras-chave Elementos terras raras. Lantanídeos. Geologia. Geoquímica. Brasil.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável do setor mineral, visando ao bem-estar social, depende de aspectos econômicos e políticas governamentais que ampliem o aporte de investimentos na indústria de mineração. Em 2011, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação organizou, no Centro de Tecnologia Mineral do Rio de Janeiro, o I Seminário Brasileiro de Elementos Terras Raras (ETR). Essa ação do poder executivo brasileiro mostra que o governo tem ciência da importância econômica e geopolítica destes elementos. Dentre os bens minerais, os ETR devem ser destacados devido a sua significativa importância em vários ramos da atividade humana (geologia, agricultura, bioquímica, medicina e outras) e, principalmente ao grande número de aplicações em diferentes tipos de indústrias e processos. Pelo fato de serem indispensáveis para a produção de energia limpa, como no caso do carro elétrico e para os processos avançados de filtragem de água, têm sido denominados de *Green Elements*, pois reduzem a dependência em combustíveis fósseis, que produzem modificações no clima global. Dentre as inúmeras aplicações, os ETR destacam-se na indústria bélica para a produção de armamentos, sendo, por isso, de interesse estratégico para muitas nações.

Investimentos nos estudos dos ETR devem estar voltados não somente para a busca de novos depósitos minerais, mas, principalmente, ao estudo mineralógico e geoquímico dos depósitos já conhecidos. A complexidade no comportamento dos ETR indica que também é importante considerar a necessidade de desenvolvimento de tecnologias nos processos de tratamento e beneficiamento dos minérios portadores

destes elementos. A necessidade urgente destes estudos é devida à sua grande demanda, decorrente do elevado número de usos e aplicações. A oferta relativamente pequena e o preço alto justificam a urgência de pesquisas de novas reservas, bem como a otimização da exploração das já existentes, além do aprimoramento de processos de separação dos ETR.

OS ELEMENTOS TERRAS RARAS

Química

Os ETR compreendem 15 elementos químicos conhecidos como lantanídeos que, quimicamente, são similares ao ítrio e ao escândio. A expressão “terras raras” é inadequada, pois não são terras, nem são elementos raros, embora rochas com concentrações significativas desses elementos sejam incomuns.

Os ETR são elementos litófilos, que ocorrem invariavelmente juntos nos sistemas naturais. Nos minerais formadores de rochas, possuem raio iônico muito similar e tipicamente apresentam-se como cátions trivalentes em carbonatos, óxidos, fosfatos e silicatos, embora o európio e o cério possam ocorrer, também, como Eu^{+2} e Ce^{+4} .

As interpretações do comportamento geoquímico dos ETR são baseadas principalmente nos valores de raios iônicos, que decrescem gradualmente com o aumento do número atômico, devido ao acréscimo de carga no núcleo, causando contração dos subníveis eletrônicos, em especial 5s e 5p. Esse fenômeno, denominado “contração dos lantanídeos”, faz com que os ETR apresentem comportamento geoquímico similar. São divididos em elementos terras raras leves

(ETRL) e elementos terras raras pesadas (ETRP). Os ETRL, do La ao Eu (Z de 57 a 64), são mais abundantes que os ETRP, do Gd ao Lu (Z de 64 a 71). Devido ao raio iônico e ao comportamento geoquímico, o Y e o Sc também podem ser considerados como ETRP. Alguns autores classificam ainda os ETR com números atômicos intermediários como elementos terras raras médios (ETRM), do Nd ao Gd (Z de 60 a 64).

Os ETR são caracterizados pelo preenchimento do subnível 4f, sendo que as diferenças nas configurações eletrônicas destes elementos são devidas ao número de elétrons deste subnível. Os elétrons exteriores (dos subníveis s, p, e às vezes d) das camadas 5 e 6 são envolvidos em ligações químicas com outros átomos. Os ETR³⁺ têm raio iônico (1,08Å) similar ao do Ca²⁺ (WHITTACKER; MUNTUS, 1970); mas se hidrolisam mais facilmente formando hidróxidos. Como são trivalentes, a introdução de ETR no lugar do Ca é acompanhada por uma dupla substituição (ETR³⁺ + Na⁺ ⇌ 2Ca²⁺).

Os lantanídeos são um marcante exemplo da regra de Oddo-Harkins, visto que os de número atômico par

são mais abundantes que seus vizinhos de número atômico ímpar, o que é devido à maior estabilidade de seus núcleos atômicos. Por isso, a distribuição dos ETR em gráficos forma um *zig-zag*, que só é eliminado quando são normalizados por padrões. Há controvérsias quanto ao padrão a ser utilizado para a normalização, pois existem diferentes padrões com diferentes concentrações de ETR. Para rochas, utiliza-se mais frequentemente um padrão de condrito (representando a composição da Terra primitiva). Porém, para o estudo de rochas submetidas a processos de alteração (hidrotermalismo, intemperismo ou metamorfismo), podem ser utilizados outros padrões, como o NASC (*North American Shale Composite*) (HASKIN et al., 1968) e o PAAS (*Post-Archean Australian Shale*) (TAYLOR; MCLENNAN, 1985).

As abundâncias dos ETR na crosta terrestre, em condrito, em granitos e em diferentes tipos de carbonatitos, sendo estes muito ricos em ETR, são apresentadas no quadro 1. A figura 1 ilustra a abundância dos ETR em relação a outros elementos na crosta superior e nas rochas (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2002).

Tabela 1 ETR: números atômicos, abundância (ppm) na crosta superior, em condrito, em granitos e em carbonatitos.

Elementos	Números Atômicos	Crosta Superior*	Crosta#	Condrito†	Rochas Graníticas £	Cálcio Carbonatito\$	Magnésio Carbonatito\$	Ferro Carbonatito\$
Y	39	22	—	na‡	38	119	61	204
La	57	30	30	0,34	55	608	764	2666
Ce	58	64	60	0,91	104	1687	2183	5125
Pr	59	7,1	8,2	0,121	12	219	560	550
Nd	60	26	28	0,64	47	883	634	1618
Pm	61	n.a	n.a	n.a	na	na	na	na
Sm	62	4,5	6,0	0,195	8	130	45	128
Eu	63	0,88	1,2	0,073	1,1	39	12	34
Gd	64	3,8	5,4	0,26	7,4	105	-	130
Tb	65	0,64	0,9	0,047	1,1	9	4,5	16
Dy	66	3,5	3,0	0,30	6,2	34	-	52
Ho	67	0,80	1,2	0,078	1,5	6	-	6
Er	68	2,3	2,8	0,20	4,2	4	-	17
Tm	69	0,33	0,48	0,032	0,69	1	-	1,8
Yb	70	2,2	3,0	0,22	4,3	5	9,5	15,5
Lu	71	0,32	0,5	0,034	0,68	0,7	0,08	-

*Taylor e MacClennan, 1985

#Taylor, 1964

†Wakita, et al., 1971

£ Lapido-Loureiro et al., 1989

\$ Wooley e Kempe (1989)

‡ na = não avaliado

(Fonte: Elaborada pelos autores, a partir de informações de LAPIDO-LOUREIRO et al., 1989; TAYLOR, 1964; TAYLOR; MACCLENNAN, 1985; WAKITA et al., 1971; WOOLEY; KEMPE, 1989)

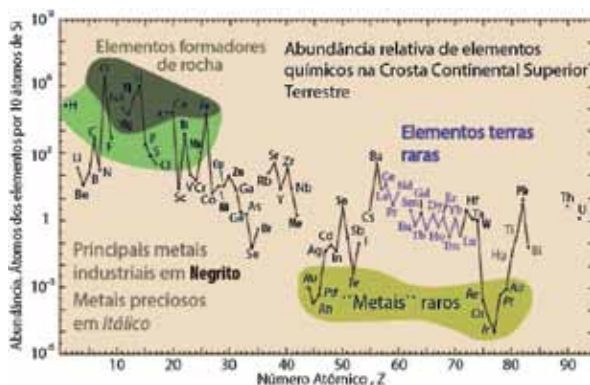


Figura 1 Abundância (fração atômica) dos elementos químicos na crosta continental superior da Terra em função do número atômico. Muitos dos elementos são classificados em categorias que se superpõem parcialmente: (1) elementos formadores de rochas (elementos maiores no campo verde e elementos menores no campo em verde claro); (2) elementos terras raras (lantanídeos, La–Lu e Y; rotulados em azul); (3) principais elementos metálicos industriais (produção global $> 3 \times 10^7$ kg/ano; rotulados em negrito); (4) metais preciosos (itálico); e (5) os nove “metais” raros — seis elementos do grupo da platina mais Au, Re e Te (metalóides). (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2002)

Aplicações

O primeiro aspecto a ser destacado sobre as aplicações tecnológicas dos ETR é que muitas delas requerem elementos específicos, de modo que a separação dos elementos do grupo é um dos pontos mais sensíveis da cadeia produtiva. Os ETR são popularmente conhecidos como elementos verdes devido à sua utilização em equipamentos como magnetos de turbinas de geradores eólicos, veículos elétricos, trem magnético, dispositivos de controle de emissões atmosféricas de carros e lâmpadas de baixo consumo de energia.

Os ETR são utilizados nos mais variados segmentos da indústria, como a fabricação de vidros, cerâmicas, pigmentos, telas de computadores, televisores e monitores, lentes de câmeras e binóculos, filtros e lentes protetoras. Seus usos na indústria química, como catalisadores, têm diversas aplicações nas refinarias de petróleo. Os ETR são aproveitados em produtos farmacêuticos, como catalisadores e em métodos avançados de filtragem e remoção de micróbios da água. São utilizados em componentes eletrônicos de sonar e diversos equipamentos de comunicação e em supercondutores. São essenciais na produção de lâmpadas fluorescentes e lâmpadas de mercúrio. Com os ETR são produzidos ímãs permanentes utilizados em diversos tipos de equipamentos. Na medicina, são empregados como sensores de oxigênio, agentes de contraste e constituem componentes das imagens por ressonância magnética e tomografias. Na metalurgia,

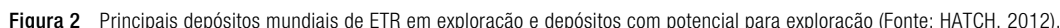
são constituintes em várias ligas metálicas. Destaca-se ainda seus usos na produção de gemas sintéticas, tecidos, estoque de hidrogênio combustível, lubrificação, fotografias e no controle da temperatura em fornos de micro-ondas (CASTOR; HENDRICK, 2006; CHAKHMOURADIAN; WALL, 2012; HATCH, 2012).

As utilizações dos ETR que geram maior consumo são, em ordem decrescente, ímãs permanentes, catalisadores e ligas metálicas. Estima-se que, em 2016, mais de 60% da produção de ETR será destinada a estas 3 aplicações (KINGSNORTH, 2012).

Reservas, Produção e Mercado

A figura 2 apresenta distribuição mundial dos principais depósitos de ETR em exploração, dos principais depósitos em preparação para exploração e daqueles que foram considerados por Hatch (2012) com maior potencial para futura produção. Observa-se que a China é o país que possui o maior número de jazidas em produção (cinco) e que o Brasil, apesar de ser um grande produtor mineral, não se destaca no cenário mundial para ETR. Chama a atenção o número de projetos em estágio de implantação na América do Norte e na Austrália.

As reservas de TR_2O_3 (óxidos de ETR) apresentadas na literatura têm valores díspares, porém a China consta invariavelmente como o país com as maiores reservas e a maior produção. No caso dos ETRP, as reservas são praticamente restritas à China. Segundo o *United States Geological Survey* (2014), as reservas mundiais (em mil toneladas de óxidos contidos) de ETR em 2013 eram de 140.000, assim distribuídas: China (55.000); Comunidade dos Estados Independentes (19.000); Brasil (22.000); EUA (13.000); Índia (3.100); Austrália (2.100); Malásia (30); outros países (41.000). A produção de ETR em 2013 foi de 110.000 (toneladas de óxidos de ETR contidos), sendo que, deste total, a China produziu 100.000 e o Brasil apenas 140. Segundo Castor e Hedrick (2006), a produção brasileira teve os seguintes valores anuais (em toneladas de óxidos de ETR): 1983 (2.891), 1985 (2.174), 1987 (7.047), 1989 (1.377), 1991 (719), 1993 (270), 1995 (103), 2006 (730), 2007 (650), 2008 (650), 2009 (550), 2010 (550). Segundo estes autores, a produção em Poços de Caldas (MG) reduziu significativamente, desde julho de 2005.



terras raras pesados. Este país também tem utilizado medidas restritivas à exportação de ETR, como quotas de exportação, quotas de produção e imposição de taxas, bem como sua legislação proíbe que empresas estrangeiras se dediquem à atividade mineira de terras raras. Segundo Melo et al. (2013), ainda é uma incógnita de que modo os fatores políticos têm afetado as decisões do governo chinês ao estabelecer restrições à exportação de terras raras e se essas restrições podem afetar a distribuição de poder e riqueza no jogo pela hegemonia econômico-militar. Tampouco é sabido quais serão os efeitos da imposição de restrições às exportações de terras raras adotadas pela China sobre as relações políticas internacionais.

A demanda crescente e o aumento nos preços justificam a necessidade de investimentos em pesquisas por novas jazidas e no estudo geológico detalhado das existentes, especialmente das portadoras de ETRP. No caso do Brasil, relatório do Departamento Nacional da Produção Mineral (2011) aponta que as reservas brasileiras representam menos de 1% do total mundial. Os minérios de ETR do Brasil estão localizados principalmente em rochas alcalinas e carbonatitos, como Araxá e Catalão I (GO), que são concentradores de ETRL. Embora a demanda brasileira de ETR ainda seja pequena, deverá ocorrer um aumento substancial no consumo nos próximos 10 anos (ROCIO et al., 2012). Considerando que a quase totalidade das reservas bra-

sileiras contêm monazita (mineral rico em ETRL), há que ser priorizada a pesquisa por depósitos de ETRP.

Geoquímica dos ETR

A abundância e a distribuição dos ETR são sensíveis à natureza das fases residuais e dos líquidos durante a evolução magmática, podendo gerar concentrações nas fases fluidas tardi e pós-magmática. Alguns processos perturbam a evolução dos líquidos magmáticos, como a cristalização fracionada, podendo ocorrer entrada dos ETRP em minerais precoces, enquanto os ETRL concentram nas fases residuais. Nas rochas magmáticas, os ETR têm um padrão de distribuição característico, em que os ETRL são mais abundantes que as ETRP e o Eu é sempre empobrecido (anomalia negativa). Nos granitóides alcalinos e peralcalinos, essas características são acentuadas. Os ETR são mais abundantes nas rochas félsicas que nas máficas.

A interação de líquidos, sejam soluções hidrotermais ou águas meteóricas, com os minerais das rochas, pode liberar ETR na forma de íons simples e/ou complexos. Esses íons podem ser adsorvidos a minerais já existentes ou precipitados, por diferentes processos físico-químicos, gerando novas espécies minerais.

A complexação de ETR por carbonatos e por flúor pode gerar enriquecimento de alguns destes elementos, modificando o padrão de distribuição. Este fenômeno é denominado “Efeito Tétrade” e depende do grau de preenchimento do subnível 4f, que pode promover o aumento na estabilidade de alguns complexos de ETR. Este processo vale para diferentes rochas, especialmente para as graníticas afetadas por fluidos hidrotermais ricos em flúor e em águas portadoras deste ânion. A razão Y/Ho é uma forma de medir este efeito em sistemas magmáticos. Devido à escassez de trabalhos experimentais, a complexação, o transporte e a deposição dos ETR em sistemas naturais ainda não são bem compreendidos e existem contradições na literatura consultada. De acordo com Regra de Pearson (PEARSON, 1963), cátions duros (não polarizáveis ou fracamente polarizáveis) se ligam a ânions duros (ligação iônica) e cátions moles (fortemente polarizáveis) se ligam a ânions moles (ligação covalente). Considerando que os ETR são cátions duros, eles se ligam aos ânions por ligação iônica. Dentre os ETR, o Ce^{4+} é o mais duro e o Eu^{2+} é o mais mole. Também, é importante destacar que os ETR formam complexos aquosos mais estáveis com ânions monovalentes, na seguinte ordem decrescente: $F^- > OH^- > NO_3^- > Cl^- > Br^-$ (Pearson, 1963) e que a sequência decrescente para ânions divalentes é $CO_3^{2-} > SO_4^{2-} > PO_4^{3-}$ (WILLIAMS-JONES, et al., 2012). Estes autores verificaram que a

razão carga/raio dos ETR varia significativamente do La ao Lu, devido à contração dos lantanídeos. Esta razão varia de 2,56 para o La até 3,00 para o Lu. O Y tem valor 2,88, que é próximo ao do Ho, considerando os raios dos ETR^{3+} em coordenação VI (octaedro). Por isso, o Y pode ser considerado um ETR que se localiza entre o Ho e o Er, enquanto que o Sc pode ser considerado como um ETR que se localiza após o Lu.

Importante complexante de ETR, o F^- em coordenação II, tem raio iônico igual a 1,145Å e razão carga/raio igual a 0,87. Em coordenação VI o F^- tem razão carga/raio igual a 0,75. Outro complexante de ETR é o Cl^- com número de coordenação VI, raio iônico igual a 1,81Å e razão carga/raio igual a 0,55. Esta razão indica ou registra a quantidade de carga disponível para complexar cátions, ou seja, o flúor complexa com mais facilidade que o cloro nas mesmas condições geoquímicas. O CO_3^{2-} também é um importante complexante dos lantanídeos.

Quando os ETR^{3+} são complexados por F^- ou CO_3^{2-} ocorrem diferenças na estabilidade dos complexos dos diferentes ETR, sendo os ETRP são mais estáveis. A estabilidade dos ETR^{3+} com ligantes duros como o F^- ou o CO_3^{2-} é maior do que com ligantes intermediários como o Cl^- , ou seja, a estabilidade de um ligante aumenta com a dureza dos ETR (SCHIJF; BYRNE, 1999; LUO; BYRNE, 2001). Segundo Luo e Byrne (2001), a estabilidade dos complexos de ETR com SO_4^{2-} classifica-se entre a com o F^- e o CO_3^{2-} em termos de dureza e varia muito pouco com a dureza dos ETR correspondentes, mas em complexos com Cl^- decresce em estabilidade com o aumento da dureza dos ETR.

O estudo do comportamento dos ETR em relação à temperatura também é importante. Migdisov et al. (2009) testaram o comportamento dos ETR em temperaturas entre 150 e 250°C e concluíram que a estabilidade dos complexos de F^- e Cl^- com os ETR aumenta com o aumento da temperatura. Os complexos de ETR com F^- aumentam a estabilidade com a dureza, ou seja, os complexos com ETRP são mais estáveis em temperaturas mais altas. Ao contrário dos modelos teóricos, as determinações experimentais mostram que as espécies $FETRL^{2+}$ são mais estáveis que as $FETRP^{2+}$ em elevadas temperaturas (MIGDISOV et al., 2009). Estes autores verificaram que, no comportamento dos ETR a 150°C, ocorre uma inversão na estabilidade dos complexos com Cl^- , ou seja, acima desta temperatura a estabilidade decresce do Ce até o Lu e este efeito aumenta com o aumento da temperatura.

Assim, pode-se concluir que a dureza total dos ETR decresce com o aumento da temperatura, mas suas durezas relativas pouco são afetadas. Por contraste, o

“amolecimento” dos ligantes afeta a estabilidade relativa dos complexos de ETR correspondentes. Conforme discutido anteriormente, a estabilidade das espécies de ETR envolvendo o F^- (ânion duro) aumenta com a dureza dos ETR a 25°C (dos ETRL para os ETRP), o que é consistente com a regra de Pearson, onde “cátions duros preferem ânions duros”, enquanto a estabilidade dos complexos de ETR que envolvem o Cl^- decresce com o aumento da dureza dos ETR. Em alta temperatura o Cl^- tem ligação mais fraca que a 25°C e, portanto, o decréscimo na estabilidade dos cloretos de ETR com o aumento da dureza destes elementos deve ser maior do que a 25°C, o que é observado experimentalmente. De maneira similar, o aumento na estabilidade dos fluoretos de ETR com o aumento na dureza dos ETR deve ser menor ou mesmo revertido em alta temperatura, o que também é observado experimentalmente.

A formação de depósitos supergênicos depende vários fatores relacionados aos processos de intemperismo, erosão, transporte e deposição. A interação da água meteórica com minerais portadores de ETR pode liberá-los para o meio na forma iônica. Esses íons podem ser exportados do meio pela drenagem ou serem depositados por diferentes processos físico-químicos. O comportamento geoquímico dos ETR em meio aquoso depende de muitas variáveis, incluindo o pH e Eh, os ânions em solução, a temperatura, a presença de ligantes orgânicos e inorgânicos, o tipo de intemperismo e a distribuição destes elementos na rocha mãe. Outros fatores que influenciam são o clima (árido x úmido) e o tipo de transporte pelos agentes complexantes. Em água doce há pouco transporte de ETR, que comumente ficam retidos na fração detrítica por adsorção, enquanto que os oceanos são empobrecidos em ETR.

Nos perfis lateríticos, resultantes da intemperização de rochas portadoras ETR, são encontrados cerianita, florencita e o raddolita, ocorrendo também a adsorção em argilominerais em meio com pH alcalino ou neutro.

Durante a lateritização, as soluções ricas em CO_2 , pobres em componentes orgânicos e com pH entre 5 e 9, provocam intensa alteração, gerando hidróxidos e oxihidróxidos de Fe e Al. Neste caso, os ETR podem ficar em solução, com exceção do Ce que oxida. Portanto, a concentração de ETR nas soluções é controlada pelas constantes de acidez e pelo pH, onde valores baixos, em torno de 5, mantém os íons em solução, enquanto que em pH alto, em torno de 9, a solubilidade ou precipitação vai depender do produto de solubilidade. Isso pode ocasionar precipitação de ETRP, enquanto os ETRL são levados pelas águas correntes para fora

do sistema, resultando em um fracionamento entre os dois subgrupos.

Minerais de ETR

Conforme Chakhmouradian e Wall (2012), 270 minerais que contêm lantanídeos ou Y como um componente essencial de sua estrutura cristalina e fórmula química eram então conhecidos. Este número representa cerca de 6% do número total de espécies válidas, cinco ou seis novos minerais de REE minerais, normalmente, são descobertos a cada ano. A última descoberta foi a da waimirita-(Y), YF_3 , que ocorre na mina Pitinga, no Estado do Amazonas (BASTOS NETO et al., 2014). Ainda conforme Chakhmouradian e Wall (2012.), os minerais de ETR mais comuns, tanto em termos de número de espécies, como em número de ocorrências naturais, são silicatos (~ 43% de todos os minerais de ETR), seguido pelos carbonatos (23%), óxidos (14%), e fosfatos e oxissais relacionados (14%). Como esperado a partir das abundâncias relativas destes elementos, a esmagadora maioria (96%) dos minerais de ETR tem como constituintes principais Ce, Y, La ou Nd.

Os principais minerais de minério de ETR são os fluorcarbonatos, que se destacam tanto pelo número de depósitos explorados (associados a carbonatitos na grande maioria dos casos), como pelo conteúdo de ETR e pela facilidade de processamento. A bastnaesita $ETR_2CO_3(F,OH)$, que pode conter até 79% de ETR, é o principal dos fluorcarbonatos minerados. Também são importantes a parisita $CaETR_2(CO_3)_3(F,OH)_2$ e a synchysita $CaETR(CO_3)_2(F,OH)$. Todos estes são minerais de ETRL.

A monazita-(Ce) – $[(Ce, La, Nd, Th) PO_4]$ - também é um minério de ETRL, porém pode conter um pouco de ETRP, especialmente ítrio, disprósio e gadolínio. O alto conteúdo de Th (4,5% a 10% de ThO_2) apresenta-se como aspecto negativo para a lavra e processamento. A mineralização pode ser associada a carbonatitos, pegmatitos graníticos, rochas fosfáticas, laterita e placeres. A xenotima-(Y) – $[YPO_4]$ - é a principal fonte de ítrio e de ETRP, sendo minerada, principalmente, a partir de pegmatitos graníticos e de placeres. A loparita-(Ce) – $[(Ce, Na, Ca)(Ti, Nb)O_3]$ - possui pequena quantidade de ETRP, similarmente à monazita, mas tem conteúdo de ETR mais balanceado. É minerada em depósitos associados a maciços alcalinos com urtitos e seus equivalentes feldspáticos e, como a monazita, é um mineral radioativo.

Outros minerais de minério relativamente importantes são: os carbonatos de bário e ETR $[Ba_xETR_y(CO_3)_{x+y}F_z]$, a churchita $(ETRPO_4 \cdot 2H_2O)$ e a fergusonita $(ETR-NbO_4)$. Existe ainda uma série de minerais que foram

minerados em pequena escala, como a aeschynita, allanita, ancylita, britholita, cerianita, cerita, euxenita, ferriallanita, gadolinita, gagarinita, gerenite, kainosite, nioboaeschynite e shomiokite (CHAKHMOURADIAN; WALL, 2012). A gagarinita-(Y) foi descrita em Pitanga, onde tem composição $\text{Na}_{0.24}\text{Ca}_{0.58}\text{Y}_{1.01}\text{ETR}_{0.39}\text{F}_{5.81}$ e apresenta exsolução de fluocerita-(Ce) (PIRES, 2010). Existe ainda um grande número de minerais que não tem ETR como constituinte principal, mas que podem conter quantidades significativas destes elementos que podem ser passíveis de exploração. Muitos minerais de cálcio, como a fluorita e a apatita, enquadram-se neste caso.

Características dos depósitos de ETR

Como destacado por Chakhmouradian e Wall (2012), são vários os processos geológicos que podem levar à concentração de ETR em tipos específicos de rochas e de sedimentos (Figura 3) e ao enriquecimento, tanto de ETRL como de ETRP, pelo fracionamento da série de ETR. Depósitos de ETR em placeres e paleoplaceres, que já ocuparam posição destacada na produção mundial de ETR, estão se tornando novamente atrativos devido ao interesse pela xenotima, mineral portador de ETRP. Contudo, os principais depósitos em produção e os principais prospectos de ETR são relacionados a rochas magmáticas. Neste sentido, Chakhmouradian e Zaltsev (2012) observam que, dos 50 principais projetos avançados de exploração de ETR fora da China,

20 são relacionados a carbonatitos e seus produtos de alteração e 13 são relacionados a diferentes tipos de rochas silicáticas alcalinas.

Chakhmouradian e Zaltsev (2012) dividem os depósitos de ETR associados a rochas ígneas em 5 grupos: 1) associados a carbonatitos, (2) a rochas peralcalinas silicáticas subsaturadas (3) a granitos peralcalinos e pegmatitos (4) a pegmatitos associados com granitos sub a metaluminosos e (5) depósitos de fosfatos com óxidos de ferro. Entretanto, conforme Williams-Jones et al. (2012), na maioria dos casos, as altas concentrações de ETR não podem ser explicadas somente por processos magmáticos, sendo decorrentes também da remobilização destes elementos pela ação de fluidos em estágios tardios ou por processos intempéricos. Neste sentido, Mariano et al. (2010) destacam a dificuldade de se efetuar a caracterização detalhada de um depósito de ETR. Nestes, além da formação de minerais de ETR secundários, como, por exemplo, rabdofânio, florencita, cerita e cerianita, também é comum a existência de íons de ETR adsorvidos na superfície de argilominerais, como a caolinita, a halloysita e as esmectitas (*ionic clays*). Segundo Bau (1991), a concentração preferencial de ETRP nos argilominerais é decorrente da alta razão carga/raio destes elementos, durante os processos de sorção/desorção, sendo, então, preferencialmente sorvidos. Este processo enriquece em até 5 vezes os depósitos lateríticos em relação ao protólito ígneo (KYNICKY et al., 2012).

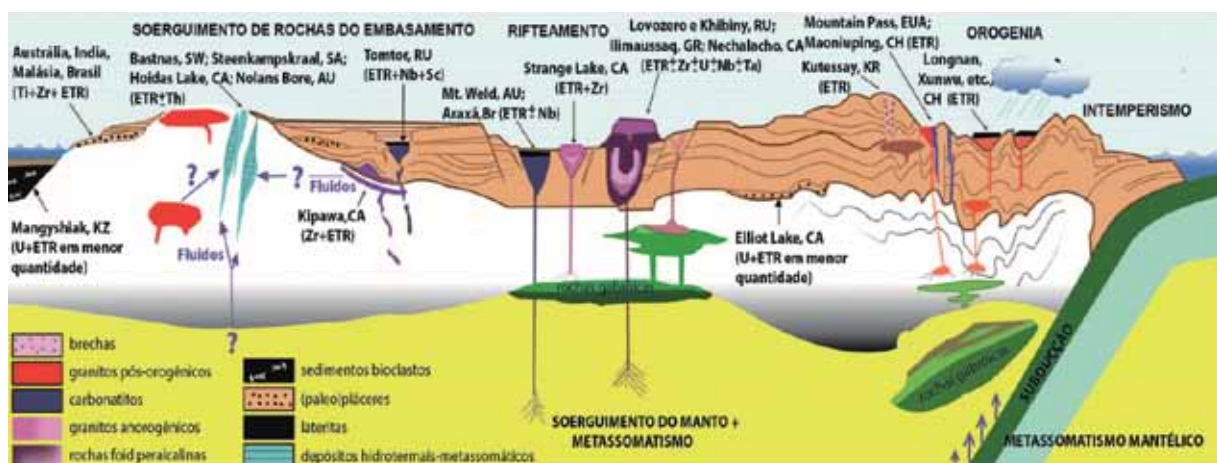


Figura 3 Contexto tectônico dos principais depósitos de ETR (Fonte: CHAKHMOURADIAN; WALL, 2012). Os tipos de rochas são dados na legenda; processos são destacados em letras maiúsculas; produtores do passado, do presente e em potencial estão em itálico. Bayan Obo, embora seja o maior depósito de ETR do mundo é um dos menos conhecidos (KYNICKY et al., 2012) e não foi indicado neste diagrama.

Na China, ocorre uma grande diversidade de tipos de depósitos de ETR, mas somente 3 tipos, todos relacionados a rochas ígneas, têm importância econômica (KYNICKY et al., 2012), são eles: (1) Bayan Obo (Inner Mongólia), onde a mineralização (bastnaesita, parisita e monazita), hospedada em mármore dolomítico, foi formada por substituição hidrotermal relacionada a carbonatito; maior depósito mundial (reserva de 48.10^6 t de ETR_2O_3 contido; teor de 6% de ETR_2O_3), responsável por 90% da produção mundial de ETRL. (2) Depósitos residuais intensamente alterados, onde ETRL e ETRP ocorrem adsorvidos a argilas (*ion-adsorption clays*) de alteração de rocha granítica; numerosos depósitos em 5 províncias do sul da China, totalizando reservas da ordem de 1.10^6 t ETR_2O_3 , são responsáveis por apenas 7% da produção de ETR da China, mas respondem por praticamente toda a produção mundial de ETRP. (3) Depósitos associados a carbonatitos de cinturões orogênicos (e.g. onde o minério de ETRL é constituído essencialmente por bastnäsita - 76 a 92%), com quantidades variáveis de chevkinita, parisita, allanita, aeschynita, monazita e cerianita; ex.: Maoniupig ($1.45.10^6$ t ETR_2O_3) e Daluxlang ($0.7.10^6$ t ETR_2O_3).

De acordo com Chi e Tian (2008), os depósitos de argilas com ETR constituem mais de 80% dos recursos econômicos de ETRP do mundo. Embora as argilas iônicas possuam baixos teores de TR_2O_3 , a facilidade de extração torna-as muito atrativas e justificam a exploração, principalmente quando concentram ETRP. A existência de lamelas no fundo do mar, com teores de ETR entre 500 e 2.200 ppm, constitui um recurso imenso para atender demandas futuras (KATO et al., 2011).

Potencial do Brasil para Produção de ETR

Desde Maciel e Cruz (1973), foram realizados diversos inventários dos depósitos, reservas, recursos e ocorrências com potencial para ETR no Brasil, como os de Lapido-Loureiro et al. (1989), Lapido-Loureiro e Neumann (1993), Lapido-Loureiro (1994, 2011 e 2013), Lima (2011) e Roccio et al. (2012). Além dos depósitos de areias monazíticas do litoral dos Estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e sul da Bahia, são destacados três depósitos principais, todos relacionados a rochas carbonatíticas e/ou alcalinas: Araxá (ISSA FILHO et al., 2005), Catalão (TOLEDO et al., 2004) e Poços de Caldas (BARRETO; FUJIMORI, 1986). Também são sucintamente descritos alguns depósitos considerados pouco conhecidos no que tange aos ETR, como o Morro dos Seis Lagos (associado a carbonatito) e Pitinga (granito), ambos no Amazonas, e uma série de ocorrências com grande potencial para ETR, como, por

exemplo, Mato Preto (PR), Jacupiranga (SP), Barra do Itapirapuã (SP-PR), Tapira, Salitre, Serra Negra, Serra do Repartimento (RR) e Fazenda Varela (SC), todos associados a rochas carbonatíticas e/ou alcalinas. As principais ocorrências relacionadas a granitos são as dos pegmatitos de São João del Rey (MG), granitos Rondonianos (RO) e aquelas dos granitos Serra Dourada e Pedra Branca (GO).

Entre os casos de mineralização associada a carbonatitos, há que se destacar o grande potencial do depósito do Morro dos Seis Lagos (VIEGAS FILHO; BONOW, 1976) devido a 3 aspectos: (1) o ferrocronatito de Seis Lagos tem, em média, valores de ETRP até seis vezes maiores do que a média dos ferrocronatitos de outras localidades (GIOVANNINI, 2013); além (2) da mineralização (cerianita e fluocerita) associada à laterita formada pela alteração de carbonatito (CORRÊA, 1996), existe (3) mineralização associada a argilas depositadas em bacias cársticas (BONOW; ISLER, 1980). Estes autores estimaram para apenas uma das bacias (existem, pelo menos 6 delas) uma reserva de 7,8 Mt com teor médio superior a 1,5% TR_2O_3 .

Os ETRP representam <15% do volume produzido no mundo, mas correspondem a 50% da receita devido à sua maior importância tecnológica. Fora da China, a grande maioria das minas produz ETRL. Assim, a demanda mundial crítica é pelos ETRP, principalmente pelo disprósio, ítrio e európio, juntamente com o ETRL neodímio (STONE, 2009; SERVICE, 2010). No Brasil, o caminho a ser seguido com vistas à produção de ETRP está relacionado com as mineralizações associadas a granitos. Neste sentido, existem duas áreas de interesse maior do que quaisquer outras: Pitinga (Amazonas) e a província estanífera de Goiás.

Pitinga (Amazonas)

Em Pitinga, a exploração do minério de Sn aluvionar foi iniciada em 1979. Hoje, estes depósitos estão esgotados, mas as bacias de rejeito do seu beneficiamento contêm xenotima. A lavra do minério primário (depósito Madeira) foi iniciada em 2003. O depósito é formado por uma associação de Sn, Nb, Ta e de diversos outros metais raros, entre eles os ETR, disseminados na fácies albíta granito do granito Madeira (~1.830 Ma). O albíta granito (Figura 4) é um granito subsolvus, porfirítico, de granulação fina a média, constituído essencialmente por quartzo, albíta e feldspato alcalino e tendo como acessórios principais criolita, zircão, biotita, polilitonita, riebeckita, cassiterita, pirocloro, columbita, xenotima e torita.

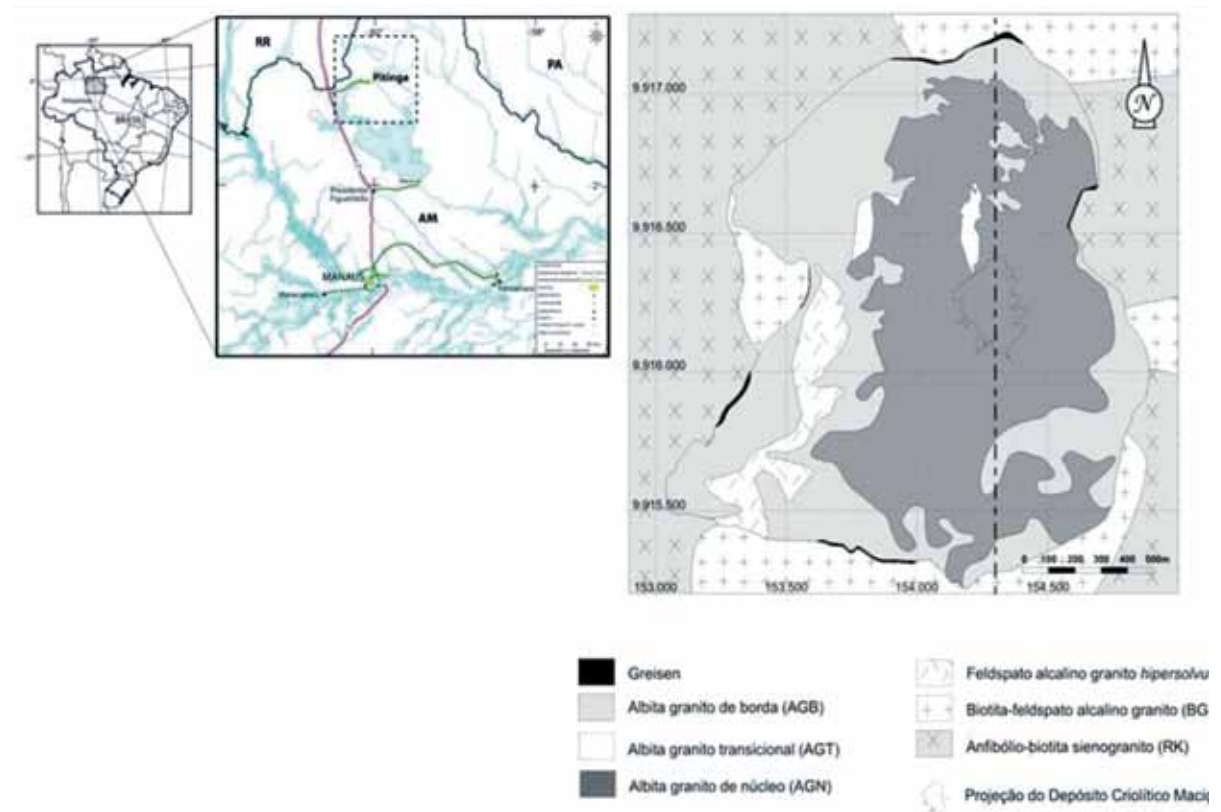


Figura 4 Mapa de localização da mina de Pitinga e mapa geológico do albita granito (Fonte: MINUZZI, 2005; FERRON, 2006; modificado).

As reservas operacionalizadas são de 195 Mt com teor de Sn de 0,17%, Nb de 0,2% e de Ta de 0,02%. A reserva de Y no minério disseminado foi estimada em 195 Mt com teor de 0,036% de Y_2O_5 (70.000 t de Y_2O_5). O teor de Y vem sendo controlado no rejeito da planta piloto de Nb-Ta e o valor médio de 0,3% de Y_2O_5 permite prever a sua produção em sinergia com a produção do minério disseminado de Sn, Nb e Ta (Figura 5A) (GARCIA, 2013). Adicionalmente, no albita granito ocorrem pegmatitos, associados a falhas de direção N-S, formando faixas com espessura de dezenas de metros e comprimento de centenas de metros, ricas em xenotima (Figura 5B). As reservas potenciais da zona de pegmatitos são de 20 milhões toneladas ROM, a 0,1% de Y_2O_3 (20.000 t de Y_2O_3) (GARCIA, 2013). Nos pegmatitos ocorrem xenotima, gagarinita-(Y), fluocerita-(Ce) (PIRES, 2010), gagarinita-(Ce), zajacita e ilmenita (NEUMANN; BARRETO, 2013). A alta fugacidade de F no ambiente magmático do albita granito implicou a cristalização de xenotima com até 4% de F na estrutura mineral. A incorporação do F na xenotima ocorreu pela substituição de O, com

formação de tetraedros de PO_3F (segundo caso descrito na natureza), o que acarretou o encurtamento dos parâmetros a e c , e, conseqüentemente, uma cela unitária menor, o que, por sua vez, facilitou a substituição do Y por ETR de raio iônico menor, notadamente o Yb e o Dy. Este último é o mais precioso de todos os ETR. A riqueza em F no sistema foi, portanto, preponderante para a cristalização de xenotima rica em Dy (BASTOS NETO et al., 2013). Durante o resfriamento do sistema albita granito também ocorreram modificações na distribuição mineralógica dos ETR, como é o caso das exsoluções de ETRL em fluoreto. Existiu uma gagarinita inicial que continha indistintamente ETRL e ETRP, mas, com a diminuição da temperatura, ocorreu o encurtamento da sua cela unitária, causando a exsolução dos ETR de raio iônico maior do que o do Sm. Formaram-se, assim, uma fluorica-(Ce), que contem outros ETRL, e uma fase hospedeira de gagarinita-(Y), que contem outros ETRP (PIRES et al., 2006; PIRES, 2010; BASTOS NETO et al., 2005).

Ensaaios de concentração em escala piloto mostraram a possibilidade de se obter concentrados de xenotima, com um teor de 20% de ítrio, como subproduto da produção de cassiterita (VIEIRA; LINS, 1997). Um estudo de separação de xenotima do zircão do AGN foi realizado por Torem e Scorzelli (1995), porém sem muito sucesso. Lapido-Loureiro (2011) analisou

concentrado de xenotima do albita granito obtendo 61,60% de óxidos de ETR, sendo que destes 98,4% são de ETRP. O minério de ETRP de Pitinga deve ser mais estudado, devido à complexidade paragenética, a qual tem implicações nos métodos de beneficiamento a serem implantados.

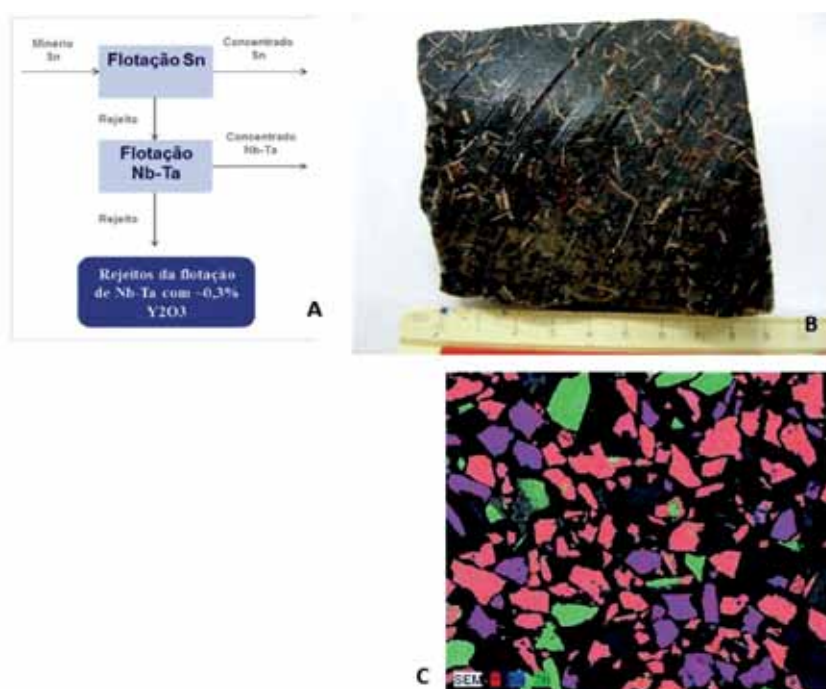


Figura 5 (A) Fluxograma simplificado do beneficiamento em Pitinga. (B) Pegmatito rico em xenotima (cristais rosa alongados). (C) Hipergrama dd Y, Na e Th sobreposto à imagem de elétrons retroespalhados, individualizando os minerais de interesse, com predomínio de xenotima (rosa), gagarinita-(Y) (roxo) e torita (verde); amostra 5389, fração 106mm, magnético 0,5 A (Fonte: NEUMANN; BARRETO, 2013).

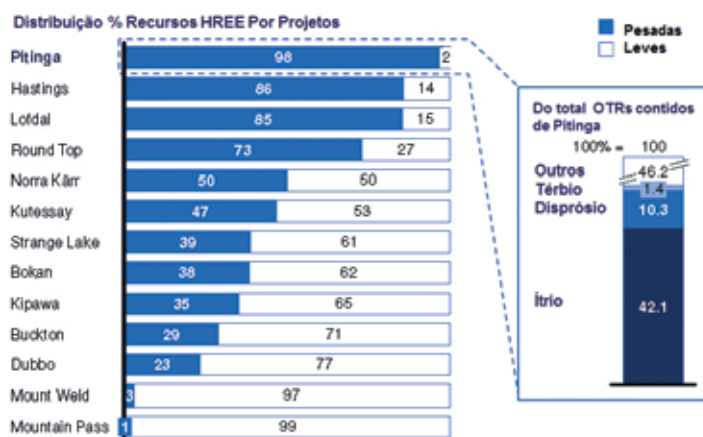


Figura 6 Distribuição dos ETR leves e pesadas nos principais depósitos mundiais e nos pegmatitos da mina Pitinga (Fonte: GARCIA, 2013).

Granitos tipo A da Província Estanífera de Goiás e mineralizações de ETRP

A existência de diversas características comuns aos granitos mineralizados de Pitinga (granitos Madeira e Água Boa) e alguns dos granitos tipo-A que ocorrem em Goiás foi reconhecida por Lenharo et al. (2002). Estes últimos estão distribuídos pela porção norte do Estado de Goiás e sul do Estado do Tocantins, formando parte da chamada Província Estanífera de Goiás (PEG) (MARINI; BOTELHO, 1986). Os depósitos de estanho mais importantes estão localizados nos maciços Serra Dourada e Pedra Branca.

Os estudos realizados pelo grupo de pesquisa da UNB identificaram diversas ocorrências de mineralização de ETRP, algumas muito promissoras. O enriquecimento em terras raras em granitos estéreis e mineralizados em estanho nos maciços Serra Dourada e Pedra Branca já foi divulgado em vários trabalhos específicos sobre terras raras (MARINI et al., 1992; BOTELHO; ROSSI, 1992; TEIXEIRA, 2002; TEIXEIRA; BOTELHO, 1999, 2002). No maciço Serra Grande, os teores detectados no saprolito e nos horizontes argilosos (0,21 e 0,11%, respectivamente) são semelhantes aos encontrados em depósitos importantes já em exploração. Por exemplo, os teores de ETR dos depósitos residuais da China são da ordem de 0,05 – 0,2% (KYNICKY et al., 2012), e são atualmente a principal fonte mundial de ETRP.

A importância econômica de mineralizações associadas a estes corpos já foi confirmada pela Mineração Serra Verde que, recentemente, anunciou que, em 2016, dará início à operação de uma planta industrial para produção de ETRP de jazida associada ao granito Serra Dourada. O potencial destes dois corpos graníticos para novos depósitos de ETRP é, portanto, muito grande.

ETR E OS SISTEMAS BIOLÓGICOS

Considerados minerais estratégicos, o papel proeminente dos ETR nas geociências inclui estudos de seus depósitos minerais, do seu comportamento em sistemas geoquímicos ígneos e aquosos, da biogeoquímica, do seu comportamento ambiental e de sua ecotoxicidade.

Nos sistemas biológicos, por suas propriedades luminescentes e magnéticas, os íons de terras raras são considerados altamente importantes dada sua relevância como marcadores em imunologia para diagnóstico clínico.

No campo da bioquímica, muito do interesse nos estudos dos ETR provem de sua capacidade em subs-

tituir outros íons, em especial o Ca^{2+} , pela marcada similaridade entre ambos em termos de tamanho iônico, geometria de coordenação e átomos doadores na formação de complexos.

No reino vegetal, os primeiros estudos sobre a absorção dos ETR pelas plantas eram sugestivos de que este processo apenas refletia passivamente sua concentração na água. Posteriormente, novas pesquisas evidenciavam que algumas espécies de vegetais apresentavam uma absorção seletiva, com considerável capacidade para concentrar os ETR em detrimento de outras sem esta mesma capacidade. Neste sentido destacam-se, no campo dos vegetais inferiores, as briófitas e as pteridófitas (EVANS, 1990).

Os ETR podem exercer efeitos fisiológicos positivos ou negativos nas plantas dependendo da sua concentração e de outras condições. Sua aplicação adequada em cultivos, por exemplo, pode promover a germinação das sementes e o desenvolvimento das raízes, o aumento da biomassa e assegurar a qualidade dos frutos (ZHANG et al., 2013). Segundo cientistas chineses, a aplicação de ETR como fertilizantes em determinados cultivos pode aumentar a absorção e o transporte dos fosfatos. No entanto, quando excede o nível ótimo, pode inibir o crescimento e mesmo causar a morte da planta. Mesmo sendo tidos como elementos não essenciais ao desenvolvimento das plantas, os ETR são empregados como fertilizantes em vários países da Europa, Ásia e Oceania, entre outros.

Embora a fitotoxicidade dos ETR seja ainda obscura e controversa, o monitoramento de áreas onde são aplicados fertilizantes a base de fosfatos extraídos de depósitos de monazita se faz necessário, bem como o monitoramento de áreas cujas condições do solo são favoráveis à mobilidade dos ETR, propiciando maior disponibilidade e absorção dos mesmos pelas plantas, e ainda, de áreas de aterros com descarte indevido de materiais como baterias, onde o escoamento superficial pode contaminar o ambiente (THOMAS et al., 2014).

Em relação aos metais pesados, estes podem ter sua absorção inibida pela ação dos ETR. Por exemplo, o La^{3+} pode diminuir a absorção do Pb^{2+} em plantas ocorrentes em solos contaminados por este elemento.

Com vistas à prospecção mineral dos ETR, o emprego da fitogeoquímica, integrada a geoquímica de rochas, solos e minerais, tem mostrado resultados favoráveis, em particular para a área da Mina Pitinga, acima mencionada (LIMA; CUNHA et al., 2007, 2009, 2012), comprovando a necessidade de ampliação de estudos dos processos inerentes ao comportamento dos ETR em ambientes supergênicos, principalmente em

regiões sujeitas a intensa alteração intempérica, como é o caso da região de abrangência da Mina Pitinga.

Concluindo, percebe-se que a chave para o desenvolvimento de novas aplicações dos ETR em diferentes áreas requer a combinação de diversas inovações nas ciências geológicas, dos materiais, biológicas, sínteses inorgânica e bioinorgânica, química do estado sólido, métodos preparativos em escala industrial e caracterização analítica (MARTINS; ISOLANI, 2005).

CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento sustentável e o fortalecimento da produção mineral no país dependem mais do estudo geológico e geoquímico das áreas já conhecidas do que da prospecção em novas áreas promissoras. Para isto, são necessários estudos de beneficiamento de minério, deixando de exportar matéria bruta ou concentrados.

Algumas dificuldades enfrentadas para o melhor desenvolvimento desses estudos recaem no reduzido número de laboratórios de análises químicas nacionais e déficit de recursos humanos especializados em técnicas analíticas mais sofisticadas, cuja fixação em centros analíticos depende do reconhecimento de sua qualificação, impedindo que busquem novas oportunidades. Um corpo de profissionais competentes e o aprimoramento na qualidade dos resultados analíticos são requisitos essenciais para o desenvolvimento das técnicas analíticas, evitando assim a necessidade de uso de laboratórios estrangeiros.

Além disso, a formação acadêmica de recursos humanos é ainda pouco expressiva frente à complexidade dos problemas envolvidos na pesquisa de bens minerais, como aqueles relativos aos ETR. Para a solução destes problemas são propostas as seguintes sugestões:

1. Relativamente aos estudos dos ETR:

- devem ser priorizadas as pesquisas na mina de Pitinga (AM) e na Província Estanífera de Goiás, por conterem teores significativos de ETRP;
- devem ser priorizados os estudos das concentrações de ETR em ambientes supergênicos, especialmente daqueles desenvolvidos em rochas graníticas, pelo fato de conterem teores relativamente maiores de ETRP e onde o custo de extração é muito menor do que dos demais tipos de jazidas.

2. Relativamente às necessidades estruturais:

- Maior vínculo entre universidades, órgãos de pesquisa (e.g. CPRM) e empresas privadas de mineração, ou seja, cooperação público-privada;
- Criar órgãos competentes, capacitados a avaliar a qualidade e funcionalidade dos laboratórios públicos prestadores de serviço;
- Preparar recursos humanos específicos para desenvolver estudos das jazidas (mestrandos e doutorandos) e para o aprimoramento das técnicas analíticas de ETR (técnicos de laboratório);
- Realizar convênios para trabalhos conjuntos (doutoramento sanduíche, por exemplo) com especialistas em ETR de locais onde os estudos estejam em estágio mais avançado que no do Brasil (EUA, Austrália e China).

REFERÊNCIAS

- BARRETO, P.M.C.; FUJIMORI, K. Natural analogue studies: Geology and mineralogy of Morro do Ferro, Brazil. *Chemical Geology*, v. 55, n. 3-4, p. 297-312. 1986.
- BASTOS NETO, A.C.; PEREIRA, V. P.; ATENCIO, D.; FERRON, J. T. M. M.; COUTINHO, J. Waimirite-(Y), IMA 2013-108, a new mineral species from Pitinga (Amazonas, Brazil). *Mineralogical Magazine*, v. 78, p. 165-170. 2014.
- BASTOS NETO, A.C.; PEREIRA, V.P.; PIRES, A.C.; BARBANSO, L.; CHAUVERT, A. Fluorine-rich xenotime from the world-class Madeira Nb-Ta-Sn deposit associated with the albite-enriched granite at Pitinga, Amazonia, Brazil. *The Canadian Mineralogist*, v. 50, p. 1453-1466. 2013.
- BASTOS NETO, A.C.; PEREIRA, V.P.; LIMA, E.F.; FERRON, J.M.; MINUZZI, O.; RONCHI, L.H.; FLORES, J.A.A.; FRANTZ, J.C.; PIRES, A.C.; PIEROSAN, R.; HOFF, R.; BOTELHO, N.F.; ROLIM, S.B.A.; ROCHA, F.N.F.; ULMANN, L. The cryolite ore deposit, Pitinga mine (Amazonas). In: MARINI; QUEIROZ; RAMOS (Eds.). *Ore Mineral Deposits from Amazonian Mining Districts*, p. 477-552. 2005.
- BAU, M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium. *Chemical Geology*, v. 93, p. 219-230. 1991.
- BONOW, C.W.; ISSLER, R.S. Reavaliação e aspectos econômicos do jazimento de terras raras e ferro-ligas do Lago Esperança, Complexo carbonatítico de Seis Lagos - Amazonas, Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 31, 1980. Camboriu, *Anais SBG*, v. 3, 1431 p. 1980.
- BOTELHO, N. F.; ROSSI, G. O Depósito de Estanho do Granito Pedra Branca (Goiás). In: SCHOBENHAUSS, C.; COELHO, C.E. (Orgs.). *Principais depósitos minerais do Brasil*. Brasília: DNPM/CVRD, v.3, p. 268-285. 1992.
- CASTOR, S. B.; HENDRIC, J. B. Rare Earth Elements. In: KOJEL, J. E.; TRIVEDI, N. C.; BARKER, J. M.; KRUKOWSKI, S. T. *Industrial Mineral and Rocks: Commodities, Markets, and Uses*. 7ª Edição, *Society for Mining, Metallurgy and Exploration*, p. 769-792. 2006.
- CHAKHMOURADIAN, A.R.; WALL, F. Rare Earth Elements: Minerals, mines, magnets (and more). *Elements*, v. 8, p. 333-340. 2012.
- CHAKHMOURADIAN, A.R.; ZAITSEV, A. N. Rare earth mineralization in Igneous Rocks: *Elements*, v. 8, p. 347-353. 2012.
- CHENG, Z. Global rare earth resources and scenarios of a future rare earth industry. *Journal of Rare Earths*, v. 29, n.1, p. 1-6. 2011.
- CHI, R.; TIAN, J. *Weathered Crust Elution-Deposited Rare Earth Ores*. Nova Science Publishers, New York, 308 p. 2008.
- CORRÊA, S.L.A. *Evolução geoquímica das crostas lateríticas e dos sedimentos sobrepostos na estrutura de Seis Lagos (Amazonas)*. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 212 f. 1996.
- DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral. *Terras-raras*. Sumário Mineral Brasileiro, Brasília. 2011.
- EVANS, C.H. *Biochemistry of the Lanthanides*. Plenum Press, New York, 447 p. 1990.
- FERRON, J.T.M.M. *Geologia Regional, geoquímica e geocronologia Pb-Pb de rochas graníticas e vulcânicas paleoproterozoicas da província Pitinga, cráton Amazônico*. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 331 p. 2006.
- GARCIA, M.D.M. *O projeto ETR da mina Pitinga*. Apresentação no Ministério da Ciência e Tecnologia. Brasília. 2013.
- GIOVANNINI, A. L. *Contribuição à Geologia e Geoquímica do Carbonatito e da Jazida (Nb, ETR) de Seis Lagos (Amazonas)*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, 128 p. 2013.
- HASKIN, L.A.; HASKIN, M.A.; FREY, F.A.; WILDEMAN, T.R. Relative and absolute terrestrial abundances of Rare Earths. In: AHRENS (Ed.). *Origin and Distribution of Elements*. Oxford: Pergamon, v. 1, p. 889-911. 1968.
- HATCH, G.P. Dynamics in the global market for Rare Earths. *Elements*, v. 8, p. 341-346. 2012.
- ISSA FILHO, A.; RIFFEL, B.F.; FARIA SOUSA, C.A. Some aspects of the mineralogy of CBMM niobium deposit and mining and pyrochlore ore processing, Araxá, MG, Brazil: Araxá, Brazil, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração. *Journal of Rare Earths*, v. 29, n. 1, p. 1-6. 2005.
- KATO, Y.; FUJINAGA, K.; NAKAMURA, K.; TAKAYA, Y.; KITAMURA, K.; OHTA, J.; TODA, R.; NAKASHIMA, T.; IWAMORI, H. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience*, v. 4, p. 535-539. 2011.
- KINGSNORTH, D. J. *Strategische Rohstoffe Risikoversorge*, Freiberg, 19th/20th April. 2012.
- KINGSNORTH, D. J. *Meeting demand in 2014: the critical issues*. In: 5th International Rare Earths Conference. Hong Kong. 2014.
- KYNICKY, J.; SMITH, M. P.; XU, C. Diversity of Rare Earth Deposits: The key example of China. *Elements*, v. 8, p. 361-367. 2012.
- LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; SANTOS, R.L.C.dos. (Ed.). *O Brasil e a Reglobalização da Indústria das Terras Raras*. Rio de Janeiro, (CETEM-MCTI), 216 p. 2013.
- LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; NEUMANN, R. Terras-raras no Brasil: revisão dos conceitos de minérios, depósitos e reservas associados a complexos carbonatíticos. In: IV Congresso Brasileiro de Geoquímica. *Anais*. Brasília: p. 142-143. 1993.
- LAPIDO-LOUREIRO, F.E. Terras raras no Brasil: Depósitos, Recursos Identificados, Reservas. *Série Estudos e Documentos*, v. 21, 183 p. 1994.
- LAPIDO-LOUREIRO, F.E.L.; FIGUEIREDO, C.M.V.; TOREZAN, M.J. Os elementos terras raras nos complexos carbonatíticos brasileiros. In: FORMOSO, M.L.L.; NARDI, V. S.; HARTMANN, L. A. (Eds.). *Geoquímica dos elementos terras raras no Brasil*. Rio de Janeiro, CPRM, DNPM, SBGq. Rio de Janeiro. p. 47-59. 1998.

- LAPIDO-LOUREIRO, F.E.L. Terras-Raras- Tipos de Depósitos, Recursos Identificados e Alvos Prospectivos no Brasil. In: I Seminário Brasileiro de Terras-Raras, Rio de Janeiro. 2011.
- LENHARO, S.L.R.; MOURA, M.A.; BOTELHO, N.F. Petrogenetic and mineralization processes in Paleo- to Mesoproterozoic rapakivi granites: examples from Pitinga and Goiás, Brazil. *Precambrian Research*, v. 119, p. 277-299. 2002.
- LIMA E CUNHA, M.C.; PEREIRA, V.P.; MENEGOTTO, E.; BASTOS NETO, A.C.; OLIVEIRA, L. D.; FORMOSO M. L. L. Biogeochemical behavior of Ampelozizyphus amazonicus Ducke in the Pitinga mining district, Amazon, Brazil. *Environmental Geology*, v. 55, p. 1355-1362. 2007.
- LIMA E CUNHA, M.C.; PEREIRA, V.P.; BASTOS NETO, A.C.; NARDI, L.V.S.; FORMOSO M. L. L.; MENEGOTTO, E. Biogeoquímica dos elementos terras raras na Província Estanífera de Pitinga (AM). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39, n. 3, p. 560-566. 2009.
- LIMA E CUNHA, M.C.; PEREIRA, V.P.; NARDI, L.V.S.; BASTOS NETO, A.C.; VEDANA, L. A.; FORMOSO, M.L.L. REE Distribution Pattern in Plants and Soils from Pitinga Mine-Amazon, Brazil. *Open Journal of Geology*, 2: 253-259. 2012.
- LIMA, P. C. R. Terras-raras: elementos estratégicos para o Brasil. Consultoria técnica para o Legislativo da Área XII (Recursos Minerais, Hídricos e Energéticos), Brasília, 2011.
- LUO, Y.-R.; BYRNE, R.H. Yttrium and rare earth element complexation by chloride ions at 25°C. *Journal of Solution Chemistry*, v. 30, p. 837-845. 2001.
- MACIEL, A.C.; CRUZ, P.R. *Perfil analítico do tório e terras raras*. Rio de Janeiro: DNPM, n. 28, 72p. 1973.
- MARIANO, A.N.; COX C.A.; HEDRICK, J.B. *Economic Evaluation of REE and Y Mineral Deposits*. Society for Mining, Metallurgy and Mining, SME, Phoenix Annual Meeting. 2010.
- MARINI, O.J.; BOTELHO, N.F. A província de granitos estaníferos de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16, p. 119-131. 1986.
- MARINI, O.J.; BOTELHO, N.F.; ROSSI, P. Elementos Terras Raras em Granitóides da Província Estanífera de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 22, n. 1, p. 61-72. 1992.
- MARTINS, T.S.; ISOLANI, P.C. Terras Raras: Aplicações Industriais e Biológicas. *Química Nova*, v. 28, n. 1, p. 111-117. 2005.
- MELO, F.R.; SANTOS, C.J.C.; DIAS, H.K.G. *A Geopolítica da Exploração e Comercialização de Terras Raras: Perspectivas de Tensões Internacionais em Segurança e Comércio*. 2013. Disponível em: <abedpb.org/anais/index.php/2012/article/download/14/15>. Acesso em 11 de outubro de 2015.
- MIGDISO, V.A.A.; WILLIAMS-JONES, A.E.; WAGNER, T. An experimental study of the solubility and speciation of the Rare Earth Elements (III) in fluoride- and chloride-bearing aqueous solutions at temperatures up to 300°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 73, p. 7087-7109. 2009.
- MINUZZI, O.R.R. *Gênese e evolução da mineralização de criolita, pirocloro e columbita da subfácies albita granito de núcleo, mina Pitinga, Amazonas, Brasil*. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 182 p. 2005.
- NEUMANN, R.; BARRETO, J.C.G. Caracterização mineralógica de pré-concentrado de minerais de elementos terras raras. Centro de Tecnologia Mineral CETEM-RJ, *Relatório Inédito*, 34 p. 2013.
- PEARSON, R.G. Hard and soft acids and bases. *Journal of the American Chemical Society*, v. 85, p. 3533-3539. 1963.
- PIRES, A.C. *Xenotima, gagarinita, fluocerita e waimirita da mina Pitinga (Am): mineralogia e avaliação preliminar do potencial do albita granito para exploração de elementos terras raras e ítrio*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 199 p. 2010.
- PIRES, A.C.; BASTOS NETO, A.C.; PEREIRA, V.P.; BOTELHO, N.F.; MINUZZI, O.R.R. Gagarinita-(Y) with fluocerite polymorphous: probable case of formation of a new mineral by LREE exsolution from HREE fluoride (Pitinga mine, Amazonas State). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 36, p. 155-164. 2006.
- ROCIO, M. A. R.; SILVA, M. M. DA; CARVALHO, P. S. L. de; CARDOSO, J. G. R. Terras-raras: situação atual e perspectivas. *BNDES Setorial*, v. 35, p. 369-420. 2012.
- SCHIJF, J.; BYRNE, R.H. Determination of stability constants for the mono and difluor complexes of Y and the REE, using a cation-exchange resin and ICP-MS. *Polyhedron*, v. 18, p. 2839-2844. 1999.
- SERVICE, R. F. Nations move to head off short ages of rare earth. *Science*, v. 327, n. 5973, p. 596-1597. 2010.
- STONE, R. As China's rare earth R&D becomes ever more rarefield, other tremble. *Science*, v. 325, n. 5946, p. 1336-1337. 2009.
- TAYLOR, S.R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 28, p. 1273-1285. 1964.
- TAYLOR, S.R.; MCLENNAN, S.M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, 312 p. 1985.
- TEIXEIRA, L. M. *Caracterização de minerais portadores de terras raras e sua aplicação à petrologia e geocronologia de granitos das subprovíncias Tocantins e Paranaíba, Goiás*. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação, Universidade de Brasília, Brasília. 354 p. 2002.
- TEIXEIRA, L.M.; BOTELHO, N.F. Comportamento dos elementos terras raras pesadas em zircão, xenotima e torita dos granitos e greisens da Subprovíncia Estanífera Paranaíba, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, Brasília, v. 29, n. 4, p. 547-554. 1999.
- TEIXEIRA, L.M.; BOTELHO, N.F. Comportamento cristaloquímico de monazita primária e hidrotermal durante a evolução de granitos e greisens: exemplos das subprovíncias Tocantins e Paranaíba, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 32, n. 3, p. 335-342. 2002.

-
- THOMAS, P.J.; CARPENTER, D.; BOUTIN, C.; ALLISON, J.E. Rare earth elements (REEs): Effects on germination and growth of selected crop and native plant species. *Chemosphere*, v. 96, p. 57-66. 2014.
- TOLEDO, M.C.M. de.; BARROS de OLIVEIRA, S.M.; FONTAN, S.M.F.; FERRARI, V.C.; PARSEVAL, P. de. Mineralogia, morfologia e cristaloquímica da monazita de Catalão I (GO, Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 34, n. 1, p. 135-146. 2004.
- TOREM, M. L.; SCORZELLI, I. B. Influência do pré-tratamento com HF na flotabilidade de xenotima e zirconita. In: XVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, Rio de Janeiro. *Anais*. Rio de Janeiro. 1, p. 295-307. 1995.
- USGS – United States Geological Survey. *Rare Earths*. Mineral Commodity Summaries. 2014.
- VIEGAS FILHO, J.R.; BONOW, C.W. *Projeto Seis Lagos*. CPRM. 1976. (Relatório Interno). 131 p. 1976.
- VIEIRA, E.V.; LINS, F. Concentração de minérios de terras raras: uma revisão. CETEM, *Série Tecnologia Mineral*, v. 73, p. 51p. 1997.
- WAKITA, H.; REY, P.; SCHMITT, R.A. Abundances of the 14 rare earth elements and 12 other elements in Apollo 12 samples. In: LEVINSON, A.A. (Ed.). *Proceedings of the Second Lunar Science Conference*. Cambridge, MA: MIT Press. p. 1319-1329. 1971.
- WHITTACKER, E.J.W.; MUNTUS, R. Ionic radii for use in geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 34, p. 945-956. 1970.
- WILLIAMS-JONES, A. E.; MIGDISOV, A. A.; SAMSON, I. M. Hydrothermal mobilization of the rare earth elements - a tale of “Ceria” and “Yttria”. *Elements*, v. 8, n. 5, p. 355-360. 2012.
- WOOLEY, A. R.; KEMPE, D. R. C. Carbonatites: nomenclature, average chemical compositions, and element distribution. In: BELL, K. (Ed.). *Carbonatites: genesis and evolution*, London, Unwin Hyman, p. 1-14. 1989.
- ZHANG, C.; LI, Q.; ZHANG, M.; ZHANG, N.; LI, M. Effects of rare earth elements on growth and metabolism of medicinal plants. *Acta Pharmaceutica Sinica*, B, v. 3, n. 1, p. 20-24. 2013.

Potássio no Brasil

Yara Kulaif

Departamento Nacional de Produção Mineral

Ana Maria Góes

Pesquisadora colaboradora do Instituto de Geociências,
Universidade de São Paulo

Professora aposentada do Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Pará

RESUMO

O capítulo apresenta um apanhado atualizado sobre os recursos geológicos brasileiros para o bem mineral Potássio, perpassando tanto os recursos já tradicionais, fornecedores comerciais do bem mineral, que são as camadas ricas de potássio de evaporitos, quanto aqueles recursos considerados como de desenvolvimento futuro, que são os encontrados em rochas de composição silicática, contendo minerais com alto teor de potássio. É fornecida uma descrição dos principais depósitos minerais conhecidos. Ao final, o capítulo trata dos volumes de produção anual e reservas para o ano de 2013, além de uma pequena exposição sobre a importância econômica e estratégica desses recursos para o país.

Palavras-chave Fertilizantes potássicos. Evaporitos. Rochagem. Verdete.

INTRODUÇÃO

O presente capítulo versa sobre o potencial brasileiro para o bem mineral potássio, considerado estratégico por integrar, junto com o nitrogênio e o fósforo, o grupo dos nutrientes minerais mais importantes para o crescimento das plantas¹ e, por conseguinte, para a produção de alimentos, além de outros importantes produtos da agroindústria, como os biocombustíveis.

Para o estudo dos recursos e reservas geológicas de potássio, sua distribuição e limitações de ordem econômica e tecnológica, é necessário o entendimento das características e comportamento deste elemento químico, nos vários ambientes em nosso planeta.

O potássio está em 19º lugar como elemento mais abundante do Universo, e em sétimo lugar em abundância na crosta continental terrestre (BROWNLOW, 1996), apresentando enriquecimento relativo às outras camadas da Terra, devido à sua baixa densidade relacionada ao grande raio iônico. Geoquimicamente, o potássio é classificado como litófilo, apresentando afinidade com a sílica e, em classificação mais moderna, é chamado de elemento incompatível, uma vez que apresenta raio iônico maior do que os dos elementos constantes nas redes cristalinas dos silicatos (POMEROL et. al., 2013). Isto faz com que o potássio seja facilmente mobilizado quando em ambientes de mais

alta atividade geológica, tornando possível a ocorrência de concentrações economicamente interessantes.

O potássio é encontrado em minerais silicáticos formadores das rochas e sedimentos, como feldspatos, feldspatóides, micas e argilas, bem como combinado com íons cloreto e sulfato, em sais precipitados naturalmente a partir de soluções saturadas existentes em lagos ou mares.

TIPOS DE DEPÓSITOS

Os depósitos minerais passíveis de exploração de potássio podem ser divididos em três tipos principais:

- Depósitos de evaporitos, formados a partir da deposição de sais ricos em sódio e potássio, podendo apresentar-se em espessas sequências e grandes profundidades;
- Salmouras naturais, isto é, lagos, lagunas e mares contendo águas densas e salgadas em locais com alta taxa de evaporação;
- Rochas sedimentares, ígneas ou metamórficas de composição silicática, destacando-se os depósitos glauconíticos ou verdetes entre as sedimentares/metasedimentares; fonolitos e sienitos, rochas ígneas alcalinas, entre as ígneas; e as de enriquecimento anômalo em micas, principalmente biotita e flogopita, entre as metamórficas.

As salmouras naturais com alto teor de potássio, apesar de exploradas economicamente por países como Israel e Jordânia, no Mar Morto, e nos Estados Unidos, no Lago Searles, na Califórnia, e no Grande

¹ Os nutrientes podem ser classificados, segundo a sua importância no processo de desenvolvimento das plantas em: macronutrientes primários: nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K); macronutrientes secundários: cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) e micronutrientes ou oligoelementos: boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mb), zinco (Zn) e cobalto (Co).

Lago Salgado, em Utah (NASCIMENTO et al., 2008), não têm ocorrência com viabilidade econômica conhecida no Brasil e por isso não serão tratadas neste capítulo.

DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS DEPÓSITOS NO BRASIL

Apesar de o potássio estar presente em vários minerais, apenas depósitos com cloretos e/ou sulfatos são considerados de classe mundial, devido, principalmente, ao seu alto conteúdo de potássio e facilidade de solubilização (NASCIMENTO et al., 2008; BALTAR et al., 2001).

Evaporitos

Os sais de potássio estão presentes em evaporitos que são depósitos ortoquímicos formados através do processo de evaporação a partir de salmouras (SILVA et al., 2000). A precipitação dos chamados minerais evaporíticos segue uma sucessão de carbonatos, sulfatos e cloretos. Estes dois últimos incluem os principais sais simples e complexos de potássios que são: kainita $\text{KMg}(\text{SO}_4)\text{CL}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ com 18,9% K_2O , langbeinita $\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$ com 22,7% K_2O , silvita KCL com 63,2% K_2O , carnalita $\text{KMgCL}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ com 16,9% K_2O (SEARLS, 1985; NASCIMENTO et al, 2008; MOHRIAK; SZATMARI, 2008). Os minerais mais utilizados para extração de potássio são silvita e carnalita, pelo alto conteúdo de potássio, estrutura química de cloretos simples, com alta solubilidade, que facilita seu aproveitamento industrial. A silvita geralmente ocorre associada à halita, cujo depósito é denominado de silvinita (FRIEDRICH, 1997; BALTAR et al., 2001).

Evaporitos, diferentemente de outros depósitos, têm ocorrência limitada no tempo geológico, pois exigem condições muito específicas de deposição (PALAGI, 2008). De modo geral, o clima deve ser quente, árido a semiárido, em ambientes continentais/marinhos onde a razão de evaporação exceda a razão de precipitação ou outra entrada de água. Além disso, outro importante fator controlador é a discreta contribuição sedimentar de terrígenos de fora da bacia (SILVA et al., 2000). Ainda que se conheçam bacias evaporíticas de todas as idades geológicas, não existem exemplos atuais de amplas e espessas acumulações de sal. Supostamente, o aumento do nível do mar depois da última glaciação, tornaria o Holoceno inapropriado para deposição espessa de sal (MOHRIAK et al., 2008).

No Brasil, são conhecidos pelo menos nove níveis estratigráficos evaporíticos que variam do rifeano/

vendiano ao eoceno-oligoceno (PALAGI, 2008), porém aqueles com maior quantidade de sais de potássio ocorreram durante o Permo-Carbonífero, na região norte, nas bacias intracratônicas do Solimões e Amazonas, assim como no Aptiano da Bacia da Margem Continental Sergipe-Alagoas (CERQUEIRA et al., 1997). A alta incidência de evaporitos no Paleozoico Superior e Mesozoico Inferior pode ser justificada pela existência do megacontinente Pangea. Neste intervalo de tempo, o Pangea estaria situado sobre cinturões de baixas e médias latitudes de ambos os hemisférios, em zonas de alta pressão, onde a pluviosidade seria deficiente (FLORENCIO, 2008). Por outro lado, a expressiva deposição evaporítica aptiana da margem leste brasileira, com 1500km de extensão e até 500km de largura, desde a Bacia Sergipe-Alagoas até a Bacia de Santos, é explicada pela formação de barreira (Dorsal de São Paulo) que impediu a livre circulação das águas marinhas, e associada à aridez climática, criou as condições para um aumento da concentração e precipitação dos minerais evaporíticos (DIAS, 2008).

Fazendinha-Bacia do Amazonas, Amazonas

Os depósitos evaporíticos na Amazônia foram descobertos entre 1953 e 1957, durante a pesquisa petrolífera desenvolvida pela Petrobras e alcançam 389m de espessura, a aproximadamente 800m de profundidade (COSTA; WANDERLEY FILHO, 2008). Mas somente em 1974, com a perfuração dos poços 1-FZ-1-AM e 1-FZ-2-AM na região de Nova Olinda do Norte, foi possível descobrir camada com silvinita (FRIEDRICH, 1997; COSTA; WANDERLEY FILHO, 2008). Estudos complementares permitiram prever a existência do depósito potassífero de Fazendinha, às margens do rio Madeira, a 130km de Manaus, importante pela ampla extensão areal, posicionado a profundidades de 1000 a 1500m e apresentando condições favoráveis à extração do minério por métodos convencionais de lavra (SAD et al., 1997).

Na Bacia do Amazonas, a sequência evaporítica engloba os evaporitos/terrígenos do Grupo Tapajós das formações Itaituba, Nova Olinda e parte da Andirá, depositados durante o Permo-Carbonífero (COSTA; WANDERLEY FILHO, 2008). O modelo de sedimentação evaporítica foi estabelecido por Szatmari et al. (1975 apud COSTA; WANDERLEY FILHO, 2008) comparável ao modelo clássico da Bacia de Zechstein. Na região amazônica, no paleozoico superior, durante um período de quietude tectônica, sob clima árido e quente, em condições de bacia intracratônica faminta e isolada. Inicialmente os primeiros evaporitos foram

depositados na Sub-bacia de Juruá, na Bacia de Solimões, seguidos pela deposição na Bacia do Amazonas. A presença de sais de potássio é conhecida apenas na Formação Nova Olinda da Bacia do Amazonas, onde ocorre predominância de carbonatos a oeste, próximo ao influxo marinho que grada para anidritas e halitas nas áreas mais afastadas e restritas. No lado leste, a diluição causada pelas águas continentais controlou a deposição das anidritas e carbonatos intercalados com arenitos, gerando modelo concêntrico com carbonatos nas partes mais externas e halita e, mais raramente, silvinita no centro. É possível identificar duas sub-bacias com silvinita, localizadas nas extremidades sudoeste e nordeste da área de deposição da halita (COSTA; WANDERLEY FILHO, 2008). Szatmari et al. (1975 apud COSTA; WANDERLEY FILHO, 2008) dividiram o pacote evaporítico em 11 ciclos evaporíticos, cada ciclo composto de uma sucessão de terrígenos na base e outra superior composta dos ortoquímicos, que se inicia com carbonato e anidrita e termina no topo com halita, no caso de regressão marinha. Destes, apenas o ciclo VII da Formação Nova Olinda atingiu condições de restrição mais acentuada e hipersalinidade propiciando a precipitação de sais mais solúveis de K^+ e Mg^+ (SAD et al., 1997).

Taquari-Vassouras - Bacia Sergipe-Alagoas, Sergipe

A Bacia Sergipe-Alagoas é uma bacia marginal gerada durante a série de eventos que marcaram a separação do continente Afro-Brasileiro, no cretáceo inferior (CERQUEIRA et al., 1997). Na fase inicial de rifteamento, com a instauração de um ambiente marinho restrito (golfo), sob condições de clima quente e árido, desenvolveu-se a sucessão evaporítica que antecedeu a fase marinha carbonática relativa a um mar raso que evoluiu para a bacia oceânica do Atlântico Sul (SILVA et al., 2000). Além disso, a tectônica do rifte compartimentou esta bacia em vários sítios deposicionais, cada um com evolução própria. Somente nas porções mais afastadas do oceano aberto criaram-se condições de restrição suficientes para deposição dos sais de potássio, enquanto que nas mais próximas do mar, halita era precipitada (CERQUEIRA et al., 1997).

As porções que sofreram maior restrição marinha estão localizadas em Sergipe, onde os depósitos de silvinita e carnalita foram descobertos em 1963 pela Petrobras, durante pesquisa de petróleo. O projeto de implantação da mina de Taquari-Vassouras para o aproveitamento do cloreto de potássio foi iniciado em 1979, pela Petromisa. A mineralização salífera é constituída de halita, silvinita, carnalita lixiviada e

taquidrita, sendo a silvinita a principal fonte do minério de potássio.

A jazida de potássio, situada entre os campos petrolíferos de Carmópolis e Siriri, ocorre em uma sucessão de evaporitos associados a carbonatos no Membro Ibura da Formação Muribeca (SOUZA LIMA, 2008). A sucessão evaporítica na área da jazida de silvinita ocorre sobre dois altos estruturais regionais: Aracaju e Riachuelo/Santa Rosa (MACHADO; SZATMARI, 2008). A seção evaporítica Ibura ainda não foi datada adequadamente pela ausência de fósseis diagnósticos. Seu posicionamento estratigráfico sugere idade neoaptiana (SOUZA LIMA, 2008). A espessura média do Membro Ibura na área da mina Taquari-Vassouras é cerca de 260m. Desde os primeiros estudos, observou-se que as camadas de sal apresentam variações na sua inclinação e espessura, evidenciando que os evaporitos foram depositados em superfície peneplanizada e posteriormente deformados por tectônica albiana (MACHADO; SZATMARI, 2008). Além disso, variações na espessura dos evaporitos podem ter sido causadas por processos de halocinese responsáveis pela formação de sucessão de anticlinais e sinclinais presentes na mina Taquari (CERQUEIRA et al., 1997).

Estudos de Szatmari et al. (1974 apud MACHADO; SZATMARI, 2008) propõem a subdivisão da seção evaporítica Ibura em: basal, média e superior, as quais incluem 9 ciclos evaporíticos, de 1 a 6 onde a salinidade é crescente e de 7 a 9 com salinidade decrescente. A basal, entre os marcos 1 a 5, é constituída principalmente de halita, na bacia evaporítica, e por calcário com intercalações delgadas de anidrita de plataformas marginais e de folhelhos sub-betuminosos. A média, entre os marcos 5 e 6, final da fase de alta salinidade, é representada por sais de potássio e magnésio como carnalita e taquidrita. O final do ciclo 6 é marcado por discordância. A superior, entre os marcos 7 e 9, é representada por espessos depósitos de halita inter laminada com silvinita (halita+silvita). O decréscimo da salinidade favoreceu a deposição de anidrita. Com o avanço transgressivo sobre a sucessão evaporítica, calcários e folhelhos do Membro Ibura e os calcilitos e folhelhos do Membro Oiteirinhos da Formação Muribeca foram depositados.

A concentração dos sais de potássio sem magnésio (silvinita) ocorre próximo ao topo da sequência evaporítica no ciclo 7. As camadas que constituem este ciclo possuem espessura de 40m. Na base do ciclo 7 ocorrem duas camadas de silvinita com espessuras médias de 5m, separadas por uma camada de halita, conhecidas como Silvinita Basal Superior e Silvinita

Basal Inferior. Este conjunto tem espessura de 15 a 20m e está sobreposto à camada de taquidrita (CARVALHO JUNIOR; ALVES, 2000).

O ambiente deposicional seria lagunar hipersalino raso (<20m), sob clima semiárido, com aportes periódicos de águas continentais e marinhas, formando ambiente de planície de maré (AZAMBUJA FILHO et al., 1980; FEIJÓ, 1979 apud SOUZA LIMA, 2008). A frequente intercalação de sais de carnalita e taquidrita com halita sugere eventos de diluição da salmoura por aporte de água das áreas menos confinadas (SOUZA LIMA, 2008). O modelo proposto por Szatmari et al. (1974 apud SOUZA LIMA, 2008) sugere a presença de pequenas bacias evaporíticas onde as concentrações eram progressivamente maiores em direção às áreas mais distais do aporte de água marinha, de tal sorte que os sais mais solúveis tivessem condições de precipitação. A intensa evaporação e concentração das águas lagunares teria originado *sabka* nas bordas. Com o aumento de concentração dos sais na salmoura, ocorreu a precipitação da halita e dos sais mais solúveis. As frequentes intercalações de folhelhos com os evaporitos sugerem aporte de água periódica (OLIVER, 1997 apud SOUZA LIMA, 2008). Os modelos são insuficientes para explicar uma sucessão evaporítica tão expressiva, por isso, é suposto que o controle tectônico da subsidência favoreceu o acúmulo de espessos pacotes de sal (SOUZA LIMA, 2008). Além disso, um tectonismo albiano é citado e tem sido associado a pulsos tardios da fase rifte (MACHADO; SZATMARI, 2008).

Ocorrências evaporíticas na plataforma continental

Na Bacia de Sergipe-Alagoas, os evaporitos distribuem-se tanto no continente quanto na porção submersa, seja estratificado, seja em domos ou almofadas. A ocorrência dos evaporitos é reduzida na plataforma continental, ocupando, principalmente, os baixos estruturais controlados por falhas da fase rifte da bacia, estando, aparentemente, ausentes em águas profundas, ainda que Mohriak (1995), através de feições sísmicas, tenha sugerido presença de evaporitos também nessas águas (SOUZA LIMA, 2008). Segundo Rocha (1979 apud CAVALCANTI, 2011; SOUZA et al., 2009), na plataforma continental de Sergipe, próximo de Aracaju, três poços perfurados pela Petrobras (SES-15, SES-8, SES-3) detectaram, além da halita, a presença de sais de potássio e de magnésio (silvinita e carnalita), com espessura de 15 a 50m, em profundidade pouco inferior a 3000m.

Além disso, foram identificados domos de sal na margem continental brasileira a norte de Abrolhos e em Mucuri, no sul da Bahia, em Barra Nova e na foz do rio Doce, no Espírito Santo (CAVALCANTI, 2011).

Rocha (1975 apud SOUZA et al., 2009) cita que carnalita e taquidrita foram identificadas no poço 1-SP-S-2, localizado na plataforma continental do Estado de São Paulo.

Como o Brasil produz menos de 10% do potássio necessário para suprir o mercado interno de fertilizantes, estas ocorrências salíferas podem vir a se constituir em áreas economicamente interessantes para pesquisa, dadas a proximidade da costa e dos grandes mercados consumidores nacionais, lâmina d'água rasa e pequena profundidade dos topos dos domos, alguns quase aflorando no fundo marinho. Além disso, o processo de extração possui tecnologia conhecida e os custos de produção não são inviáveis. Destaca-se que desde 2009 foram requeridas centenas de áreas para pesquisa de sais de potássio nas plataformas continentais de Sergipe, Bahia, Espírito Santo e São Paulo (CAVALCANTI, 2011).

ROCHAS SILICÁTICAS

Há décadas, rochas silicáticas enriquecidas em potássio vêm sendo estudadas como opção em aplicação direta (rochagem) para o fornecimento do nutriente às plantas ou como matéria-prima em rotas alternativas de obtenção de fertilizantes (MARTINS et al., 2008). Rochas como fonolitos, sienitos, biotita-xistos, flogopititos, arcósios, basaltos, rochas ultrabásicas leucíticas (uganditos) e mesmo minérios pobres e rejeitos de minas de fosfatos mostraram algum tipo de interesse e os resultados foram variados.

Nas duas últimas décadas no Brasil, porém, a técnica da rochagem tem sido pesquisada com mais vigor, tendo-se acesso hoje a ampla literatura no Brasil², com revisões de experimentos e desenvolvimento de rotas tecnológicas voltadas para a implantação de projetos de mineração e beneficiamento das rochas silicáticas.

Nascimento e Lápido-Loureiro (2004), em um dos primeiros trabalhos mais completos sobre o tema desta nova fase, mostram que o ortoclásio e o microclínio, os dois feldspatos potássicos mais comuns nas rochas, apresentam praticamente o mesmo conteúdo em íons K (14%) que o mineral de minério carnalita, porém o problema é que naqueles o potássio está firmemente ligado aos tetraedros de silício, tornando difícil sua solubilização. Entre as micas, muscovita (9,8% de K),

2 Notadamente, consultar trabalhos apresentados nos dois congressos brasileiros de rochagem e as inúmeras publicações de pesquisadores do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCT), disponíveis no sítio da instituição na internet.

flogopita (9,3% de K) e biotita (9,0% de K) destacam-se pelo alto conteúdo de potássio, porém, segundo Snäll e Liljefors (2000 apud NASCIMENTO; LAPIDO-LOUREIRO, 2004, 2009), testes de lixiviação com vários agentes lixiviantes e tamanhos de grãos, mostraram que a biotita apresentou maiores valores de extração de potássio, se comparada com a muscovita ou o microclínio. Por outro lado, a muscovita e o microclínio, quando tratados, finamente divididos, com cloreto de cálcio e/ou magnésio na forma hidratada, e aquecidos entre 700-1050° C por um período entre 0,3 e 2 horas, em um processo patenteado por Lonrho Limited, liberaram completamente o potássio (NASCIMENTO; LAPIDO-LOUREIRO, 2004, 2009). Outro mineral silicático, a leucita (17,9% de K), bastante conhecida como mineral de minério substituto do feldspato como fornecedor de álcalis para as indústrias de vidro e cerâmica, também, quando aquecida a 180° C na presença de CaCl_2 , apresentou completa liberação do potássio na forma de KCl (PIGA; POCHETTI, 1992 apud NASCIMENTO; LAPIDO-LOUREIRO, 2004).

São abordadas a seguir descrições de depósitos conhecidos de rochas silicáticas com potencial de exploração para fornecimento de potássio na agricultura.

Verdete de Cedro do Abaeté, Minas Gerais

Na Índia, a utilização de sedimentos com glauconita em substituição a fertilizantes potássicos tem ocorrido, pelo menos, desde os anos 90 (LAPIDO-LOUREIRO et al., 2010). A glauconita é um filossilicato hidratado de ferro e potássio e tem fórmula química geral $(\text{K}, \text{Na})(\text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Mg})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, contendo 6 a 8% de K_2O . Segundo Lapido-Loureiro et al. (2010), a glauconita, mineral autigênico marinho, pode ser retrabalhada dando origem a depósitos continentais e transicionais, podendo também ser produto de intemperismo de várias rochas ou de processos hidrotermais.

Um dos primeiros estudos abordando a existência de rochas pelíticas com alto conteúdo de potássio de Minas Gerais são encontrados em Chaves et al. (1971). Os autores, citando Costa e Branco (1960), ao individualizarem dentro da Série Bambuí dois membros, o Lagoa do Jacaré e o Membro Serra da Saudade, descreveram este último como formado por siltitos e argilitos verdes glauconíticos, raramente arcoseanos. O interesse do trabalho em questão era o estudo da ocorrência de fosfato presente nos fosforitos dos arredores da cidade de Cedro do Abaeté, MG.

Em trabalho apresentado no 24º Congresso Brasileiro de Geologia, de 1970, por Costa e Oliveira (1970), encontram-se indicações da rocha verdete, na região de Cedro do Abaeté, como possível fonte para explo-

ração de potássio. Nele aparece que os pelitos verdes ocorrem formando o topo das camadas dobradas da Série Bambuí, de idade neoproterozoica (700 a 600 Ma), nos municípios de Melo Viana, Quartel Geral, Cedro do Abaeté, Paineiras, Tiros, São Gotardo, Matutina, Santa Rosa da Serra e Arapuá, em cotas acima de 800m. Afirma que “trata-se de grande reserva” (p. 116) e que o potássio é proveniente da glauconita e ilita contidas na rocha, que apresenta teores superiores a 10% de K_2O e que este teor diminui com o aumento do grau de intemperismo. Também destaca que a glauconita é um dos minerais de potássio que podem liberar com certa facilidade o íon K porque “sua rede cristalina é mais frouxa” (p. 116), o que permitiria que essas rochas fossem utilizadas *in natura* como fertilizantes.

Dentre os trabalhos mais recentes, Lima et al. (2007) descrevem a Formação Serra da Saudade do Grupo Bambuí, portadora dos verdetes, como representada, em sua seção tipo, pelas litofácies: (1) ritmito pelito-arenoso; (2) carbonatos retrabalhados; (3) ritmito areno-pelítico verde (verdete); (4) arenito fino com estratificação cruzada *hummocky*; e (5) ritmito fosfático. Estabelece que os ritmitos areno-pelíticos verdes, também conhecidos como verdetes, são considerados fácies de tempestitos, exibindo ciclos de granodecrescência ascendente, com arenitos finos na base e sedimentos siltico-argilosos no topo. Os teores de potássio variam de 7 a 14%, estando presentes na rocha minerais como quartzo, K-feldspato, albita, mica branca, glauconita, clorita e opacos.

Mais especificamente sobre os depósitos de Matutina, São Gotardo e Quartel Geral, pesquisados pela empresa Fvs Mineração Ltda, empresa ligada à Amazon Mining Holding, encontra-se em Nicholls et al. (2010) que sua espessura varia de aproximadamente 20m no domínio meridional a mais de 50m na metade norte da Serra da Saudade, atingindo 80m no extremo norte, onde está coberta por sedimentos mais jovens.

Coelho Neto (2006) detalha que a glauconita, apresentando-se como glóbulos de cor verde intensa a verde pálido, aparece na fácies dos ritmitos verdes como agregados de palhetas finamente granuladas, tendo-se cristalizado primeiramente como mineral expansivo do grupo da esmectita e só posteriormente evoluindo para se constituir como glauconita, com uma estrutura 2:1, semelhante à da ilita. O autor conclui que, embora alguns autores tenham indicado sua gênese em ambiente lagunar, considera como mais apropriada a localização de borda de plataforma e baixas taxas de sedimentação para explicar sua formação. Acrescenta que o ambiente de borda de plataforma também se mostraria adequado à formação dos fosfatos associados.

No Ritmito Superior, associadas a folhelhos e brechas, são encontradas lentes e pequenas lâminas de glauconitas deformadas. Nestes estratos, a deformação não apresenta padrão ou direção preferencial, sendo sobrepostos por outros níveis de glauconita, indicando que a deformação ocorreu em sedimentos não consolidados, concomitante portanto à deposição (COELHO NETO, 2006).

Luz et al. (2010), ressaltando que a associação da glauconita a mineralizações de fosfato poderá revestir-se de grande interesse no âmbito da rochagem, citam, como outras ocorrências de verdetes conhecidas no Brasil, as da Formação Pimenteiras, no flanco ocidental da Bacia do Parnaíba, no Tocantins, e a do Grupo Beneficente, na região de Juruena/Teles Pires/Aripuanã no norte de Mato Grosso e no sul do Amazonas.

Em Matos e Mello (2010) são detalhadas as características dos dois prospectos. O primeiro é descrito como uma sucessão sedimentar devoniana marinha transgressiva, formada por folhelhos intercalados com arenitos, contendo disseminações de fosfato criptocristalino (colofana) e glauconita. Suas dimensões são de aproximadamente 25 mil km². O segundo, do Grupo Beneficente, datado do proterozoico médio, é uma sucessão de metassedimentos marinhos glauconíticos, com disseminações de fosfato criptocristalino (colofana) em siltitos e micronódulos de colofana em arenitos; este cobrindo uma área aproximada de 60 mil km².

Rochas alcalinas potássicas do Maciço de Poços de Caldas, Minas Gerais

O maciço alcalino de Poços de Caldas é uma estrutura circular, de aproximadamente 800 km², que se estende por vários municípios da divisa dos Estados de Minas Gerais e São Paulo, entre eles os de Poços de Caldas, Caldas, Andradas e Águas da Prata.

É constituído principalmente por fonolitos, tinguaítos e sienitos, rochas compostas essencialmente por feldspato alcalino e um feldspatóide, a nefelina. A diferença entre elas está na origem, variando de vulcânica a plutônica, com suas texturas variando de muito fina a grossa, aparecendo associadas a pequenas quantidades de rochas máficas a ultramáficas (ULBRICH et al., 2005).

A sequência indicada por Ulbrich et al. (1992) é a de que o magmatismo na área iniciou-se com o derrame de lavas, com deposição concomitante de tufitos, estes também aparecendo como depósitos tardios. Siltitos e arenitos interestratificados da antiga cobertura sedimentar afloram esparsamente rodeados pelas rochas intrusivas. No interior do maciço são encontradas

estruturas circulares que podem estar ligadas aos contatos dos sienitos intrusivos ou dos domos fonolíticos com as encaixantes ou ainda podem apontar os corpos afetados pelas inversões tardias com alteração hidrotermal e mineralização. Área com alteração hidrotermal sobre rochas catacladas constitui a “estrutura circular centro-leste”, com diâmetros N-S e E-W de 11 e 12 km, respectivamente, e com área total superior ao 100 km² (ULBRICH, 1984). As mineralizações de urânio, molibdênio e zircônio e também as zonas de enriquecimento potássico, aparecem como bolsões no perímetro desta estrutura e nos Campos de Agostinho e do Cercado (ULBRICH et al., 1992).

PRODUÇÃO E RESERVAS CONHECIDAS

A Tabela 1 apresenta os dados de reservas medidas, indicadas e inferidas, conforme aprovadas pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) com base nos relatórios finais de pesquisa das empresas ou, quando localizadas em minas com produção iniciada, após abatimento das produções anuais.

Em Sergipe, as reservas de potássio encontradas nas sub-bacias evaporíticas de Taquari-Vassouras e Santa Rosa de Lima, em área com concessão de lavra cobrindo os municípios de Rosário do Catete, Carmópolis, Santa Rosa de Lima, Capela, Divina Pastora, General Maynard, Japaratuba, Japoatã, Maruim e Siriri, são de 478 milhões de toneladas de silvinita e 14,4 bilhões de toneladas de carnalita (medidas + indicadas + inferidas). Seus teores médios são de 9,74% e 6,34%³ de K₂O, respectivamente. Em informação mais específica, encontrada em Vale S.A. (2015), os montantes de reservas (provadas + prováveis) existentes em Sergipe são de 10,6 milhões de toneladas de silvinita, com teor médio de 24,2% de KCl e 301,6 milhões de toneladas de carnalita, com teor médio de 12,2% de KCl.

A mina de potássio de Taquari-Vassouras, de titularidade da Petróleo Brasileiro S/A (Petrobras) e arrendada para a Vale Fertilizantes S/A⁴ em 2013, atualmente com capacidade produtiva de 625 mil t/ano (VALE, 2015), produziu 492 mil toneladas do produto KCl granular.

As reservas do Amazonas, de Nova Olinda do Norte e de Itacoatiara, referem-se aos depósitos de Fazendi-

3 Ou 15,95% e 10,39% de KCl. A conversão de KCl para K₂O foi feita considerando K₂O = 0,61 KCl.

4 Em 2012, a Petrobras assinou com a Vale a renovação do contrato de arrendamento de ativos e direitos minerários de potássio em Sergipe por mais 30 anos.

nha e Arari, respectivamente. Os dois encontram-se com relatórios aprovados, sendo que o de Fazendinha tem as concessões de lavra outorgadas. Os planos de aproveitamento econômico elaborados para ambos os depósitos na década de 80, previam capacidade de produção de 1,5 milhão de t/ano para cada uma das jazidas (PETROBRAS, 2008), embora, à época, a viabilidade econômica não tenha sido comprovada, uma vez que seriam necessários, além dos investimentos iniciais e custos operacionais dos projetos, investimentos em transmissão de energia, infraestrutura portuária, sistemas de transporte terrestre e fluvial e infraestrutura urbana e social. Porém, encontra-se em estudo a possibilidade de juntar os dois depósitos, dado o tamanho da jazida, que representa a segunda

no mundo em superfície. Com isso, seria tecnicamente viável, de imediato, na primeira fase, uma produção de 2 milhões de t/ano, o triplo da atual produção nacional, a um custo de US\$ 3 bilhões e com um prazo de três anos para sua implantação. Deve-se levar em conta que a logística é complicada, porque o potássio está depositado numa região às margens do rio Madeira, a 1200m de profundidade, contabilizando milhões de toneladas de rejeito (KULAIF, 2009⁵). Quanto às reservas de rochas silicáticas, somente as de Andradadas, em Minas Gerais, de rochas alcalinas, é que têm apresentado produção, e em pequenas quantidades.

5 Atualizado pela autora em junho de 2015.

Tabela 1 Reservas oficiais de potássio do Brasil, ao final de 2013, em mil toneladas.

Local (*)	Substância	Medida		Indicada		Inferida	
		Minério	K ₂ O (%)	Minério	K ₂ O (%)	Minério	K ₂ O (%)
AMAZONAS		939.305	n.a.	63.020	n.a.	150.220	n.a.
Itacoatiara	Evap - Silvinita	446.300	18,32 a 21,57	63.020	20,47 a 20,48	150.220	16,41 a 20,19
Nova Olinda do Norte	Evap - Silvinita	493.005	16,79				
MINAS GERAIS		1.915.741	n.a.	1.081.397	n.a.	261.421	n.a.
Andradadas	RoSil - Alcalinas	37.029	n.d.	20.412	n.d.		
Caldas	RoSil - Alcalinas	9.521	n.d.	10.911	n.d.		
Matutina	RoSil - Verdete	1.100.132	8,18	537.728	8,09	5.714	7,50
Poços de Caldas	RoSil - Alcalinas	28.677	n.d.	19.197	n.d.		
Quartel Geral	RoSil - Verdete	301.683	10,07	18 2.485	9,39	47.825	10,56
São Gotardo	RoSil - Verdete	438.699	7,50	310.664	7,50	207.882	7,50
SERGIPE		5.242.785	n.a.	5.379.000	n.a.	4.291.000	n.a.
Rosário do Catete	Evap - Silvinita	477.785	9,74				
Rosário do Catete	Evap - Carnalita	4.765.000	6,34	5.379.000	6,34	4.291.000	6,34
SÃO PAULO		38.782	n.a.	7.947	n.a.	585	n.a.
Águas da Prata	RoSil - Alcalinas	38.782	n.d.	7.947	n.d.	585	n.d.
TOTAL		8.136.613	n.a.	6.531.364	n.a.	4.703.226	n.a.

Notas: (*) Quando as reservas ou as áreas das poligonais abrangerem mais de uma UF/município, o local informado é o da sede da mina ou o informado pela empresa; Evap: Evaporitos; RoSil: Rochas silicáticas; n.d.: não disponível; n.a.: não se aplica. No caso das RoSil - Alcalinas, como em muitos casos as reservas foram cubadas visando aproveitamento de mais de um tipo de produto, não houve a determinação de teores do potássio em muitas delas, o que impede o cálculo de teor médio por município. (Fonte: Elaborada a partir de consultas aos bancos de dados de Relatórios de Pesquisa Aprovados (RPA) e de Relatórios Anuais de Lavra (RAL) da DIPLAM/DNPM em 22 de junho de 2015).

IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E ESTRATÉGICA PARA O PAÍS

O potássio é produto transacionado internacionalmente, com número limitado de produtores que suprem grande número de países. Estes produtores abastecem com excedentes os grandes consumidores internacionais desta matéria-prima, todos produtores de *commodities* agrícolas. O mercado está hoje dominado pelas enormes jazidas de evaporitos existentes no Canadá, Bielorrússia, Rússia e Estados Unidos (KULAIF, 2009).

Quatro países, China, Brasil, Estados Unidos e Índia têm sido responsáveis pelo consumo de 60% do potássio utilizado como fertilizante no mundo. Além disso, destaca-se a alta taxa de crescimento anual para estes países e para o Brasil em especial.

Segundo dados da ANDA, o mercado de produtos fertilizantes brasileiro, em 2014, foi de 32,2 milhões de toneladas de produto. O Brasil é o 4º maior consumidor mundial de nutrientes NPK e 2º de potássio, representando cerca de 16,7% do seu consumo mundial. Em 2013, o Brasil consumiu 5,2 milhões de toneladas de K₂O, contidos em fertilizantes potássicos (em produto KCl) e produziu apenas 311 mil toneladas. As principais origens das importações brasileiras de potássio em 2013 foram o Canadá, com 31,6%, a Alemanha, com 16,5%, a Rússia, com 15,6%, a Bielorrússia, com 14,9% e Israel com 9,4%, correspondendo a um valor de importação da ordem US\$-FOB 2,91 bilhões (OLIVEIRA, 2014). Este montante despendido, correspondendo a aproximadamente 40% do total de importação de produtos da indústria mineral, continua a impactar fortemente tanto a balança comercial quanto a agricultura brasileira.

PERSPECTIVAS DE AUMENTO DE RESERVAS

Como projetos de expansão já anunciados, destaca-se o Projeto Carnalita, em Taquari-Vassouras, próximo da mina em produção, que prevê uma capacidade instalada 1,2 milhão de t/ano de KCl, lavra por dissolução a 1.100m de profundidade, tem investimento total estimado em US\$ 844 milhões, com vida útil de 40 anos e previsão de início de operação a partir de 2016 (KULAIF, 2009).

O Projeto Santa Rosa de Lima, contíguo ao Carnalita, tem método de lavra por dissolução de fluxo direcional, capacidade de produção projetada de 500 mil t/ano, com início previsto para 2019 (KULAIF, 2009). Sobre a área deste projeto, Oliveira (2014) cita que os

trabalhos de reavaliação de reservas de silvinita na região apontaram 66,9 milhões de toneladas de minério *in situ*, com 15,48 milhões de toneladas de K₂O contido, considerando a camada principal.

No Amazonas, outras empresas têm investido fortemente na pesquisa dos evaporitos. A empresa Potássio de Brasil⁶, por exemplo, detinha, em maio de 2015, 180 processos ativos no DNPM, sendo que, destes, 169 com alvará de pesquisa e 11 estão em fase de requerimento. Essas áreas, requeridas entre 2008 e 2015, cobrem grande extensão nas cercanias dos depósitos da Petrobras, estendendo-se ao longo das margens do rio Amazonas.

Em comunicação recente em evento internacional do setor mineral, o PDAC 2015, a empresa informou que já investiu US\$ 100 milhões, dando prioridade às áreas localizadas no município de Autazes, onde haveria reservas de 425 milhões de toneladas (ainda não oficiais), a 685m de profundidade, sendo que apenas 44% da área foi pesquisada, o que indicaria potencial de reservas bem maiores. O estudo preliminar de avaliação econômica recentemente concluído indicou possibilidade de implantação de uma mina subterrânea utilizando processo de lixiviação a quente, com produção de 2,2 milhões de t/ano de KCl, mais 1,1 milhão de t/ano de salgema. O início das operações deverá se dar até 2019 (ALVES, 2015).

No mesmo evento (PDAC 2015), a empresa Terrativa, do grupo Artesia, apresentou nova tecnologia desenvolvida pelo MIT/USA para produção de um fertilizante potássico a partir de minerais de feldspato, denominado Hidrosienito. A Terrativa tem áreas requeridas e em pesquisa⁷ nos Estados de Bahia, Pernambuco, Goiás e Mato Grosso onde pretende desenvolver cinco minas. A expectativa é que o empreendimento possa alcançar uma capacidade de produção de 1,45 milhão de t/ano de KCl, em duas fases. Na primeira, serão instaladas plantas nas localidades de Ceraíma (BA), Rio Verde (GO) e Sinop (MT), cada uma com capacidade para produzir 208 mil t/ano de KCl. Na segunda fase serão instaladas mais quatro plantas, de mesma capacidade. Cada planta custará em torno de US\$ 140 milhões. Como as plantas localizam-se próximas a regiões consumidoras, a combinação de seu

6 A Potássio do Brasil Ltda é empresa com sede em Belo Horizonte e controlada pelos grupos CD Capital/The Sentinel Group, Forbes & Manhattan, Grupo Simões e Bemol Fogás (ALVES, 2015).

7 No total são 126 áreas, sendo 105 com alvarás de pesquisa e 21 ainda em fase de requerimento, conforme levantamento no sistema Cadastro Mineiro no sítio do DNPM, na internet, em maio de 2015.

baixo custo operacional e logística tornaria o produto competitivo em relação ao potássio importado. Segundo a exposição, o custo operacional seria de US\$ 138 por tonelada de KCl, enquanto o produto importado é comercializado na região do Cerrado a um preço de US\$ 480. Teria ainda como vantagens o baixo consumo energético e não gerar resíduos (ALVES, 2015).

A empresa Verde Fertilizantes, subsidiária da Amazon Mining Holding, tem realizado investimentos visando à produção de termopotássio a partir dos depósitos de verdete de Minas Gerais. O produto, contendo potássio, silício e magnésio, apresenta-se com granulometria farelada fina, baixa solubilidade em água, com liberação gradual dos nutrientes no solo, permitindo atender as necessidades nutricionais das plantas e também um efeito residual no solo. Além disso, corrige a acidez do solo o que aumenta disponibilidade de fósforo no solo (VERDE FERTILIZANTES, 2011).

Como possibilidades de expansão de reservas, deve-se considerar que reservas já cubadas de rochas alcalinas para substâncias como leucita, nefelina-sienito, biotita-xistos, entre outras, aprovadas para rochas de revestimento ou feldspato são passíveis de entrar como recursos, dependendo de investimentos em pesquisas geológicas e tecnológicas em plantas. São também de interesse imediato testes de rejeitos de minerações já implantadas quando a composição das rochas lavradas apontar conteúdo em potássio relevante.

Fontes alternativas de potássio têm sido estudadas e são de várias naturezas. Estes estudos indicam a necessidade de práticas diversas de aplicação de fertilizantes, buscando-se novos padrões para a incorporação dos elementos nutrientes aos solos empobrecidos implicando na otimização do uso dos minerais, com poucas perdas por carreamento pela drenagem (KULAIE, 2009).

Desta forma, alternativas à mineração de evaporitos, apesar de estarem crescentemente sendo prospectadas no Brasil, como é o caso dos verdetes ou das jazidas primárias de rochas silicáticas, ainda devem ser consideradas como recursos minerais, não constituindo propriamente reservas. Seu conhecimento ainda é limitado às empresas que os têm prospectado e às suas comunicações ao público, visando principalmente possíveis investidores, havendo poucas informações detalhadas disponíveis.

Agradecimentos

À Academia Brasileira de Ciências e à Silvana Aparecida Fontanelli, bibliotecária do DNPM/SP, pela busca e orientação quanto às referências bibliográficas.

REFERÊNCIAS

- ALVES, F. Sem o mesmo otimismo de anos anteriores. *Brasil Mineral*, São Paulo, n. 350, p. 58-62, abr. 2015.
- ANDA. *Principais Indicadores de 2014*. Disponível em: <http://www.anda.org.br/estatistica/Principais_Indicadores_2014.pdf>. Acesso em 29 de junho de 2015.
- AZAMBUJA FILHO, N.C. et al. Estudo sedimentológico, faciológico e diagenético dos conglomerados do campo petrolífero de Carmópolis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, 1980, Balneário de Camboriú. *Anais*. Balneário de Camboriú: SBG, v. 1, p. 240-253. 1980.
- BALTAR, C.A.M. et al. Cloreto de potássio: CVRD/mina de Taquari-Vassouras. In: SAMPAIO, J.A.; LUZ, A.B.; LINS, F.A.F. (Ed.) *Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 61-73. 2001.
- BROWNLOW, A.H. *Geochemistry*. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 580 p. 1996.
- CAVALCANTI, V.M.M. *Plataforma Continental: a última fronteira da mineração brasileira*. Brasília: DNPM, 104 p. 2011.
- CARVALHO JUNIOR, A.L.P.; ALVES, E.A.A. O planejamento de lavra da mina de Taquari-Vassouras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA SUBTERRÂNEA, 1, 2000, Belo Horizonte. *Anais*. Belo Horizonte: Instituto Brasileiro de Mineração, 13 p. 2000. [CD-ROM].
- CERQUEIRA, R.M. et al. Jazidas de potássio de Taquari/Vassouras, Sergipe. In: SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E.T.; COELHO, C.E.S. (Coord.). *Principais depósitos minerais do Brasil: rochas e minerais industriais*. Brasília: DNPM: CPRM, v. 4-C, cap. 23, p. 277-312. 1997.
- CHAVES, A.G.; HEINECK, C.A.; TAVARES, W.P. *Projeto fosfato de Cedro do Abaeté*. [Belo Horizonte]: CPRM, 1971. Disponível em: <http://acervo.cprm.gov.br/rpi_cprm/docreaderNET/DocReader.aspx?bib=BTCA_RJ_1&pesq=%22projeto%20fosfato%20de%20cedro%20do%20abaete%22>. Acesso em 11 de junho de 2015.
- COELHO NETO, S.F. *Ritmito superior do grupo Paranoá e fim da deposição na margem passiva*. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- COSTA, A.R.A.; WANDERLEY FILHO, J.R. Os evaporitos e halocinese na Amazônia. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S.M.C. (Org.). *Sal: geologia e tectônica*. São Paulo: Beca Edições, cap. 8, p. 208-219. 2008.
- COSTA, F.G.; OLIVEIRA, F.A. O “verdete” – rocha potássica na região de Cedro do Abaeté. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 24, 1970, Brasília. *Resumos das conferências e comunicações*. Brasília: SBG-Núcleo Centro-Oeste, p. 115-116. 1970.
- DIAS, J.L. Estratigrafia e sedimentação dos evaporitos neo-aptianos na margem leste brasileira. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S.M.C. (Org.). *Sal: geologia e tectônica*. São Paulo: Beca Edições, cap. 9, p. 220-229. 2008.
- FLORENCIO, C.P. A mineração dos evaporitos. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S.M.C. (Org.). *Sal: geologia e tectônica*. São Paulo: Beca Edições, cap. 19, p. 404-413. 2008.
- FRIEDRICH, A. Geologia do potássio. In: SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E.T.; COELHO, C.E.S. (Coord.). *Principais depósitos minerais do Brasil: rochas e minerais industriais*. Brasília: DNPM: CPRM, v. 4-C, cap. 21, p. 253-255. 1997.
- KULAIÉ, Y. *Perfil do potássio*. Relatório técnico nº 52 do Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia – Projeto Estal. Brasília: SGM/MME: BIRD, 2009. 48 p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P29_RT52_Perfil_do_Potxssio.pdf/4971d20d-6612-4882-b131-450e15524ff8>. Acesso em 09 de junho de 2015.
- LAPIDO-LOUREIRO, F.E. et al. Tecnologias de aplicação de glauconita como fonte de potássio na agricultura: o caso brasileiro e a experiência indiana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 1, 2009, Brasília. *Anais*. Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 111-119. 2010.
- LIMA, O.N.B.; UHLEIN, A.; BRITTO, W. Estratigrafia do Grupo Bambuí na Serra da Saudade e geologia do depósito fosfático de Cedro do Abaeté, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 37, n. 4, p. 204-215, 2007. Suplemento.
- LUZ, A.B. et al. Rochas, minerais e rotas tecnológicas para a produção de fertilizantes alternativos. In: FERNANDES, F.R.C.; LUZ, A.B.; CASTILHOS, Z.C. (Ed.). *Agrominerais para o Brasil*. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, cap. 4, p. 61-88. 2010.
- MACHADO, E.C.V.; SZATMARI, P. A mina de Taquari-Vassouras. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S.M.C. (Org.). *Sal: geologia e tectônica*. São Paulo: Beca Edições, 2008. cap. 20, p. 414-423.
- MARTINS, E.S. et al. Agrominerais: rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. In: LUZ, A.B.; LINS, F.A.F. (Ed.). *Rochas e minerais industriais: usos e especificações*. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, cap. 9, p. 205-221. 2008.
- MATOS, G.M.M.; MELLO, I.S.C. Inventário e cartografia de recursos agrominerais convencionais e alternativos do território brasileiro. In: FERNANDES, F.R.C.; LUZ, A.B.; CASTILHOS, Z.C. (Ed.). *Agrominerais para o Brasil*. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, cap. 12, p. 227-234. 2010.
- MOHRIAK, W.; SZATMARI, P. Introdução às propriedades químicas e físicas dos evaporitos. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S.M.C. (Org.). *Sal: geologia e tectônica*. São Paulo: Beca Edições, cap. 1, p. 18-41. 2008.
- MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S.M.C. Sedimentação de evaporitos. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S.M.C. (Org.). *Sal: geologia e tectônica*. São Paulo: Beca Edições, cap. 3, p. 64-89. 2008.
- NASCIMENTO, M.; LAPIDO-LOUREIRO, F.E. *Fertilizantes e sustentabilidade: o potássio na agricultura brasileira, fontes e rotas alternativas*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 66 p. 2004. (Série Estudos e Documentos, 61)
- NASCIMENTO, M.; LAPIDO-LOUREIRO, F.E. O potássio na agricultura brasileira: fontes e rotas alternativas. In: LAPIDO-LOUREIRO, F.E.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J.F. (Ed.). *Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, cap. 9, p. 305-335. 2009.

- NASCIMENTO, M.; MONTE, M.B.M.; LAPIDO-LOUREIRO, F.E. Agrominerais: potássio. In: LUZ, A.B.; LINS, F.A.F. (Ed.). *Rochas e minerais industriais: usos e especificações*. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, cap. 8, p. 175-203. 2008.
- NICHOLLS, B.; VIANA, B.; RODRIGUEZ, P.C. *Cerrado Verde Potash Project, Brazil*. [Belo Horizonte]: Coffey Mining, 2010. (Technical Report, n. 360908). Disponível em: <http://verdepotash.com/files/43-101_Resource_Report.pdf>. Acesso em 12 junho de 2015.
- OLIVEIRA, L.A.M. Potássio. *Sumário Mineral-2014*: DNPM. Brasília, DF, v. 34, p. 100-101, 2014. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2014>>. Acesso em 10 de junho de 2015.
- PALAGI, P. Evaporitos no Brasil e na América do Sul. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S.M.C. (Org.). *Sal: geologia e tectônica*. São Paulo: Beca Edições, cap. 7, p. 188-207. 2008.
- PETROBRAS. *Unidade de Negócios Sergipe-Alagoas/ENGP*. Apresentação PowerPoint. 2008.
- POMEROL, C. et al. *Princípios de geologia: técnicas, modelos e teorias*. Tradução Maria Lidia Vignol Lelarge, Pascal François Camille Lelarge; revisão técnica Rualdo Menegat, Maria Lidia Vignol Lelarge. 14. ed. Porto Alegre: Bookman, 1017 p. 2013.
- SAD, A.R. et al. Depósito de potássio de Fazendinha, Nova Olinda do Norte, Amazonas. In: SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E.T.; COELHO, C.E.S. (Coord.). *Principais depósitos minerais do Brasil: rochas e minerais industriais*. Brasília: DNPM: CPRM, v. 4-C, cap. 22, p. 257-276. 1997.
- SEARLS, J.P. *Mineral Facts and Problems*: 1985 Edition. Washington D. C.: UNT, 1985. Disponível em: <<http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12817/m1/625/?q=potash>>. Acesso em 29 de junho de 2015.
- SILVA, M. A. M.; SCHREIBER, B. C.; SANTOS, C.L. Evaporitos como recursos minerais. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 18, n. 3, p. 337-350, 2000.
- SOUZA, K.G. et al. Recursos não-vivos da Plataforma Continental Brasileira e áreas oceânicas adjacentes. *Gravel*, Porto Alegre, mar. 2009. Edição especial.
- SOUZA LIMA, W. Sequências evaporíticas da Bacia Sergipe-Alagoas. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S.M.C. (Org.). *Sal: geologia e tectônica*. São Paulo: Beca Edições, cap. 10, p. 230-249. 2008.
- ULBRICH, H.H.G.J. *A petrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina sienitos do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG - SP*. 1984. 480 f. Tese (Livre-Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.
- ULBRICH, H.H.G.J.; ULBRICH, M.N.C.; GARDA, G.M. O maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP, Brasil meridional, e suas zonas de alteração hidrotermal: modelo estrutural. *Bol. IG-USP, Publ. espec.* [online], n. 12, p. 141-142, 1992.
- ULBRICH, H.H.G.J. et al. Structure and origin of the Poços de Caldas alkaline massif, SE Brazil. In: COMIN-CHIARAMONTI, P.; GOMES, C.B. (Ed.). *Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in Brazilian platform*. São Paulo: EDUSP: FAPESP, p. 367-418. 2005.
- VALE S.A. *Relatório Anual*, de acordo com a seção 13 ou 15 (d) da Lei de Mercado de Capitais de 1934 para o exercício encerrado em: 31 de dezembro de 2014. Rio de Janeiro, 2015. (Registrado junto à Comissão de Valores Mobiliários dos Estados Unidos, 001-15030). Disponível em: http://www.vale.com/PT/investors/Quarterly-results-reports/20F/20FDocs/Vale%2020-F%202014_p_novo.pdf. Acesso em 25 de junho de 2015.
- VALE S.A. *Mineração-Fertilizantes*. Disponível em <http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/fertilizers/Paginas/default.aspx>. Acesso em 25 de junho de 2015.
- VALOR ECONÔMICO. *Verde Fertilizantes investe em termopotássio em MG*. São Paulo, 7 abr. 2011. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/arquivo/881585/verde-fertilizantes-investe-em-termopotassio-em-mg>>. Acesso em 10 de junho de 2015.

Fosfato no Brasil

Maisa Bastos Abram

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

RESUMO

A demanda por fósforo é cada vez mais crescente no Brasil e no mundo, e constitui um grande desafio tendo em vista a segurança alimentar. A expectativa é que o Brasil deverá ser um dos grandes fornecedores mundiais de alimentos. O agronegócio brasileiro hoje tem uma grande participação no PIB nacional, o que destaca a sua importância para a economia brasileira. O Brasil possui unidades geológicas compatíveis com todas as classes de depósitos existentes no mundo. Apresenta, ainda, um potencial para a ampliação da produção e da reserva nacional através da implantação de novos projetos de produção, da descoberta de novos depósitos minerais e reavaliação de potenciais já conhecidos, com perspectiva de aumento do recurso existente. Este trabalho faz um estudo analítico do panorama e perspectivas para o fosfato no Brasil, considerando os quadros mundiais e atuais do Brasil quanto à produção, reservas e potencial geológico.

Palavras-chave Fosfato. Brasil. Reserva. Produção. Potencial Geológico.

INTRODUÇÃO

O fósforo (P) possui concentrações na crosta terrestre que variam de 0,1 a 1% (ROSE et al., 1979; MCDONOUGH; SUN, 1995) e seu uso está predominantemente relacionado à indústria de fertilizantes. Constitui elemento fundamental e sem substituto na agroindústria. A apatita, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$, é a forma mineralógica mais comum do fósforo. É um mineral pouco solúvel, havendo necessidade de transformá-lo em produtos que possam liberar fósforo para as plantas. A principal aplicação da apatita é, portanto, na fabricação do ácido fosfórico. Existe, ainda, uma infinidade de minerais fosfáticos, especialmente os secundários, como os minerais do grupo da crandalita, dentre outros, hoje viabilizados para fabricação do termofosfato, e também minerais resistentes ao intemperismo como a monazita $\text{Ce,La,Th,U}(\text{PO}_4)_3(\text{SiO}_4)$ e o xenotímio $(\text{Y,ETR})\text{PO}_4$, sem aproveitamento na indústria de fertilizantes. As rochas fosfatadas, por sua vez, constituem um recurso não renovável.

A população mundial contabilizada entre 2014 e início de 2015 foi de cerca de 7,2 bilhões de habitantes e estimativas da ONU indicam que a população mundial, em 2050, será de 9,6 bilhões de habitantes (UNITED NATIONS, 2013). Consequentemente, haverá cada vez mais uma tendência de crescimento da demanda por fertilizantes, uma vez que será necessário um aumento da produção agrícola através do aumento da produtividade e pela incorporação de novas áreas agriculturáveis.

O consumo global de insumos para fertilizantes aumentou significativamente em 2010. Desde então vem crescendo de uma forma estável numa taxa média

de cerca de 2% ao ano, conforme estimativas prévias da IFA (*International Fertilizer Industry Association*) (HEFFER; PRUD'HOMME, 2014). Em 2014, o consumo brasileiro de fertilizantes foi de 32 milhões de toneladas, um crescimento de, aproximadamente, 97% se comparado ao consumo do ano 2000 (FERNANDES, 2013).

O Brasil se destaca no panorama mundial como um grande produtor de alimentos e a expectativa é que sua importância aumente, tendo em vista a grande extensão de suas terras agriculturáveis. Em relação ao fosfato, a expectativa era que a demanda mundial aumentasse numa razão de 2,4% até 2015. No Brasil, de acordo com a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2013), as entregas de fertilizantes fosfatados (P_2O_5) registraram alta de 7,3%, passando de 4,3 milhões toneladas, em 2012, para 4,6 milhões toneladas, em 2013. Neste mesmo ano, também de acordo com dados da ANDA, 57% do consumo nacional de fosfato foi importado de fontes externas (Figura 1).

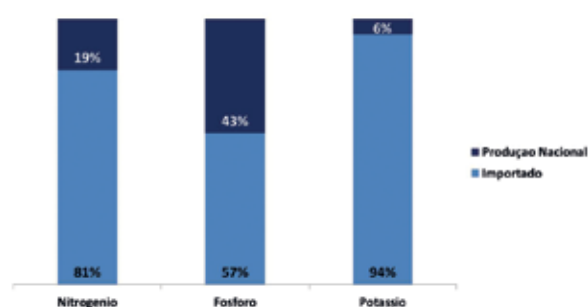


Figura 1 Perfil da dependência externa de fertilizantes (Fonte: ANDA, 2013).

Os fertilizantes fosfatados são produzidos a partir das rochas fosfáticas, extraídas de diversos ambientes geológicos distintos. Com base nos principais processos formadores dessas rochas, destacam-se quatro principais categorias de depósitos:

- 1. Depósitos Magmáticos:** (i) associados a complexos intrusivos alcalinos, alcalino-carbonatíticos, hipercalcalinos e ultrabásicos, metamorfizados ou não; (ii) associados a rochas pegmatíticas de natureza ácida ou alcalina que cortam mármore/calcissilicáticas e; (iii) relacionados a associação de rochas Anortosito-Mangerito-Granito Rapakivi.
- 2. Depósitos Sedimentares:** aqui estão incluídos os depósitos marinhos sedimentares e metassedimentares representados por fosforitos e rochas fosfatadas, distribuídos desde o cenozoico ao paleoproterozoico.
- 3. Depósitos Residuais Meteóricos:** depósitos de fosfato resultantes do enriquecimento, devido a processos de intemperismo.
- 4. Depósitos fosfáticos residuais zoógenos ou tipo Ilha:** depósitos de Guano, que são acumulações de excrementos de aves (menos de 1% das reservas mundiais naturais de fosfato). No Brasil destacamos a Ilha Rata, em Fernando de Noronha, com algumas acumulações de fosfato.

O Brasil possui unidades geológicas compatíveis com todas as classes de depósitos existentes. Apesar de apresentar ambientes geológicos favoráveis para mineralizações de fosfato, a situação brasileira em relação à disponibilidade de fosfato é crítica, face ao quadro de reservas e à produção brasileira atual, o que gera uma alta vulnerabilidade para o agronegócio brasileiro. Portanto, é fundamental que o Brasil melhore sua posição na balança comercial quanto aos insumos fosfatados para fertilizantes através de políticas públicas que favoreçam o aumento da produção e de pesquisa para ampliação das reservas brasileiras, de forma a ficar numa situação econômica confortável no panorama mundial.

DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS DEPÓSITOS, RESERVAS E PRODUÇÃO

Distribuição dos principais depósitos e reservas

Segundo dados do USGS (2014), as reservas mundiais de fosfato são da ordem de 67 bilhões de toneladas (ano base-2013). Os dados apresentados foram pu-

blicados pelo USGS (2014) e foram atualizados com base em *reports* de companhias individuais, *Indian Mineral Yearbook*, *Geoscience Australia* e *International Fertilizer Development Center*. Estas estão associadas a depósitos de origem sedimentar (em torno de 85% da oferta mundial), ígnea (próximo de 15%) e biogenética (menos que 1%). A maior parte destas mineralizações está inserida hoje em áreas continentais, entretanto, novos recursos de fosfato estão sendo identificados, dimensionados e viabilizados economicamente em oceanos, geralmente associados a plataformas continentais e *seamounts*, a exemplo do depósito de Catham, Golden Bay, Nova Zelândia (CASTLE et al., 2012). Os principais países detentores das reservas mundiais estão mostrados na Figura 2 e na Tabela 1. O Brasil ocupa a décima segunda posição no *ranking* mundial.

Tabela 1 e Figura 2 Panorama das reservas mundiais de fosfato (Fonte: USGS, 2014).

País	Reservas	
Marrocos e Saara Ocidental	50.000.000	1
China	3.700.000	2
Argélia	2.200.000	3
Síria	1.800.000	4
África do Sul	1.500.000	5
Jordânia	1.300.000	6
Rússia	1.300.000	7
Estados Unidos	1.100.000	8
Austrália	870.000	9
Peru	820.000	10
Iraque	430.000	11
Brasil	315.000	12
Cazaquistão	260.000	13
Arábia Saudita	211.000	14
Israel	130.000	15
Egito	100.000	16
Tunísia	100.000	17
Senegal	50.000	18
Índia	35.000	19
México	30.000	20
Togo	30.000	21
Canadá	2.000	22
Outros Países	520.000	
Total (arredondado)	67.000.000,00	

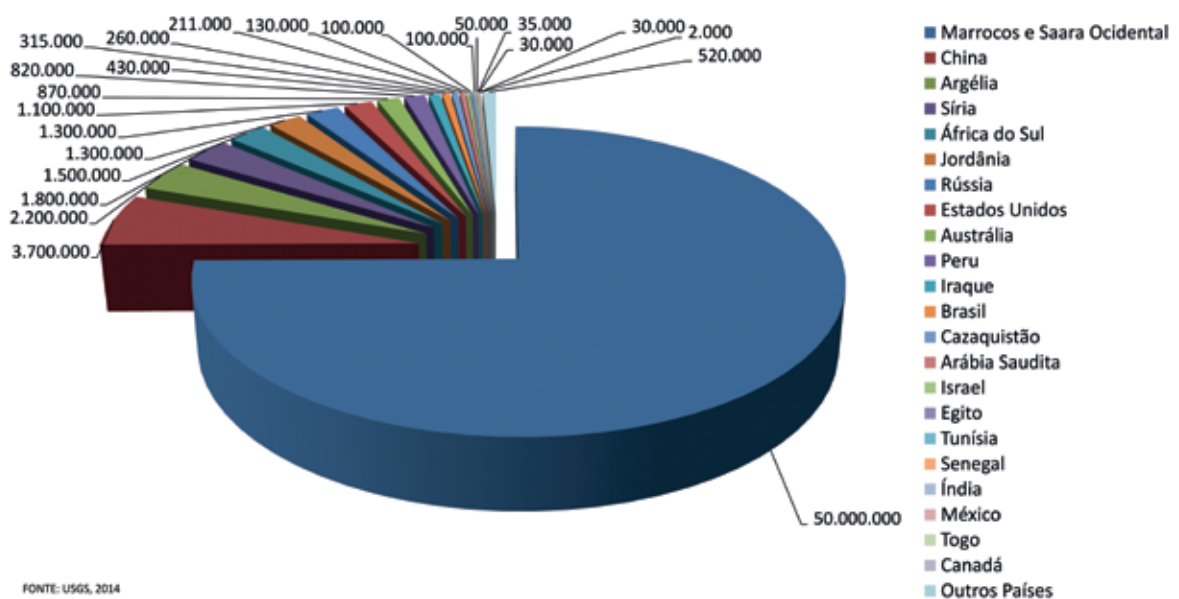


Figura 2

Os maiores depósitos mundiais são sedimentares, normalmente com alto teor (> que 20% P_2O_5) e também grande volume. Os depósitos do norte do Marrocos/ Sahara Ocidental, no norte da África, respondem pela imensa maioria dos recursos existentes. A figura 3 apresenta uma distribuição dos depósitos sedimentares no mundo e destaca alguns mais importantes, a exemplo dos depósitos: (i) cretáceos a paleocênicos

de Bu Craa e Khourigba (no Marrocos/Saara Ocidental), bacia de Djebel Onk (Argélia), Flórida (nos EUA), Bayovar (Peru), Al-Hisa (Jordânia), Abu Tartur (Egito); (ii) paleozoico de Phosphoria Formation (nos EUA) e; (iii) cambrianos a neoproterozoicos de Doushantuo, Kayang e Kunyang (na China), bacia de Khubsugul (na Mongólia), Phosphate Hill (Austrália), dentre outros.

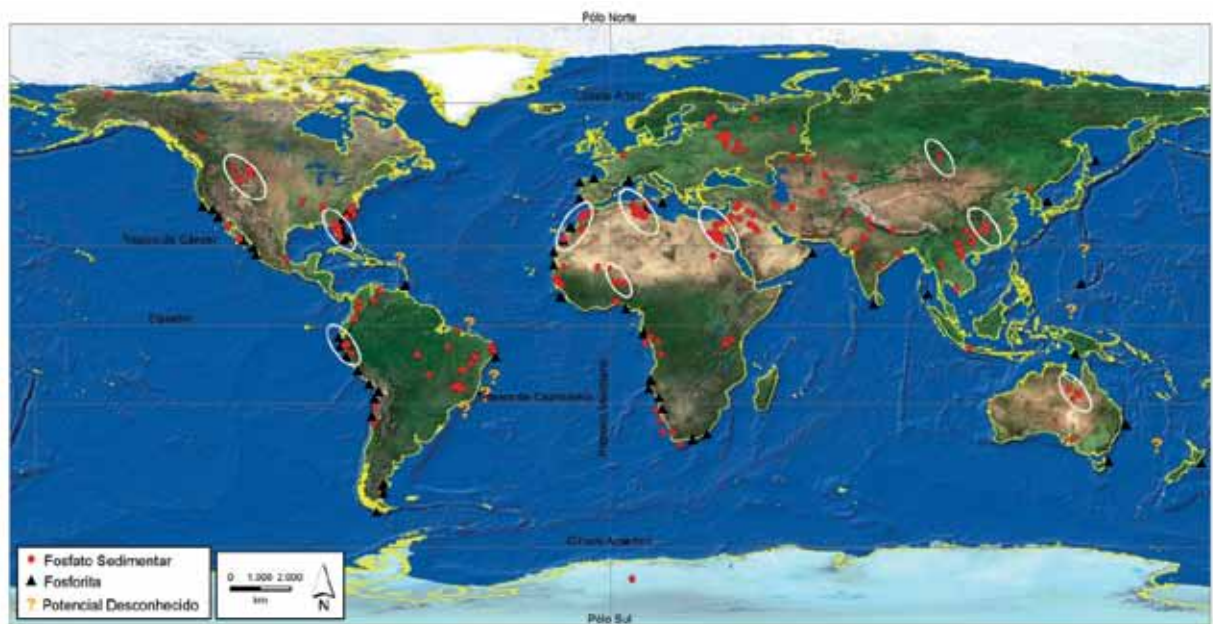


Figura 3 Localização dos principais depósitos mundiais de fosfato sedimentar. Nas elipses brancas destaque para alguns mais importantes: Bu craa e Kourighba (Marrocos/ Saara Ocidental), Djemi Djema e Bled El Hadba (Argélia), Al-Hisa (Jordânia), Doushantuo (China), Bacia de Volta (África), Flórida e Phosphoria Formation (EUA), Bayovar (Peru) e Phosphate Hill (Austrália). (Fonte: FAO, 2004, modificado; BURNETT; RIGGS, 2006; COOK; SHERGOLD, 2005).

Ao contrário do que ocorre no mundo e, apesar do Brasil apresentar um grande número de bacias sedimentares potenciais, os depósitos sedimentares no Brasil representam cerca de 20% das reservas oficiais. Destacam-se os depósitos neoproterozoicos de Rocinha e Lagamar (Minas Gerais), Campos Belos/Arraías (norte de Goiás/Sul do Tocantins) e Irecê (Bahia), todos no contexto geológico dos Grupos Bambuí/Una, além dos depósitos cretáceos de Olinda/Igarassu, Miriri e Lucena (Pernambuco e Paraíba) (Tabela 2), todos associados aos sedimentos terrígenos e carbonáticos das Formações Itamaracá e Gramame da Bacia Paraíba. Os depósitos neoproterozoicos, Bacia Bambuí/Una, podem ser considerados como os de maior valor econômico de fosfato sedimentar no Brasil.

Os depósitos de Rocinha-Lagamar distribuem-se ao longo de uma estreita faixa alinhada NE-SW, a sul do município de Lagamar. Dados econômicos indicam para Rocinha a reserva de 415 milhões de toneladas, com 10 a 15% de P_2O_5 , enquanto que para Lagamar estima-se 5 milhões de toneladas, com 30 a 35% de P_2O_5 (DARDENNE et al., 1986, 1997). Os fosforitos estão associados a unidades do Grupo Bambuí (SIGNORELLI et al., inédito), possivelmente relacionados à Formação Sete Lagoas (PUFAHL et al., 2015). O depósito de Campos Belos/Arraías está também associado ao Grupo Bambuí, claramente sobreposto aos diamictitos glaciais da Formação Jequitai. Está localizado no lado oeste da porção basal da bacia neoproterozoica do Bambuí, Estados de Goiás e Tocantins, atualmente lavrado pela Itafós Mineração Ltda (MBAC). Durante o Projeto Fos-

fato Brasil – Parte I (ABRAM et al., 2011), ocorrências de fosfato foram descobertas na região de Aurora do Tocantins, região oeste desta mesma bacia, e os dados geoquímicos obtidos em sedimentos de corrente ampliaram o potencial da zona mineralizada, mais para norte da bacia. A ampliação da zona mineralizada foi comprovada, a partir de 2012, com os projetos de pesquisa executados nos Prospectos Bonfim (empresa DuSolo) e Taipas (empresa Rialma). Correlato ao Grupo Bambuí, o Grupo Una, no Estado da Bahia, também é conhecido pela presença de depósito econômico de fosfato. Destaca-se o depósito da Bacia de Irecê, Prospecto Três Irmãs, atualmente lavrado pela empresa Galvani, onde a unidade fosfática está relacionada a estromatólitos neoproterozoicos da Formação Salitre.

Durante o Projeto Fosfato Brasil no Estado do Mato Grosso (ABREU FILHO et al., 2011), a CPRM delineou, em parceria com o Governo do Estado do Mato Grosso, o depósito de fosfato e ferro na Formação Serra do Caeté, também associado ao neoproterozoico. Verificou-se que os maiores teores em fosfato ocorrem num ritmo com até 9,49% de P_2O_5 . Toda a faixa aflorante da sequência, com cerca de 50 metros de espessura, é mineralizada. Entretanto, os maiores teores de fosfato foram obtidos próximos a Mirassol d'Oeste. A BEMISA realizou furos de sondagem num dos menores alvos, próximo a Fazenda Barra da Capivara, com definição de recursos potenciais de 400 milhões de toneladas com teor médio de 5% de P_2O_5 . A expectativa é que o volume total possa chegar perto de 1,5 bilhões de toneladas quando avaliado o maior corpo mineralizado.

Tabela 2 Dados econômicos dos depósitos sedimentares brasileiros.

Depósito	Localização	Volume (Mt)	Teor (%)
Rocinha	Minas Gerais (Brasil)	415	10 a 15
Lagamar	Minas Gerais (Brasil)	5	30 a 35
Arraías	Tocantins/Goiás (Brasil)	64,8	5,07
Bonfim	Tocantins (Brasil)	18	6
Irecê	Bahia (Brasil)	40	15 (primário) a 35 (supergênico)
Olinda /Igarassu	Pernambuco (Brasil)	96	18
Miriri	Paraíba (Brasil)	33	8,87
Lucena	Paraíba (Brasil)	55	6
Jauru-Serra do Caeté	Mato Grosso (Brasil)	400	5

(Fonte: DARDENNE; SCHOBENHAUS, 2003; MBAC, 2014; WOSNIAK et al., inédito; AGUIA RESOURCES LIMITED, 2013; BEMISA, 2014; DUSOLO, 2014).

A principal mineralização de fosfato no cretáceo brasileiro compreende os depósitos da Bacia Paraíba (ABRAM et al., 2011), caracterizada por três sub-bacias: Olinda, Alhandra e Miriri, constituídas por sedimentos do cretáceo superior ao paleógeno e coberturas cenozoicas do Grupo Barreiras e Pós-Barreiras. Os depósitos de fosfato compreendem uma faixa descontínua desde a cidade de Olinda (PE) até norte de João Pessoa (PB). A mineralização está relacionada à Formação Itamaracá e à porção basal da Formação Gramame. O depósito de Olinda foi explorado em grande escala pela Fosforita Olinda S.A. Atualmente, os depósitos de Olinda estão relacionados a zonas de ocupação urbana. Entretanto, na bacia Paraíba, destacam-se dois projetos: o projeto Miriri, executado pela CPRM entre 1982 e 1986, na região de Alhandra (PB) e entre Goiana (PE) e Itamaracá (PE), e o Projeto Lucena, da Aguiar Resources Ltda, com uma área de 734 km², avaliado em 2013 e localizado na região entre os municípios de Lucena e Alhandra, no Estado da Paraíba, a aproximadamente 50 km de João Pessoa (PB). No Projeto Lucena foram executados 49 furos de sondagem e estimada uma reserva inferida de 55 Mt (JORC) com teor médio de 6,42% de P₂O₅ (*cut-off* de 3%) (AGUIAR RESOURCES LIMITED, 2013a).

Em termos mundiais, mineralizações significativas em rochas ígneas são encontradas na Rússia, Brasil, Canadá, África do Sul, Finlândia e Zimbábue (Figura 4). Na Rússia, destaca-se o complexo de Khibina (Península de Kola) e, na África do Sul, o depósito de Palabora. Os depósitos magmáticos brasileiros

(com enriquecimento supergênico associado) são depósitos importantes, alguns considerados como de classe mundial dentre os depósitos magmatogênicos. Respondem por cerca de 80% da produção nacional. Uma importante revisão sobre os principais controles metalogenéticos, características e potencial em corpos alcalino-carbonatíticos brasileiros é feita em Ribeiro et al. (2014 *apud* SILVA et al., 2014). Considerando o contexto tipológico, destaca-se o intenso magmatismo alcalino que ocorreu entre o Cretáceo Inferior e o Eoceno, que resultou nos principais depósitos econômicos brasileiros. São intrusões alcalino-carbonatíticas que ocorrem circundando a Bacia do Paraná, encaixadas em zonas de fraqueza e estão relacionadas à evolução dos lineamentos Az 125° e Lancinha/Cubatão e à zona de influência das plumas mantélicas de Trindade e Tristão da Cunha (GOMES et al., 1990). Neste contexto, destacam-se os depósitos de Tapira, Araxá, Catalão/Ouvidor I e II, Salitre I e II, Serra Negra, Cajati (Jacupiranga), Anitápolis e Ipanema (Tabela 3). Ainda neste contexto, nas regiões de Patos de Minas e Presidente Olegário, em Minas Gerais, as rochas alcalinas vulcânicas e vulcanoclásticas da Formação Patos, do Grupo Mata da Corda, foram avaliadas pela Vicenza Mineração. As sondagens realizadas permitiram definir recursos da ordem de 520 milhões de toneladas com teor médio de 3,5% de P₂O₅, no entorno da cidade de Patos de Minas, ainda não viabilizadas economicamente, devido a dificuldades de obtenção de rotas de concentração do minério (GRADIM et al., 2015).



Figura 4 Localização dos principais depósitos de fosfato relacionados a rochas ígneas alcalino-carbonatíticas. (Fonte: BROD, 2008, modificado).

Além destes, destacam-se os depósitos de: (i) Maecuru no Pará do neoproterozoico, ainda não lavrado, por se encontrar inserido no limite da área da Reserva Nacional do Cobre (RENCA), com questões legais regidas pelo Decreto Nº 89404, de 24/02/1984 e; (ii) Angico dos Dias do paleoproterozoico, encaixado no norte do Estado da Bahia (mina da Galvani).

no município de Bagé, entre os corpos Três Estradas, a oeste, e Joca Tavares, a leste.

No final de 2010, a MBAC caracterizou o corpo alcalino-carbonatítico da Serra da Capivara, localidade de Santana, com predomínio de tufos hidrotermalizados e brechas encaixadas em rochas do Grupo Iriri, localizado no sudeste do Estado do Pará. Os recursos

Tabela 3 Uma comparação entre os depósitos de fosfato magmatogênico brasileiros e os maiores depósitos mundiais.

Complexo	Localização	Volume (Mt)	Teor (%)
Khibina (Devon.)	Península de Kola	4000	15
Tapira (Cret.Sup.)	Alto Paranaíba (Brasil)	987	7
Kovdor (Devon.)	Península de Kola	700	7
Catalão I (Cret.Sup)	Alto Paranaíba (Brasil)	600	10
Palabora (Prot.Inf.)	África do Sul	600	7
Araxá (Cret.Sup.)	Alto Paranaíba (Brasil)	560	15
Siilinjärvi	Finlândia	470	4
Sukulu	Uganda	230	13
Cajati (Jacupiranga)	São Paulo (Brasil)	90	6
Anitápolis	Santa Catarina (Brasil)	320	6,41
Maecuru	Pará (Brasil)	200	15
Serra Negra/Salitre	Minas Gerais (Brasil)	908	5 a 11
Ipanema	São Paulo (Brasil)	120	6,07
Juquiá	São Paulo (Brasil)	18	10
Angico dos Dias	Bahia (Brasil)	62,5	8 a 15,4
Santana	Pará (Brasil)	60,36	12,04
Três Estradas	Rio Grande do Sul (Brasil)	70,1	4,2
Mata da Corda	Minas Gerais (Brasil)	520	3,5

(Fonte: BROD et al., 2004; MBACFERT, 2014; AGUIA RESOURCES, 2014).

Novos potenciais para fosfato magmatogênico foram revelados pela CPRM, incluindo a caracterização dos novos corpos alcalino-carbonatíticos de Três Estradas (com recurso inferido estimado pela Aguiá Resources em 70,1 Mt a 4,2% P_2O_5) (AGUIA RESOURCES LIMITED, 2015) e Joca Tavares, no Rio Grande do Sul. Desde então, houve avanços no conhecimento geológico e potencialidade econômica desses corpos, além da descoberta de outros três corpos. As intrusões Picada dos Tocos e Passo Feio, no município de Caçapava do Sul (*Grupo Mining Ventures Brasil*), e o corpo Porteira localizado pela empresa *Aguiá Resources Limited* (AGR), no desenvolvimento do Projeto Rio Grande,

totais estimados para o depósito de fosfato até o momento são constituídos por 60,36 milhões de toneladas de recursos indicados a 12,04% de P_2O_5 e 26,59 milhões de toneladas de recursos inferidos a 5,56% de P_2O_5 (LAGLER et al., inédito).

Somando-se ao quadro de distribuição dos depósitos brasileiros, ainda pode ser destacado o depósito de Itataia, no Estado do Ceará, e os fosfatos aluminosos, NE Pará e NW Maranhão. O depósito U-P de Itataia é considerado a segunda maior reserva de urânio no Brasil, com 142,5 mil toneladas de minério de urânio com teor médio de 0,19% U_3O_8 e 18 Mt de minério de fosfato com teor médio de 26,35% de P_2O_5 . Dos depó-

sitos associados a fosfatos aluminosos no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão são conhecidos pelo menos treze pequenos depósitos, cujas reservas não oficiais são estimadas em torno de 44 Mt, com teores de P_2O_5 que variam entre 0,8 e 29% (OLIVEIRA; COSTA, 1984; CARVALHO et al., 2004).

É importante observar que as reservas mundiais ocorrem principalmente em rochas sedimentares, com teores entre 25-33% de P_2O_5 , cujas características são a maior uniformidade e mineralogia mais simples. Entretanto, as maiores reservas brasileiras ocorrem em rochas ígneas alcalino-carbonatíticas e mantos de intemperismo associados (com fator de enriquecimento de 3 a 4 vezes maior que no primário). Neste caso, com teores médios variando entre 4 e 15% de P_2O_5 , de mineralogia mais complexa, com baixo grau de uniformidade, resultando em um aproveitamento industrial mais complexo e, conseqüentemente, mais custoso. Por este motivo, o preço médio brasileiro de fosfato é relativamente elevado (SOUZA et al., 2009).

Entre 2010 e 2014, novos recursos foram dimensionados e divulgados em *reports* apresentados por empresas privadas em seus *sites* oficiais (AGUIA RESOURCES LIMITED, 2014a; ABRAM et al., Inédito; DUSOLO, 2013; BEMISA, 2011): (i) depósito de Lucena (com recurso estimado pela Águia Resources de 55Mt com teor médio de 6% P_2O_5); (ii) depósito de Santana (com recurso estimado pela MBAC-Itafós de 60,36Mt a 12,04% P_2O_5 e 26,59Mt a 5,56%), (iii) depósito de Três Estradas (com recurso inferido estimado pela Águia Resources em 70,1 Mt a 4,2% P_2O_5) (AGUIA RESOURCES LIMITED, 2015); (iv) depósito de Bonfim (Bacia Bambuí – Estado do Tocantins com recurso estimado pela DuSolo – Eaglestar de 18 Mt a 6% P_2O_5); (v) depósito do Mata da Corda (em Minas Gerais, com recurso estimado pela Vicenza de 520Mt@3,5% P_2O_5); (vi) Projeto Jauru, em Mirassol do Oeste-MT (com recurso estimado pela BEMISA de 400Mt@5% P_2O_5 e uma expectativa de maiores volumes e teores em outro alvo do projeto). O depósito de Miriri, da CPRM, também esteve sujeito a uma revisão considerando novas descrições e *cut-off* de 3%, onde foram obtidos recursos da ordem de 33Mt a um teor médio de 8,87% P_2O_5 (WOSNIAK et al., no prelo).

As reservas totais brasileiras foram revisadas, em Fonseca (2014), configurando uma reserva lavrável oficial com total de 315 Mt de P_2O_5 . Segundo este autor (Op. cit.), entre 2008 e 2013, o DNPM aprovou 22 relatórios finais de pesquisa e uma reavaliação de reservas, demonstrando o interesse das empresas nessa substância.

Produção

Em 2013, a produção mundial de P_2O_5 foi de 224 milhões de toneladas (USGS 2014), que representou um crescimento de cerca de 3% em relação à produção de 2012. Os seis maiores produtores foram China, Estados Unidos da América, Marrocos-Oeste Saara, Federação Russa, Jordânia e Brasil (Figura 5 e Tabela 4), que juntos totalizam cerca de 82% da produção mundial.

Tabela 4 e Figura 5 Produção mundial de fosfato (Fonte: USGS, 2014).

País	Reservas	
China	97.000	1
Estados Unidos	32.300	2
Marrocos e Saara Ocidental	28.000	3
Rússia	12.500	4
Jordânia	7.000	5
Brasil	6.715	6
Egito	6.000	7
Tunísia	4.000	8
Peru	3.900	9
Israel	3.600	10
Arábia Saudita	3.000	11
Austrália	2.600	12
África do Sul	2.300	13
México	1.700	14
Cazaquistão	1.600	15
Argélia	1.500	16
Índia	1.270	17
Senegal	920	18
Togo	900	19
Síria	500	20
Iraque	350	21
Canadá	300	22
Outros Países	5.630	
Total (arredondado)	224.000,00	

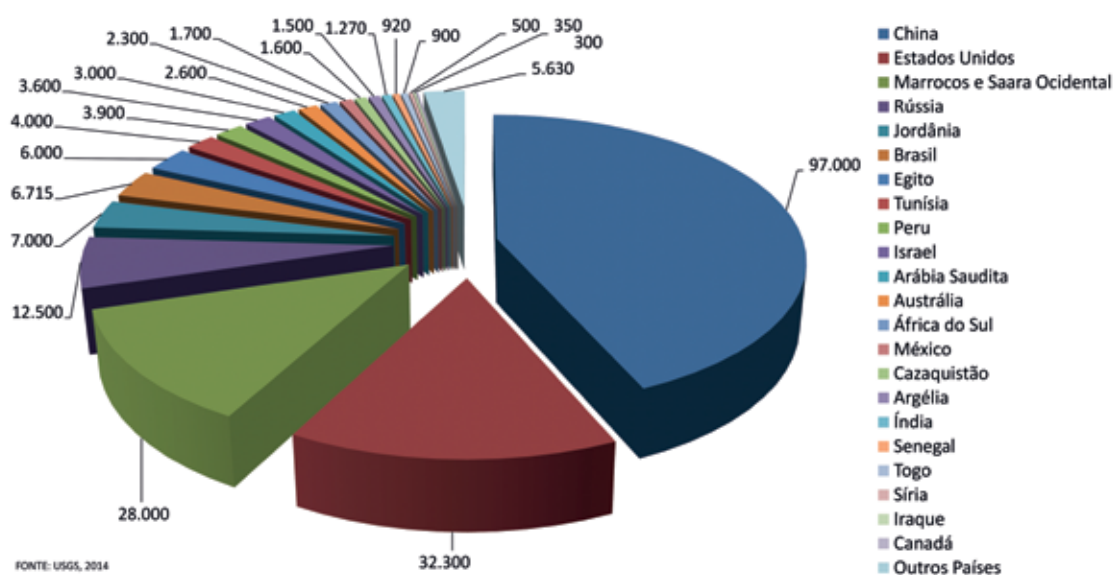


Figura 5

Apesar dos esforços para o aumento da produção nos últimos anos, o Brasil produziu menos em 2013 que em 2012 (FONSECA, 2014). Segundo Fonseca (2014), em 2013, 39 milhões de toneladas de *Run of Mine* - ROM foram extraídos em 10 minas brasileiras. O teor médio desse minério foi de 9,6% de P_2O_5 . Essa produção, beneficiada, resultou em 6,7 milhões de toneladas a um teor médio de 37% de P_2O_5 .

Segundo este mesmo autor (Op.cit.), o Estado de Minas Gerais foi o responsável pela maior produção (49% do fosfato nacional), seguido de Goiás (com 36%), São Paulo (10%), Bahia (4%) e Tocantins com o restante. Em Minas Gerais as operações foram nos municípios de Tapira, Araxá, Patos de Minas e Lagamar. Tapira é o maior produtor de rocha fosfática do Brasil e os municípios de Patrocínio e Serra do Salitre, apesar das extensas reservas, ainda não iniciaram a produção. Em Goiás as operações estão localizadas nos municípios de Catalão e Ouvidor, em São Paulo no município de Cajati e, na Bahia, em Campo Alegre de Lourdes e Irecê. A empresa Vale foi responsável por 71% da produção nacional em 2013 (minas de Catalão, Tapira, Araxá, Cajati e Patos de Minas), seguida por Anglo/Copebrás, com 21%, Galvani, com 7,2% e as empresas MBAC e Socal completam a produção.

Outros projetos estão previstos para entrar em produção até 2017, 2018 (ANDA, 2013; FONSECA, 2014; BRASIL MINERAL 348 e 349, 2015). No Ceará, o consórcio INB/Galvani pretende iniciar a construção da usina de beneficiamento da jazida situada em Santa

Quitéria/Itataia no início de 2015, com previsão de produção de fertilizantes fosfatados e *yellow cake* em 2017, com investimento previsto da ordem de US\$400 milhões. Em Serra do Salitre (MG), a Galvani pretende iniciar a unidade em 2015, na qual deverão ser investidos US\$ 400 milhões, com produção de rocha fosfática de cerca de 1,2 milhões de toneladas/ano e 180 mil toneladas de ácido fosfórico. Em Angico dos Dias, jazida situada em Campo Alegre de Lourdes (BA), a Galvani pretende ampliar a produção de rocha fosfática para 360 mil toneladas/ano, com projeto previsto para operar em 2017, com investimentos menores, em torno de US\$20 milhões. Em Irecê, a mesma empresa prevê a ampliação da produção de rocha fosfática a partir da produção associada ao minério primário (de 100 mil para 200 mil toneladas/ano). Em Patrocínio/Serra do Salitre, a Vale deverá implantar mina e planta com capacidade para a produção de 1,1 milhões de tonelada de rocha fosfática, 500 mil toneladas/ano de superfosfato simples, 330 mil toneladas/ano de superfosfato triplo e 120 mil toneladas/ano de fosfato bicálcico, que representam investimentos da ordem de US\$ 1,150 bilhões. A MBAC inaugurou em 2013 a usina de beneficiamento em Arraias (TO), com capacidade instalada de produzir 500 mil toneladas/ano, mas que produziu no primeiro ano 100 mil toneladas. A viabilidade econômica do projeto de Santana no Pará está sendo estudada e a previsão é que necessite de investimentos da ordem de US\$500 milhões, produzindo, na primeira etapa, 500 mil toneladas/

ano de SSP. A MBAC também apresenta avanços no estudo conceitual do projeto Araxá, prevendo, para 2018, a implantação de mina e planta com produção de 1,5 milhões de toneladas/ano de rocha fosfática e superfosfato simples, 200 mil toneladas/ano de ácido fosfórico, 200 mil toneladas/ano de superfosfato triplo e 100 mil toneladas/ano de fosfato bicálcico (ANDA, 2013). Entretanto, no início de janeiro de 2015, a MBAC colocou a planta de fosfato Itafós, em Arraias (TO), em modo mínimo de produção e estuda a suspensão temporária das operações como medida para conservar capital de giro. A Anglo/Copebrás tem realizado estudos com o objetivo de aumentar a capacidade produtiva em sua jazida de Catalão/Ouvidor (GO) e na usina de Cubatão (SP). A B&A Mineração deverá também produzir o termofosfato em seu projeto Bonito (PA), com previsão de disponibilização de 100 a 150 mil toneladas/ano do produto. A DuSolo Fertilizer adquiriu recentemente uma planta de beneficiamento com capacidade para processar 80 mil toneladas/ano e que pode ser ampliada para 160 mil toneladas/ano para seu projeto Bonfim, prevendo a produção de fertilizante natural para aplicação direta (DANF) com 18% P_2O_5 , no Tocantins (BRASIL MINERAL, 2015). Quarenta mil toneladas desta produção já têm contrato assinado para venda, a um preço médio de R\$250,00 por tonelada.

IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E ESTRATÉGICA PARA O PAÍS

Segundo a Nature (2010), produzir comida suficiente para a população mundial em 2050, a um custo aceitável, dependerá de muitos fatores e será um grande desafio. Cordell et al. (2011) estimam que, por volta de 2050, o mundo terá de 2 a 3 bilhões a mais de bocas para alimentar, além de que aumentará a demanda por biocombustíveis e a necessidade de plantio em áreas com solos cada vez menos férteis. Além disso, ao longo do tempo, os minérios de maior teor estarão esgotados e possivelmente haverá um aumento de impurezas dos depósitos, consequentemente gerando mais poluentes e maiores custos para a indústria extrativa. Com base nestas considerações, Cordell et al. (2011) calculam que, possivelmente, após o período entre 2051 e 2092, não haverá como atender a demanda mundial em fósforo.

De acordo com Cordell e Neset (2014), a escassez de fósforo, ligada à segurança na produção de alimentos nos anos futuros, emerge como um dos principais desafios do século 21, mesmo que ainda pouco es-

tudado quando comparado a grandes desafios como mudanças climáticas, escassez de água, dentre outros. Esta preocupação, segundo os autores, envolve cinco vertentes relacionadas à sustentabilidade: 1) escassez física – relativa à disponibilidade das reservas existentes, recursos finitos e à diminuição de reservas com minério de alta qualidade; 2) econômica – que trata da ausência de acesso ao fósforo devido a restrições em relação a capacidade financeira; 3) gestão imprópria – que se refere ao mal gerenciamento resultante de ineficiências do sistema que limitam o uso do fósforo disponível em relação a demanda existente, como perdas do fósforo na produção de alimento e problemas na cadeia de consumo; 4) institucional – relativa a ausência de uma estrutura de governança global que assegure suprimentos de fósforo, em curto e longo prazo, para as demandas existentes e todos os usuários finalísticos e; 5) geopolítica – que se refere à disponibilidade ou acesso restrito a reservas de fósforo devido a circunstâncias políticas ou geopolíticas tais como monopólios, oligopólios, controlados por governos ou corporações.

O Brasil, que se configura como um dos principais países com áreas agriculturáveis, certamente terá um papel fundamental para assegurar parte da alimentação para a população mundial (NATURE, 2010). Segundo dados da FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura), o Brasil deverá, nos próximos vinte anos, se tornar, junto com os EUA, o maior produtor e exportador mundial de alimentos, bem como deverá figurar no topo como um dos países mais eficientes nesse setor.

Atualmente, o Brasil é o 5º país do mundo em população, com mais de 192 milhões de habitantes. A área total do país é de 8.514.876 km², sendo, desde 2010, o 3º maior produtor agrícola e o 9º maior detentor de florestas plantadas do mundo. Segundo o *International Plant Nutrition Institute* (INPI), o Brasil possui 72,2 milhões de hectares plantados com culturas anuais e perenes (21%) e 172 milhões de hectares com pastagem (50%). O país apresenta um clima diversificado, chuva de certa forma regular, energia solar abundante e quase 12% de toda a água doce disponível no planeta.

O agronegócio brasileiro constitui uma das maiores contribuições para o PIB nacional. Segundo o Ministério da Agricultura, o agronegócio participa aproximadamente com 22% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil e 40% das suas exportações. Entre 2003 e 2013, o volume de exportações do segmento cresceu 2,5 vezes, atingindo, em 2013, o valor recorde de US\$ 99,97 bilhões. No mesmo período, o saldo comercial externo do setor cresceu 3,2 vezes alcançando a mar-

ca de US\$ 82,91 bilhões, compensando o déficit de US\$ 80,35 bilhões dos demais setores e permitindo assim que o país garantisse um superávit global da balança comercial no ano, resultado este, obtido por sete anos seguidos. Segundo o MAPA/ACS (2014), as projeções para 2023/2024 são de uma safra por volta de 252,4 milhões de toneladas, o que corresponde a um acréscimo de 30,4% sobre a atual safra, cujo avanço, exigirá um esforço de crescimento que deve consistir em infraestrutura, investimento em pesquisa e financiamento.

De acordo com a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), as entregas de fertilizantes ao mercado consumidor alcançaram volume recorde no período de janeiro a julho/2014. No total, foram entregues 16,24 milhões de toneladas, o que representa um aumento de 7,2% sobre o mesmo período de 2013. Como a produção nacional caiu, houve um aumento das importações para suprir a demanda interna. Ainda segundo os números da entidade, foram produzidos no país 4,899 milhões de toneladas, com um decréscimo de 9,9% em relação a igual período do ano passado. Foram registradas reduções nas produções de nitrogenados (-8,7%), fosfatados (-9,2%) e potássicos

(-9,6%). As importações, por sua vez, somaram 13,238 milhões de toneladas de janeiro a julho, significando um incremento de 12,8% sobre igual período de 2013, quando ingressaram pelos portos brasileiros 11,734 milhões de toneladas. O aumento das importações teve um incremento de +6,7% para os fertilizantes fosfatados. Conforme o diretor executivo da ANDA, David Roquetti Filho, hoje o Brasil importa cerca de 77% dos fertilizantes que consome, com maior dependência no potássio (96%) e nitrogênio (70%). Nos fertilizantes fosfatados, a dependência é de 57%. Ele acrescentou que atualmente o Brasil responde por cerca de 6% do que é consumido mundialmente de NPK, colocando-se em quarto lugar, atrás de China, Índia e Estados Unidos que, juntos, consomem 62% do total mundial (Tabela 5) (ANDA, 2014).

A evolução do consumo de fósforo no Brasil segue também um padrão de crescimento. Segundo dados do IPNI de 2015, o consumo vem subindo desde 2009 (Figura 6), tendo crescido 67,85% entre 2002 e 2015. O maior consumo de P_2O_5 , por sua vez, ocorreu no Mato Grosso, em virtude da grande área de produção de soja (ANDA, 2010-2013).

Tabela 5 Consumo mundial de fertilizantes.

	NPK	Part.	Nitrogênio	Part.	Fósforo	Part.	Potássio	Part.
1	China	30%	China	33%	China	29%	China	19%
2	Índia	16%	Índia	16%	Índia	20%	EUA	16%
3	EUA	12%	EUA	11%	EUA	10%	Brasil	14%
4	Brasil	6%	Indonésia	3%	Brasil	9%	Índia	14%
5	Indonésia	3%	Paquistão	3%	Paquistão	2%	Indonésia	4%
6	Paquistão	2%	Brasil	3%	Austrália	2%	Malásia	4%
Milhões de t de nutrientes	171		104		40		27	

*BRASIL	NPK	Nitrogênio	Fósforo	Potássio
Consumo	6%	3%	9%	14%
Produção	2%	1%	4%	1%

*Participação do Brasil no consumo mundial (Fonte: ANDA, 2010).

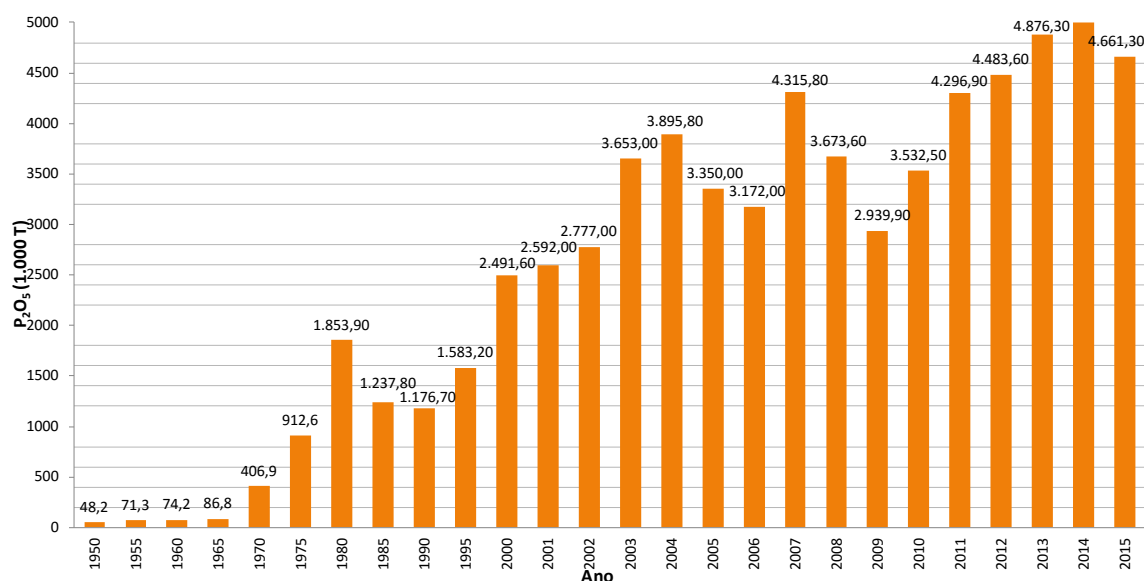


Figura 6 Evolução do consumo aparente de fósforo no Brasil entre 1950 e 2015 (Fonte: IPNI, 2014).

Apesar dos aumentos na produção nos últimos anos, o Brasil ainda continua sendo um grande importador de fosfato (especialmente importado do Peru e Marrocos), o que gera uma vulnerabilidade à nossa agricultura e um déficit crônico no comércio exterior destas commodities. Segundo Fonseca (2014), a questão da dependência brasileira dos fertilizantes tem sido muito debatida desde 2007-2008, quando houve a explosão dos preços internacionais de quase todas as *commodities*. Na verdade, o preço médio dos fertilizantes tem se comportado de forma ascendente desde 2000, com tendência de alta para os períodos subsequentes. Entretanto, em 2008, o mundo entrou em choque quando os preços tiveram uma alta brusca de cerca de 800%, o que demonstrou, mais uma vez, a grande vulnerabilidade em relação ao suprimento de matéria-prima para o agronegócio (Figura 7). Ressaltando-se que o custo com fertilizantes também sofre com atividades de formação artificial do preço com estoques, questões logísticas, fretes marítimos, referente à distância produtor-consumidor e infraestrutura (rodovias, postos, etc.).

Um grande problema quanto às reservas mundiais existentes é que basicamente seis países, Marrocos, China, Argélia, Síria, Jordânia e África do Sul, controlam mais de 90% dos recursos. A produção não é diferente e está também limitada a poucos países, incluindo China, Estados Unidos e Marrocos/Saara Ocidental. A maior parte das reservas concentra-se em países em situações geopolíticas instáveis. O Marrocos constitui um país onde o poder executivo é dividido entre o governo e a monarquia, com predomínio de religião muçulmana sunita e questões político-religiosas ainda instáveis. A Síria vive conflitos atuais e ocupação por integrantes do Estado Islâmico. A China, apesar de possuir as maiores reservas, impõe uma política preferencial para abastecimento do mercado interno. O cenário de vulnerabilidade do Brasil no setor de fertilizantes fica ainda mais grave quando se leva em conta a expansão do consumo de matérias-primas pela China e Índia, o que pode provocar, no médio prazo, a diminuição da oferta no mercado externo. Há um consenso geral a nível mundial, que a qualidade e a acessibilidade irão diminuir cada vez mais em relação



Figura 7 Preço dos fertilizantes fosfatados. (Fonte: WORLD BANK CROSS COUNTRY DATA, 2015).

às reservas existentes e, conseqüentemente, os custos para lavra e produção irão aumentar cada vez mais.

Alguns estudos têm sido realizados visando diminuir essa dependência externa, já que o Brasil poderia aumentar sua produção nacional através de ações estratégicas. Se todos os investimentos previstos até 2018 se confirmarem, com certeza, haverá um aumento significativo na produção, o que amenizaria a nossa dependência a curto e, possivelmente, médio prazo. Segundo Kulaif (2009), caso sejam viabilizadas as novas produções nas reservas brasileiras, estas seriam adequadas para sustentar a autossuficiência do Brasil, considerando projeções até 2030.

Entretanto, entendemos que as medidas tomadas ainda são insuficientes no longo prazo. Dentro deste contexto, o ex-ministro da agricultura Reinold Stephanes acredita que deva haver um incremento da capacidade nacional na lavra de matérias-primas necessárias para a produção de fertilizantes fosfatados, inclusive com novas medidas reguladoras (Projeto de lei nº 8.065, de 2014) e incentivo a novas descobertas de minérios de fosfato. No Plano Nacional de Mineração até 2030 (PNM 2030), programa plurianual do governo federal, ficou clara a preocupação deste em considerar o fosfato um bem mineral estratégico. Foi, então, feito um esforço conjunto entre o Ministério de Minas e Energia (MME) e o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) para instituir um Grupo de Trabalho Interministerial sobre Minerais Estratégicos (GTI-ME - Portaria Interministerial, nº 614 de 30 de junho de 2010). Este grupo teria como finalidade a elaboração de propostas de integração, coordenação e aprimoramento das políticas, diretrizes e ações voltadas para minerais estratégicos, estando incluído o fosfato neste conjunto de ações. Neste contexto foi desenvolvido o Projeto Fosfato Brasil que contabilizou de 2009 até 2014 um investimento de R\$ 9.400.000, por parte do governo federal, e R\$1.600.000, por parte do governo do Mato Grosso, visando a ampliação do conhecimento sobre o potencial brasileiro para fosfato.

Com base no acima exposto, considera-se urgente e estratégico para o Brasil resolver os problemas de pesquisa, com investimentos mais significativos, e lavra de minério de fosfato, a curto, médio e longo prazos, de forma a reverter a vulnerabilidade do agronegócio brasileiro.

PERSPECTIVAS DE AUMENTO DAS RESERVAS

Depósitos Magmatogênicos

No caso do potencial para depósitos magmáticos acreditamos que as pesquisas no Brasil devem ser conduzidas segundo quatro linhas principais: a) viabilização da avaliação de novos projetos em curso; b) potencial para novas descobertas de mineralizações associadas a corpos alcalino-carbonatíticos; c) reavaliação do potencial dos corpos alcalino-carbonatíticos já conhecidos; d) investigação do potencial para fosfato associado a outras tipologias como suítes tipo AMCG (Anortosito-Mangerito-Charnoquito- Granito Rapakivi), dentre outras.

Estímulo na captação de investimentos para avaliação de recursos de projetos existentes e para estudos de rota de processo focados no aproveitamento econômico dos recursos dimensionados

Citamos, como exemplo, as atividades paralisadas de avaliação de recursos nos corpos descobertos, entre 2009 e 2013, de Joca Tavares, Porteira, Picada dos Tocos, Passo Feio, todos no Rio Grande do Sul, e Piedade, em São Paulo. O Carbonatito Joca Tavares está localizado 41 km a ESE do Carbonatito Três Estradas. Sondagem preliminar, com trado motorizado, evidencia o enorme potencial de mais este corpo com interceptos de até 14,7 m @ 10,82% P_2O_5 (AGUIA RESOURCES LIMITED, 2013b). Em amostragem de solo e rocha foram obtidos teores de até 13,7% e 12,45% P_2O_5 , respectivamente. O Carbonatito Porteira ainda é pouco pesquisado, mas o mapeamento e a amostragem confirmaram a mineralização com teores de até 11% P_2O_5 em rocha (AGUIA RESOURCES LIMITED, 2013b). Os Carbonatitos Picada dos Tocos e Passo Feio, localizados pelo Grupo Mining Ventures Brasil, são muito semelhantes ao Carbonatito Três Estradas, em termos de formato, mineralogia e teores (ABRAM et al., 2015). De acordo com Rocha et al. (2013), esses carbonatitos alcançam teores de até 5,44% P_2O_5 e 0,27% TREO (*Total Rare Earth Oxide* – Elementos Terras Raras). Somente o corpo Picada dos Tocos foi sondado e interceptou intervalos de 14,37m @ 3,21% P_2O_5 e 18,60m @ 2,53% P_2O_5 , confirmando o potencial dos corpos encontrados na região sul do Estado do Rio Grande do Sul. Entre 2009 e 2010, a Rudolf Mining descobriu no Estado de São Paulo o carbonatito fosfático de Piedade, onde também foram evidenciadas mais três anomalias, segundo estudos geofísicos pela CPRM, Projeto Fosfato Brasil – Parte I (ABRAM et al., 2011). A empresa tem

tentado a captação de investimentos para avaliação e estimativa de recursos.

Destacamos também o Projeto no Grupo Mata da Corda, avaliado pela Vicenza Mineração. Neste projeto, as sondagens permitiram definir recursos da ordem de 520 milhões de toneladas com teor médio de 3,5% de P_2O_5 no entorno da cidade de Patos de Minas. A mineralização é horizontalizada, a lavra não requer desmonte por explosivos e a relação estéril/minério fica em torno de 0,8. Os principais problemas para o desenvolvimento do depósito são a granulometria muito fina dos minerais-minério e a distribuição do conteúdo de fosfato entre diferentes minerais (i.e apatita e alumino-fosfatos), o que dificulta a obtenção de rotas de concentração do minério.

Potencial para novas descobertas

Os depósitos de fosfato magmatogênico de importância econômica estão associados a complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos, com filiações petrogenéticas tanto sódicas (nefelíníticas) como potássicas (kama-fugíticas). Esta última com maior produção de fosfato associado. As mineralizações de fosfato concentram-se nos ambientes do tipo intra-placa continental e zonas de *rift* em margens divergentes de placa, onde em macro escala, ocorrem os complexos alcalino-carbonatíticos (COX; SINGER, 1986).

Wooley e Kjarsgaard (2008) constituíram um banco de dados contendo as ocorrências de corpos carbonatíticos por continente. Neste trabalho, os autores destacam o pequeno número de carbonatitos da América do Sul (29) quando comparado a outros continentes de dimensão similar, como a América do Norte (112). A conclusão que se tira deste quadro, quando se alia evidências de diversos ambientes tectônicos favoráveis (ambientes tipo *rift* em diversos tempos geológicos e evidências de zonas de fraqueza importantes relacionadas a zonas de impacto de plumas mantélicas), é que o Brasil ainda possui um potencial inequívoco para novas descobertas. Neste sentido, houve investimentos significativos por parte do governo brasileiro para gerar informações geofísicas básicas (ressaltando-se ainda a necessidade de investimento na cobertura geofísica de alta resolução em regiões de bordas de algumas bacias sedimentares brasileiras), importantes para definição de anomalias a serem investigadas e atrair novos investimentos para o setor. Entretanto, ressaltam-se, como restrições, a necessidade de investimentos privados numa fase de crise mundial na área de mineração e o alto custo das atividades de sondagem no Brasil.

Tabela 6 Número de ocorrências de carbonatito por continente.

Número de ocorrências de carbonatitos por continente		
	Número de ocorrências conhecidas	Percentual do total de ocorrências conhecidas
África	171	35%
América do Norte	112	22%
América do Sul	29	5%
Antártica	1	
Ásia	160	30%
Austrália	11	2%
Europa	35	6%
Ilhas Oceânicas	8	1%
Total	527	

(Fonte: WOOLEY; KJARSGAARD, 2008).

Reavaliação do potencial dos corpos alcalino-carbonatíticos já conhecidos

Neste contexto, citamos dois exemplos: a reavaliação do carbonatito da Fazenda Varela, do Distrito Alcalino de Lages (MANFREDI et al., 2015) e o corpo de Morro Preto (NAVARRO, 2014), na Província Alcalina de Goiás. No carbonatito Fazenda Varela, a rocha apresentou, em estudos anteriores (SCHEIBE, 1979, 1985; MANFREDI et al., 2013), valores anômalos de P_2O_5 ($\approx 14\%$) e ETR ($>1\%$). Esta área foi reavaliada pelo Projeto Fosfato Brasil e os dados de geoquímica de solo mostraram altos valores de ETR e de P, indicando alto potencial para depósitos de elementos de interesse estratégico. Diferentemente do que se pensava anteriormente, o carbonatito não ocorre em forma de veios, ele é um corpo circular formado pelo morro norte e pelo morro oeste divididos por uma falha, que corta o carbonatito ao meio, com direção de 60°SE . Uma das intrusões delineadas na Província Alcalina de Goiás, a de Morro Preto, caracterizada pela CPRM em Pena e Figueiredo (1972) como composta por ultrabásicas muito silicificadas, de pequena dimensão, tem sido alvo de investigações pela Anglo American com resultados positivos para fosfato (ANGLO AMERICAN, informação verbal). O Morro Preto corresponde a uma pequena intrusão subcircular com cerca de $3,34\text{ km}^2$ que ocorre na região de Piranhas, entre os rios Piranhas e Caiapó.

De maneira genérica, foram descritos, por Navarro (2014), carbonatitos silicificados, lamprófiros hidrotermalizados, níveis quartzo-ferruginosos, aegirina sienitos, rocha alcalina ferruginizada, além de basaltos alcalinos. Carbonatitos silicificados apresentados em Navarro (2014) demonstraram teores em P_2O_5 variáveis de 11 a 34%.

Investigação do potencial para fosfato associado a outras tipologias (normalmente fosfato como subproduto) como suítes tipo AMCG (Anortosito-Mangerito-Charnoquito-Granito Rapakivi), dentre outras.

As suítes do tipo AMCG - Anortositos, Mangeritos, Charnockitos e Granitos *rapakivi* mostram importantes depósitos de Fe-Ti-P na América do Norte e na Finlândia, assim como no Complexo Anortosítico de Havre-Saint-Pierre, com destaque para a região de *Allard Lake* (CHARLIER et al., 2010), com 3 massas separadas de um norito rico em ilmenita, um destes (Depósito de Puyalon) com 230 Mt / 17,9% Fe, 10,8% TiO_2 e 3% P_2O_5 (NOTHOLT et al., 1989) e o projeto *Lac à Paul Apatite*, na região de Saguenay-Lac-St-Jean, em Quebec, Canada, com 307 Mt @ 6,6% P_2O_5 (CASSOE, 2012). No Cráton Amazônico, granitos *rapakivi* de idade mesoproterozoica têm sido reconhecidos no leste de Rondônia - Suíte Serra da Providência (BETTENCOURT et al., 1999; PAYOLLA et al., 2002), em Roraima, a sudoeste de Boa Vista - Suíte Serra da Prata-Mucajaí (FRAGA et al., 2003), no sudoeste do Amazonas - Batólito Igarapé Preto e São Francisco (ABDALLAH, 2008) e noroeste do Estado de Mato Grosso - Suíte Rio do Sangue (LEITE et al., 2010). No projeto Fosfato Brasil, na região a norte do Repartimento, foram caracterizados alvos com potencial para fosfato associado a rochas gabronoríticas/anortosíticas da Suíte Mucajaí/Anortosito Repartimento, em Roraima, sugerindo um potencial a ser melhor investigado no Brasil.

Depósitos Sedimentares

O Brasil, em praticamente toda sua extensão territorial, apresenta um grande número de bacias sedimentares (37 bacias considerando-se bacias interiores, intracratônicas e da margem continental brasileira, somando-se a estas as bacias paleo e neoproterozoica potenciais), cujo conhecimento é muito variável e com diversas seções marinhas favoráveis a acumulação de fosforitos. A maior parte dos estudos em bacias sedimentares tem como foco principal a pesquisa de petróleo e a PETROBRAS/ANP detém o maior número de informações a respeito.

O Brasil apresenta eventos de fosfogênese correlacionáveis ao tempo geológico dos grandes depósitos existentes no mundo, com destaque aos de maior importância econômica conhecida, que são as fosfogêneses do Neoproterozoico, das bacias cronocorrelatas Bambuí e Una (Estados do Tocantins, Goiás, Bahia e Minas Gerais), e do Cretáceo da bacia Paraíba (Estados de Pernambuco e Paraíba). Entretanto, considerando-se o Brasil e a margem continental associada, pode-se dizer que os eventos de fosfogênese estão registrados desde o Cenozoico, em mar aberto (Alto do Rio Grande e platôs do Ceará e Pernambuco), e do Cretáceo até o Paleoproterozoico, no continente (Tabela 7). Através dos investimentos do governo brasileiro foram desenvolvidas ações no conhecimento do potencial para depósitos sedimentares nas bacias: i) neoproterozoicas da Formação Serra do Caeté, dos Grupos Corumbá, Araras, Rio Pardo, Bambuí, Una e Estância na Faixa Sergipana; ii) nas seções silurianas e devonianas das bacias do Parnaíba, Amazonas e Alto Tapajós; iii) no Cretáceo das bacias Paraíba e Potiguar. Nas bacias neoproterozoicas, foi possível ampliar a potencialidade da Bacia Bambuí, local onde ocorre o depósito de Campos Belos, associado à Formação Sete Lagoas, que se encontra sobreposta aos diamictitos glaciais da Formação Jequitá, localizado no lado oeste da porção basal da bacia neoproterozoica do Bambuí (Goiás e Tocantins), atualmente lavrado pela Itafós Mineração Ltda (MBAC). Durante o Projeto Fosfato Brasil – Parte I (ABRAM et al., 2011), ocorrências de fosfato foram descobertas na região de Aurora do Tocantins, a oeste da Bacia Bambuí, e os dados geoquímicos obtidos em sedimentos de corrente ampliaram o potencial da zona mineralizada, mais para norte da área mineralizada. A ampliação da zona mineralizada tem sido comprovada, a partir de 2012, com os projetos de pesquisa executados nos Prospectos Bonfim (empresa DuSolo) e Taipas (empresa Rialma). Na Bacia Corumbá novos alvos foram delimitados com prospecção geoquímica regional. Na bacia de Araras/Formação Serra do Caeté foi delineado pela CPRM/Estado do Mato Grosso, o depósito de Mirassol D'Oeste, Projeto Jauru no Estado do Mato Grosso, avaliado pela BEMISA. Neste caso, com recursos dimensionados, mas com dificuldades na viabilização econômica. Nesta jazida, o fosfato é uma hidroxiapatita, muito fina e intercalada com ferro, e foram realizados testes de concentração visando avaliar a capacidade do depósito para a produção de fertilizantes fosfatados, estudos de caracterização tecnológica na Universidade de São Paulo (USP) e testes de processo na Fundação Gorceix e na Univer-

sidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Os resultados demonstraram a viabilidade técnico-econômica para produção de concentrado fosfático e de fertilizantes fosfatados. Entretanto, estudos para obtenção de rotas de concentração ainda são necessários. No Grupo Una, no Estado da Bahia, foi delimitada uma camada de estromatólitos com potencial para fosfato com cerca de 8 km de extensão. Em 2014, a Aguiar Resources Ltda descobriu novas ocorrências de fosfato sedimentar (fosfato de Cerro Preto) no Rio Grande do Sul, o que possivelmente configura um novo depósito e potencial para fosfato neste Estado, demandando novos investimentos para avaliação de recurso. As ocorrências estão inseridas no Terreno São Gabriel, Cinturão Metamórfico Vacacaí, associadas ao Complexo Metamórfico Arroio Marmeleiro (CAMOZZATTO et al., 2012), uma sequência atribuída ao neoproterozoico. No Paleozoico, o Brasil possui importantes registros de fosfogênese, Bacias Parnaíba, Amazonas, Paraná e Alto Tapajós (ABRAM et al., 2015), mas com potencial econômico efetivo ainda desconhecido. Acreditamos que novos esforços governamentais/privados são necessários com investimentos em sondagem exploratória para elucidar pontos importantes para a caracterização de potenciais econômicos. Um marco radioativo no topo

da Formação Jandaíra, bacia Potiguar, foi investigado por Matsuda (1988). Ocorrências de fosfato foram destacadas por este autor (Op.cit) em amostras de calha de poços de petróleo associadas a sedimentos carbonáticos do Cretáceo Superior. O potencial deste marco radioativo em subsuperfície está sendo investigado pela CPRM-Serviço Geológico do Brasil.

Na margem continental brasileira e na área internacional do Atlântico Sul foram documentadas ocorrências de fosforitos nos platôs do Ceará e Pernambuco e no Alto do Rio Grande. Nos platôs do Ceará e Pernambuco, as ocorrências foram reveladas, na década de 1970, pela Petrobras, com teores de até 18% P₂O₅. No Alto do Rio Grande as ocorrências foram reveladas recentemente pelo projeto “Avaliação da Potencialidade Mineral da Elevação do Rio Grande”, desenvolvido pela CPRM na área internacional do Atlântico Sul, onde as rochas fosfáticas normalmente estão recobertas pelas crostas ferromanganesíferas (CFM) ricas em cobalto, com teores de 7 a 16% P₂O₅.

Outras perspectivas estariam relacionadas a novos projetos *greenfield* considerando o universo de possibilidades frente a ambiências geológicas favoráveis no Brasil.

Tabela 7 Eventos de fosfogênese que ocorreram no Brasil.

Mesozoico	Cretáceo Superior	• Olinda/Igarassu/Miriri (Formação Itamaracá-Bc. Paraíba) • Carmópolis - Formação Cotiguiaba (Bc. Sergipe-Alagoas) • Alto do Macau (Formação Jandaíra-Bc. Potiguar)
Paleozoico		• Rio Verde e Jaguaraiá - Formação Ponta Grossa (Bacia Paraná) • São Miguel do Tapuio (Formação Pimenteiras-Devoniano Bc. Parnaíba) • Aroazes - Ocorrências na Fm. Longá (Devoniano) / Pedra de Fogo (Permiano) da Bc. do Parnaíba • Monte Alegre, Itaituba, Uruará e Altamira, (Grupo Curuá - Devoniano da Bc. do Amazonas) Corumbataí (Formação Corumbataí - Permiano da Bc. do Paraná) • Apuí (Formação Juma - Siluro-devoniano da Bc. Alto Tapajós)
Proterozoico	Neoproterozoico	• Cedro do Abaeté, Irecê, Umburanas, Coromandel, Arraías, Taipas, Aurora do Tocantins, Monte Alegre de Goiás, Rocinha, Lagamar (Bc. Bambuí-TO/GO/MG/BA) • Patamutê (Grupo Estância-Faixa Sergipana-BA) • Xambioá (Grupo Estrondo-TO) • Bodoquena (Grupo Corumbá-Fms. Bocaina e Tamengo, MS) • Pacu e Faz. Serra Azul (Grupo Araras-MT) • Mirassol D'Oeste (Formação Serra dos Caetés-MT) • Santa Quitéria - hidrotermal ? (Unidade Independência-Grupo Itaitaia-CE) • Cerro Preto - Complexo Arroio Marmeleiro (Escudo Sul-rio-grandense-RS)
	Paleo/Mesoproterozoico	• Conceição do Mato Dentro (Formação Sopa Brumadinho)
	Paleoproterozoico	• Serrote da Batateira (Complexo Rio Salitre)

(Fonte: ABRAM et al., 2011, modificado).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A demanda mundial por fósforo é crescente em todo o mundo. A escassez de fósforo prevista para os anos futuros constitui um grande desafio mundial e a expectativa é que o Brasil deverá ser um dos grandes fornecedores mundiais de alimentos. O agronegócio brasileiro tem uma grande participação no PIB nacional, o que destaca a sua importância para a economia brasileira. A demanda por fósforo no Brasil é cada vez mais crescente e constitui uma situação crítica para a saúde do agronegócio brasileiro. O Brasil apresenta um potencial para a ampliação da produção e da reserva nacional através da implantação de novos projetos de produção, descoberta de novos depósitos minerais e reavaliação de potenciais já conhecidos, com perspectiva de aumento das reservas. Em 2008, a projeção das necessidades de produção de rocha fosfática, considerando-se como meta a autossuficiência em 2015, se daria com a adição de mais 4 a 5 milhões de toneladas à produção de 2008, que era de 6 milhões/ano, que seria na época o montante dos novos projetos anunciados (KULAIF, 2009). Ou seja, os investimentos foram insuficientes, os entraves foram grandes e as previsões não aconteceram.

Há necessidade de investimentos mais vultosos na pesquisa para novos depósitos minerais, por parte do governo federal e da iniciativa privada (além de aumentar o recurso existente, novas descobertas poderão forçar uma descentralização do polo produtivo no sudeste e centro-oeste brasileiro e uma melhor distribuição aos consumidores finais) e para expansão da capacidade produtiva nacional. Neste sentido, poderão ser estimulados fóruns de discussão específica aliando governo e empresariado nacional, com a participação de consultores estrangeiros e outros setores da economia nacional. Adicionalmente, ressalta-se a necessidade de governança em relação ao bom uso dos fertilizantes, de investimentos em infraestrutura para redução de custos ao consumidor final, incentivos fiscais e linhas de crédito específicas, além da necessidade em se estabelecer nova regulação junto ao DNPM (órgão regulador e fiscalizador da mineração) que facilitem a realização de empreendimentos de pesquisa e lavra para este bem mineral, desestimulando a especulação.

Agradecimentos

À Academia Brasileira de Ciências pelo convite e a Antônio José Dourado Rocha e Reginaldo Alves dos Santos (CPRM) pelas revisões realizadas no texto.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, S. Distribuição e Ocorrência do Magmatismo Serra da Providência - Uma Associação Tipo AMCG na Porção Oeste do Cratón Amazônico. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, Curitiba. *Anais*. 44 p. 2008.
- ABRAM, M.B.; BAHENSE, I.; PORTO, C.G.; BRITO, R.S.C. (Org.) Projeto Fosfato Brasil – Parte I. Salvador: CPRM. Informe de Recursos Minerais, *Série Insumos Minerais para a Agricultura*, v. 13. Programa Geologia do Brasil. 570 p., p. 485-518. 2011
- ABRAM, M.B.; BAHENSE, I.C.; ALMEIDA, R. C. Projeto Fosfato Brasil Parte II (orgs.) – Salvador: CPRM. Informe de Recursos Minerais, *Série Insumos Minerais para Agricultura*, v. 15. 2015.
- ABREU FILHO, W.; BORGES, F. R.; ABRAM, M.B. Projeto Fosfato Brasil - Estado de Mato Grosso: Áreas Araras/ Serra do Caeté e Planalto da Serra. Goiânia: CPRM. *Informe de Recursos Minerais*, v. 14. 2011.
- AGUIA RESOURCES LIMITED. *Lucena Phosphate Project* - April, 2013. In: ASX Release. Sidney, Austrália. Disponível em: <www.aguiaresources.com.au>. 2013a.
- AGUIA RESOURCES LIMITED. *Quarterly Report* - June, 2013. In: ASX Report. Sidney, Austrália. Disponível em: <www.aguiaresources.com.au>. 2013b.
- AGUIA RESOURCES LIMITED. *New phosphate discovery in southern Brazil* - 2013. In: ASX Release. Sidney, Austrália. Disponível em: <www.aguiaresources.com.au>. 2013c.
- AGUIA RESOURCES LIMITED. *Annual Report* - 30 June 2014. Sidney, Austrália. Disponível em: <www.aguiaresources.com.au>. 2014a.
- AGUIA RESOURCES LIMITED. *Building a Brazilian Fertilizer Company*. Apresentação para investidores em setembro de 2014. Disponível em: < www.aguiaresources.com.au>. 2014.b
- AGUIA RESOURCES LIMITED. *Agua Discoveries New High Grade New Phosphate Mineralization at The Rio Grande Project* - Outubro 2014. In: ASX Report. Sidney, Austrália. Disponível em: <www.aguiaresources.com.au>. 2014c.
- AGUIA RESOURCES LIMITED. *Positive Preliminary Economic Assesment Demonstrates Robust Economics For Três Estradas* - August 2015. In: ASX Release. Sidney, Austrália. Disponível em: <www.aguiaresources.com.au>. 2015.
- ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. Anuário estatístico do setor de fertilizantes, São Paulo, 2013.
- ANDERSON J.L.; MORRISON J. The role of anorogenic granites in the Proterozoic crustal development of North America. In: CONDIE K.C. (Ed.) *Proterozoic Crustal Evolution*. Elsevier, 1992, Amsterdam, p. 263-299.
- BEMISA. *Projeto Jauru*. Disponível em: <http://www.bemisa.com.br/pt-br/nossosprojetos/Jauru.aspx>. Acesso em 14 de maio de 2015.
- BETTENCOURT, J.S.; TOSDAL, R.M.; LEITE, W.B.; PAYOLLA, B.L. Mesoproterozoic rapakivi granites of the Rondonian Tin Province, southwestern border of the Amazon Craton, Brazil-I. Reconnaissance U-Pb geochronology and regional implications. 1999, *Prec. Res.*, 95: 41-67.
- BRASIL MINERAL: Mineração, Metalurgia, Siderurgia, Petróleo - nº 348 - Fevereiro de 2015. Acesso em 14 de maio de 2015. IBBN 0102-4728.
- BRASIL MINERAL: Mineração, Metalurgia, Siderurgia, Petróleo - nº 349 - Março de 2015. Acesso em 14 de maio de 2015. IBBN 0102-4728.
- BROD, A. *Curso de Jazidas Magmáticas de Fosfato*. Goiânia: CPRM, 2008. Apresentação em Power Point.
- BROD, J.A.; RIBEIRO, C.C.; GASPAS, J.C.; JUNQUEIRA-BROD, T.C.; BARBOSA, E.S.R.; RIFFEL, B.F.; SILVA, J.F.; CHABAN, N.; FERRARI, A.L.D. Excursão 1: Geologia e Mineralizações dos Complexos Alcalino-Carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42. 2004, Araxá-MG. *Guias de Excursões*. Araxá: SBG, 2004. [CD-ROM].
- BURNETT, W.C.; RIGGS, S.R. (Eds.) *Phosphate Deposits of the World*. v. 3 Neogene to Modern Phosphorites. Cambridge University Press. 2006.
- CAMOZZATO, E.; LOPES, R.; PHILLIP, R.P.; KLEIN, C. (Org.). *Geologia e Recursos Minerais da Folha Hulha Negra*, SH.22-Y-C-I, Estado do Rio Grande do Sul, escala 1:100.000. Porto Alegre: CPRM, 2012. (Programa Geologia do Brasil) (Inédito).
- CARVALHO, J.M.A.; MACAMBIRA, E.M.B.; VIGLIO, E.P.; KLEIN, E.L.; COSTA, E.J.S.; BARBOSA, J.P.O.; ROSA-COSTA, L.T.; VASQUEZ, M.L.; REZENDE, N.G.A.M.; ARAUJO, O.J.B.; RICCI, P.S.F.; RODRIGUES, J.L.B.; JORGE-JOÃO, X.S. *Programa Mineração e Desenvolvimento Sustentável*: distritos mineiros do Estado do Pará. Belém: DNPM, 2004. Programa Nacional de Distritos Mineiros. Convênio DNPM/ CPRM. [CD-ROM].
- CASTLE, C.; SANDERS, L.; JENNINGS, D.; MAMHEW, S. *Catham Rock Phosphate*. Chatam Islands. 2012, Project Presentation.
- CASSOE, J. *Lac à Paul Apatite Project Pre-Feasibility Study*. 2012. Disponível em: <http://www.minesight.com/>. Acesso em 14 de maio de 2015.
- CAVALCANTI, J.A.D.; BESSA, M.D.M.R. Depósito fósforo-uranífero de Itataia: um depósito paleocárstico hidrotermal de idade cretácea, relacionado com a abertura do oceano Atlântico (síntese). In: ABRAM, M.B.; BAHENSE, I.C.; ALMEIDA, R. C. (Org), 2015. *Projeto Fosfato Brasil Parte II*. Programa Geologia do Brasil, Salvador, BA.
- CHARLIER, B.; NAMUR, O.; MALPAS, S.; DE MARNEFFE, C.; DUCHESNE, J.C.; VANDER AUWERA, J.; BOLLE, O. Origin of the giant Allard Lake ilmenite ore deposit (Canada) by fractional crystallization, multiple pulses and mixing. *Lithos* 117, p. 119-134. 2010.
- COOK, P.J.; SHERGOLG, J.H. Proterozoic and Cambrian phosphorites. In: BURNETT, W.C.; RIGGS, S.R. (Eds.) *Phosphate Deposits of the World*, v. 3. Neogene to Modern Phosphorites. Cambridge University Press. 2005.
- CORDELL, D.; DRANGERT, J.O.; WHITE, S. The Story of Phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change Journal*. 2009.
- CORDELL, D.; NESET, T.S.S. Phosphorus vulnerability: A qualitative framework for assessing the vulnerability of national and regional food systems to the multidimensional stressors of phosphorus scarcity. *Global Environmental Change* v. 24, p.108-122. 2014.

- CORDELL, D.; WHITE, S.; LINDSTRÖM, T. Peak phosphorus: the crunch time for humanity? *The Sustainability Review*, v. 2, n. 2, abr. 2011. Disponível em: <<http://www.thesustainabilityreview.org/2011/04/peak-phosphorus-the-crunch-time-for-humanity/>>. Acesso em 5 de julho de 2011.
- COX, D.P.; SINGER, D.A. Mineral Deposit Models: U.S. *Geological Survey Bulletin*, 379 p. 1986.
- DARDENNE M.A.; FREITAS-SILVA F.H.; dos SANTOS G.M.; SOUZA J.F.C. Depósitos de Fosfato de Rocinha e Lagamar, Minas Gerais. In: SHOBENHAUS C.; QUEIROZ, E.T.; COELHO C.E.S. (Eds.). *Principais depósitos minerais do Brasil – Rochas e minerais Industriais*. Brasília: DNPM. 4v, (v. 4c), p. 113-122. 1997.
- DARDENNE M.A.; TOMPETTE R.R.; MAGALHÃES L.F.; SOARES L. A. Proterozoic and Cambrian phosphorites - regional review: Brazil. In: COOK P.J.; SHERGOLD J.H. (Eds.). *Phosphate deposits of the world. Proterozoic and Cambrian Phosphorites*, London, Cambridge University Press, 1986, p. 116-131.
- DUSOLO FERTILIZERS. *Bomfim Project*. Disponível em: <<http://www.dusolo.com/projects/bomfim/>>. Acesso em 14 de maio de 2015.
- FERNANDES, R. *Brazilian Phosphate Fertiliser Market Trend - Fertiliser Latino Americano 2013 - São Paulo 20-22 January 2013 - CEO, Niobium and Phosphates*.
- FONSECA, D.S. *Fosfato*. Sumário Mineral Brasileiro Brasília: DNPM. 2014.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Use of Phosphate Rocks for Sustainable Agriculture. *Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 13*, Natural Resources Management and Environment Department. 2004. Roma. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/007/y5053e/y5053e00.htm#Contents>>. Acesso em 14 de maio de 2015.
- FRAGA, L.M.; DALL'AGNOL, R.; MACAMBIRA, M.J.B. The Mucajaí Anorthosite-Mangerite-Rapakivi Granite (AMG) Complex, North Amazonian Craton, Brazil. *Geophysical Research Abstracts*, 5:14489, 2003. [CD-ROM].
- GOMES, C.B.; RUBERTI, E.; MORBIDELLI, L. Carbonatite complexes from Brazil: a review. *J. South Am. Earth Sci.*, v. 3, p.51-63. 1990.
- GRADIM, C.T.; RAMOS, J.; MELLO, R.; ROLIM, V.K. Mineralização De Fosfato no Grupo Mata da Corda, Minas Gerais. In: ABRAM, M.B.; BAHENSE, I.C.; ALMEIDA, R. C. (Org), 2015, *Projeto Fosfato Brasil Parte II*.
- HAAPALA, I.; RAMO, O.T. Geology of the rapakivi granites - a review. In: DALL'AGNOL, R.; MACAMBIRA, M.J.B.; COSTI, H.T. (Eds.). *Symposium on Rapakivi Granites and Related Rocks*, Abstract Volume. Center for Geosciences, Federal University of Pará, Belém, Brazil, 1995, p. 4-5.
- HEFFER, P.; PRUD'HOMME, M. *Fertilizer Outlook 2014-2018 - International Fertilizer Industry Association (IFA)*, Paris – France, 2014.
- INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE. *Agricultura brasileira*. Disponível em: <<http://brasil.ipni.net/article/BRS-3001>>. Acesso em 10 de fevereiro de 2015.
- JUNIOR CANATO, N.; LUCENA, P.V.; BELGER, R.B.; MORETZSOHN, R.; BONAGURA, L.A.; GALVANI JR. R. Indústria Nacional de Matéria Prima para Fertilizantes. In: Terceiro Congresso Brasileiro de Fertilizantes – ANDA. 2013.
- KUNTZ, T. *Peak Phosphorus*. The New York Times, December 28, 2010.
- LAGLER, B.; TEDESCO, M.A.; OLIVEIRA, A.S.D.; JULIANI, C.; WARING, M.H. Geologia do Depósito de Fosfato Serra da Capivara – São Félix Do Xingu, Pará. In: ABRAM et al., *Projeto Fosfato Brasil Parte II*. Programa Geologia do Brasil, Salvador, BA. 2015.
- LAPIDO-LOUREIRO, F.E.V.; MELAMED, R. O fósforo na agroindústria brasileira. In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V. et al. *Fertilizantes, agroindústria e sustentabilidade*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. p. 257-304.
- LEITE, J.A.D.; SOUSA, M.A.A.; BATATA, M.E.F.; COSTA, A.C.D. Suíte Rio do Sangue: registro de uma associação AMCG no sudoeste do Cráton Amazônico, noroeste do Estado de Mato Grosso. São Paulo, *Rev. bras. geociênc.* v.40, no.1. 2010. ISSN 0375-7536.
- LINKÖPING UNIVERSITET. *Vulnerability to future phosphorus shortage: Key ingredient to modern farming*. ScienceDaily. 2014. Disponível em: <www.sciencedaily.com/releases/2014/02/140203083830.htm>. Acesso em 14 de maio de 2015.
- MANFREDI, T.R.; MEDEIROS, D.A.; MENESES, A.R.A.S. O Potencial de Fosfato e ETR do Carbonatito Fazenda Varela (Correia Pinto, SC). In: ABRAM et al. *Projeto Fosfato Brasil- Parte II*. Programa Geologia do Brasil, Salvador, BA. 2015.
- MANFREDI, T. R.; BASTOS NETO, A.C.; PEREIRA, V.P.; BARBANSO, L.; SCHUCK, C. The parisite-(Ce) mineralization associated with the Fazenda Varela carbonatite (Correia Pinto, SC). *Revista Pesquisa em Geociências*, v. 40, p. 295-307, 2013.
- MATSUDA, N.H. *Caracterização Petrográfica, mineralógica, geoquímica e paleoambiental da anomalia radiotiva associada a rochas carbonáticas da Formação jandaíra do Cretáceo Superior da bacia Potiguar, Rio Grande do Norte-Brasil*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 1988.
- MBAC FERTILIZER CORP. *Assets Overview*. Disponível em: <<http://mbacfert.com/assets/overview/default.aspx>>. Acesso em 14 de maio de 2015.
- MCDONOUGH, W.F.; SUNS, S. The composition of the earth. *Chemical Geology*, n.120, 223-253, 1995.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). *Projeções do Agronegócio: Brasil 2013/2014 a 2023/2024 projeções de longo prazo / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Assessoria de Gestão Estratégica. – Brasília: MAPA/ACS, 2014. 100 p. ISBN 978-85-7991-086-9 1.*
- NATURE. How to feed a hungry world, *Nature*, v.466, p. 531-532. 2010. 1ª. Publicado em 28 de julho de 2010.
- NAVARRO, G.R.; ZANARDO, A.; CONCEIÇÃO, F.T.; ANGELI, N. Intrusão Alcalina de Morro Preto (GO): Geologia, Petrografia e Geoquímica. São Paulo, Universidade Estadual Paulista, *Geociências*, v. 33, n. 1, p.39-60 , 2014.
- NOTHOLT, A.J.G.; SHELDON, R.P.; DAVIDSON, D.F. *Phosphate deposits of the world*. Phosphate Rock Resources, v. 2. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 1989. 566 pp.

- OLIVEIRA, N.P.; COSTA, M.L. Os fosfatos aluminosos do Pará e do Maranhão: estágio atual de conhecimentos e estratégia para o aproveitamento econômico. *Ciências da Terra*, v. 10, 1984. p.16-19.
- PAYOLLA, B.L.; BETTENCOURT, J.S.; KOZUCH, M.; LEITE JR, W.B.; FETTER, A.H.; VAN SCHUMUS, W.R. Geological Evolution of the basement rocks in the east-central part of the Rondonia Tin Province, SW Amazonian Craton, Brasil: U-Pb and Sm-Nd isotopic constraints. *Precambrian Research*, v. 119, 2002. P.141-169.
- PENA, G.S.; FIGUEIREDO, A.J. de. *Projeto Alcalinas – Relatório Final*. Goiânia: DNPM/CPRM, 143 p. (Conv. DNPM/CPRM), 1972.
- PUFAHL, P.; ABRAM, M.B.; MORAES FILHO, J.C.; BRILHANTE, J.R.; PORTO, C.G. (no prelo) -Correlação Preliminar de Rochas Sedimentares Fosfáticas do Grupo Bambuí nas Regiões de Campos Belos TO/GO e Lagamar - MG, Bacia São Francisco. In: ABRAM, M.B.; BAHENSE, I.C.; ALMEIDA, R.C. (Org). *Projeto Fosfato Brasil Parte II*, CPRM, 2015.
- RIBEIRO, C.C.; BROD, J.A.; BROD, T.C.J.; GASPAR, J.C.; PALMIERI, M.; GRASSO, C.B.; BARBOSA, E.S.R.; BARBOSA, P.A.R.; FERRARI, A.J.D.; GOMIDE, C.S. Potencial e Controles Metalogenéticos de ETR, Ti e Nb em Províncias Alcalino-Carbonatíticas Brasileiras. In: SILVA, M.G.; ROCHA NETO, M.B.; JOST, H.; KUYUMJAN, R.M. *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. Programa Geologia do Brasil, Série Metalogenia, 2014 p.559-589.
- ROCHA, A.M.R. da; DORNELES, N.T.; GINDRI, M.D.; VARGAS, J.M.; ALVES, T. C.; BENETTI, F.A. Descoberta dos carbonatitos Picada dos Tocos e Passo Feio e o potencial para fosfato e ETR's, Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. In: *Anais do III Simp. Bras. de Metalog.*, Gramado, RS. 2013.
- ROSE, A.W.; HAWKES, H.E.; WEBB, J.S. *Geochemistry in mineral exploration*. Academic Press, Londres, 1979. 637 p.
- SCHEIBE, L. F. *Estudo Petrológico e Geoquímico dos carbonatitos da Fazenda Varela, SC*. Dissertação de Mestrado em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências. 120 f. 1979.
- SCHEIBE, L. F.; KAWASHITA K.; GOMES, C. B. Contribuição à geocronologia do Complexo Alcalino de Lages, SC. In: Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 2, 1985. Florianópolis, *Anais...* Florianópolis: SBG, v. 1, p.299-307
- SIGNORELLI, N.; PINHO, J.M.M; TULLER, M.P.; BAPTISTA, M.C.; BRITO, D.C. (Org). *Projeto Paracatu-Vazante I*; Escala 1:100.000, BH: CPRM, 2015. Programa Geologia do Brasil, (inédito).
- SOUZA, A.E; FONSECA, D.S. Fosfato. In: RODRIGUES, A.F.S. *Economia mineral do Brasil*. Brasília: DNPM, 2009. p. 546-568.
- UNITED NATIONS. World Population Prospects: The 2012 Revision. *Key Findings and Advance Tables*, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2013. New York.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. *Phosphate Rock Statistics and Information 2014*. Reston, Virginia, US: USGS, 2014. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/>. Acesso em 23 março de 2015.
- WOOLLEY, A. R.; KJARSGAARD, B. A. Carbonatite Occurrences of the World: Map and Database. Geological Survey of Canada, *Open File Report* 5796, 2008.
- WOSNIAK, R.; SILVA, C.R.; GRISSOLIA, E.; OLIVEIRA, R.G.; PORTO, C.G; SILVA, L.G.; SILVA, G.A.; RODRIGUES, E.; ALMEIDA, R.C.; ABRAM, M.B. *Projeto Miriri*. Relatório de Reavaliação do Patrimônio Mineral, 2015 (inédito).
- WINDLEY, B.F. Proterozoic anorogenic magmatism and its orogenic connections, *J. Geol. Soc. Lond*, v.150, p. 39-50, 1993.

Minério de níquel sulfetado no Brasil

João Batista Guimarães Teixeira

Consultor Independente - Grupo de Metalogênese,
Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia,
Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia

RESUMO

Os principais países produtores de níquel nos últimos cinco anos foram: Filipinas (18,46%), Indonésia (15,06%), Rússia (13,97%), Austrália (11,42%) e Canadá (10,94%). O crescimento da economia mundial no início da década de 2000 gerou o aumento da produção do níquel metálico, que atingiu 1,416 milhões de toneladas em 2007. O Brasil apresentou uma expansão de 14,5% no volume de suas reservas e uma retração de 24,9% na produção de níquel no período 2013-2015. Três depósitos de níquel sulfetado encontram-se em produção no país: Americano do Brasil, em Goiás; Fortaleza de Minas, em Minas Gerais e o depósito de Santa Rita, na Bahia. A escassez de depósitos de níquel sulfetado no Brasil pode ser creditada a uma série de fatores, dentre eles a carência de mapas geológicos de detalhe ou em escala adequada e a ausência de levantamentos básicos de prospecção, envolvendo geofísica, geoquímica e sensoriamento remoto.

Palavras-chave Níquel. Sulfetado. Depósitos brasileiros.

INTRODUÇÃO

O níquel metálico é extraído de dois tipos de jazidas: depósitos de minérios sulfetados (primários), que constituem 30% das reservas mundiais, e depósitos de minérios lateríticos (oxidados), que totalizam 70% das reservas. Os minérios lateríticos constituíam a principal fonte de níquel desde 1864, quando foram descobertos os depósitos nas ilhas da Nova Caledônia (Oceania). A importância econômica dos minérios sulfetados teve início com a descoberta dos depósitos de Sudbury (Canadá), em 1883. Com a entrada em produção das minas de sulfetos maciços de Kambalda (Austrália), em 1966, os minérios de níquel sulfetado passaram a dominar o mercado.

Os minérios sulfetados são de origem magmática e, além do níquel, possuem em sua composição sulfetos de cobre, cobalto e ferro, assim como alguns metais preciosos (elementos do grupo da platina - EGP, prata e ouro). Todos os depósitos de sulfetos magmáticos são espacial e geneticamente relacionados a corpos de rochas máficas ou ultramáficas. Os sulfetos normalmente constituem um pequeno volume da rocha hospedeira, sendo dominados por associações de pirrotita (Fe_7S_8), pentlandita ($[\text{Fe}, \text{Ni}]_9\text{S}_8$) e calcopirita (CuFeS_2) (NALDREDDT, 2004).

APLICAÇÕES

O níquel é amplamente utilizado na indústria metalúrgica, por sua capacidade de aprimorar as propriedades industriais dos metais e ligas aos quais ele é adicionado. Hoje são catalogadas mais de três mil ligas de

níquel que são utilizadas tanto na indústria quanto no uso doméstico. Estatisticamente, metade do níquel disponível é utilizado em processos siderúrgicos. As ligas de níquel são úteis na proteção de materiais, sob forma de revestimentos niquelados, na fabricação de polos elétricos em cubas eletrolíticas, esmaltes e recipientes de armazenamento dos derivados de petróleo. A maior parte da produção mundial de níquel é destinada à produção de **aço inoxidável**, que é uma liga constituída principalmente por ferro, com 18% de cromo e 8% de níquel. Este é usado nas mais diversas aplicações desde as mais simples, como material de cozinha, até em obras que requerem grande resistência e durabilidade, como trilhos ferroviários ou componentes de plataformas de prospecção e produção de petróleo. Outras ligas de níquel de larga aplicação são as seguintes:

- O **Monel**, uma liga de níquel e cobre cuja característica principal é a extrema resistência à corrosão, especialmente em água salgada, sendo por isso bastante utilizada na indústria naval e petrolífera. Por ser quimicamente inerte em meio ácido, esta liga é também utilizada na indústria alimentícia.
- As ligas **Inconel**, que demonstram grande resistência à corrosão sob tensão em soluções cloretadas e também em meios quimicamente básicos (cáusticos) e meios ácidos redutores e diluídos.
- As ligas de **nicromo**, que contêm 15-20% Cr, 19-80% Ni sendo o restante ferro, são constituintes comuns nos elementos de resistência de chuveiros, ebulidores, secadores de cabelo, torradeiras e fornos elétricos.

- As **superligas de níquel**, que foram inventadas na década de 1930, com características de elevada resistência mecânica, boa resistência à fadiga e à fluência, boa resistência à corrosão e capacidade de operar continuamente em elevadas temperaturas. Além das turbinas de jatos, as superligas de níquel encontram aplicações variadas em altas temperaturas, como em motores de foguetes e veículos espaciais em geral, reatores nucleares, submarinos, usinas termoeletricas e equipamento da indústria petroquímica.

MERCADO MUNDIAL

O crescimento da economia mundial no início da década de 2000 gerou o aumento da produção do níquel metálico, que atingiu 1,416 milhões de toneladas (t) em 2007. Entretanto, ainda naquele ano, a indústria chinesa iniciou a produção de aços inox série 200, um novo tipo de aço inoxidável contendo Cr e Mn, que requer menores concentrações de níquel do que os aços comuns. Outro substituto, também desenvolvido na China, é o gusa-níquel (*Nickel Pig Iron* -NPI), formado pela fusão do minério laterítico, tendo como resultado uma liga de ferro-níquel de alto teor. Além da produção de NPI na China, vários projetos de ní-

quel foram iniciados em todo o mundo, incluindo os projetos brasileiros de Barro Alto (GO) e Onça-Puma (PA), com capacidade combinada de mais de 100.000 t por ano, ao atingirem plena produção.

No período de 2008 a 2009, instalou-se a crise econômica internacional, causando forte retração nas atividades de mineração. Como resultado, ocorreu a diminuição na produção de níquel, que decaiu para 1,32 milhões de toneladas. Em 2011, a produção mostrou um leve crescimento para 1,810 milhões de toneladas. Em 2014, foi observada a expressiva redução de 10% no total da produção de níquel eletrolítico (Tabela 1).

Os principais países produtores de níquel nos últimos cinco anos foram: Filipinas (18,46%), Indonésia (15,06%), Rússia (13,97%), Austrália (11,42%) e Canadá (10,94%). De acordo com o DNPM (2014), o Brasil apresentou uma expansão de 14,5% no volume de suas reservas e uma retração de 24,9% na produção de níquel no período 2013-2015.

Em janeiro de 2014, o governo da Indonésia proibiu a exportação de minérios brutos, inclusive de níquel laterítico. Por este motivo, o preço do metal voltou a subir até o segundo semestre do mesmo ano, quando entrou novamente em queda, atingindo hoje valores em torno de USD13,000/t, os mais baixos dos últimos anos. A Figura 1 mostra o gráfico da evolução do preço do níquel em USD por tonelada nos últimos cinco anos.

Tabela 1 Principais países produtores de níquel no mundo 2010-2014 (em toneladas métricas).

País	Reservas (t)	Produção (t)				
		2010	2011	2012	2013	2014
Austrália	18.000.000	170.000	215.000	246.000	234.000	220.000
N. Caledônia	12.000.000	59.100	109.000	132.000	164.000	165.000
Brasil	10.371.000	130.000	131.000	139.000	138.000	126.000
Rússia	6.100.000	269.000	267.000	255.000	275.000	260.000
Cuba	5.500.000	70.000	71.000	68.200	66.000	66.000
Indonésia	3.900.000	232.000	290.000	228.000	440.000	240.000
África do Sul	3.700.000	40.000	44.000	45.900	51.200	54.700
Canadá	3.300.000	158.000	220.000	205.000	223.000	233.000
China	3.000.000	79.000	89.800	93.300	95.000	100.000
Madagascar	1.600.000	15.000	5.900	8.250	29.200	37.800
Filipinas	1.100.000	173.000	270.000	424.000	446.000	440.000
Colômbia	1.100.000	72.000	76.000	84.000	75.000	75.000
R. Dominicana	970.000	3.100	21.700	15.200	15.800	---
TOTAL	70.641.000	1.470.200	1.810.400	1.943.850	2.252.200	2.017.500

(Fonte: DNPM, 2014).

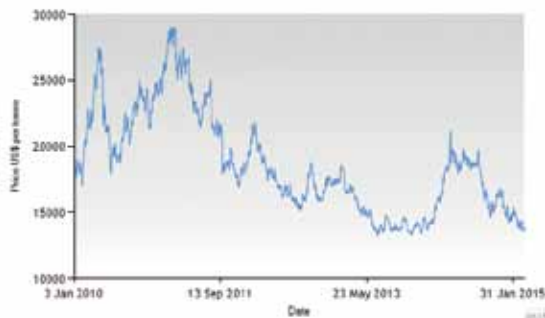


Figura 1 Diagrama mostrando a evolução do preço do níquel eletrolítico em dólares americanos por tonelada (Fonte: LONDON METAL EXCHANGE, 2015).

DEPÓSITOS DE NÍQUEL SULFETADO NO BRASIL

Hoje em dia, apenas três depósitos de níquel sulfetado encontram-se em produção no país: Americano do Brasil, em Goiás; Fortaleza de Minas, em Minas Gerais e o depósito de Santa Rita, na Bahia (Figura 2)

Depósito de Ni-Cu-Co de Americano do Brasil

O complexo máfico-ultramáfico de Americano do Brasil é formado por uma intrusão acamadada, sin-orogênica, localizada a noroeste de Goiânia. O corpo é de natureza alóctone e apresenta dimensões aproximadas de 15 ×

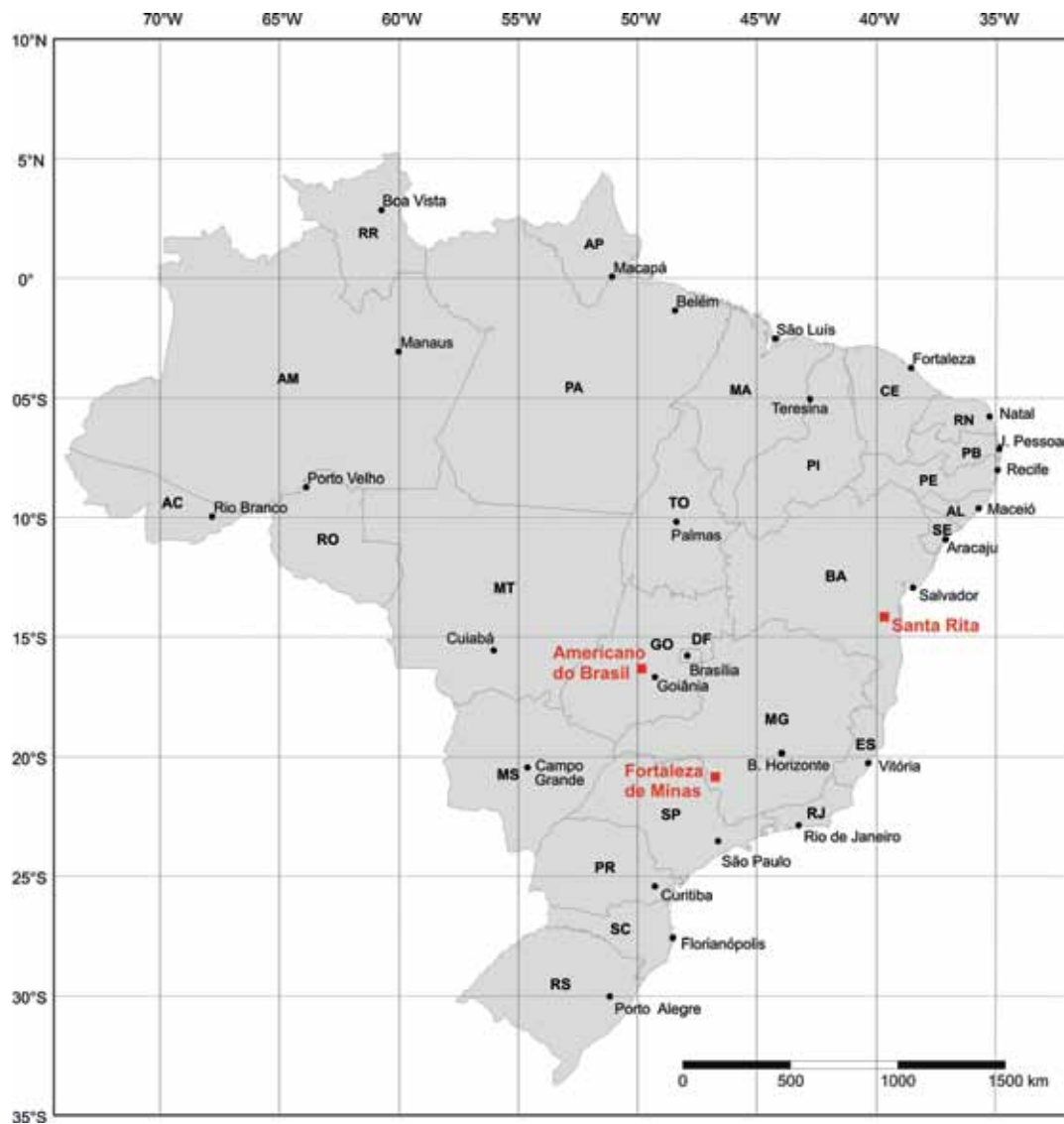


Figura 2 Localização dos três depósitos de níquel sulfetado que se encontram atualmente em produção no Brasil (Fonte: Elaborada pelo autor).

3 km, mostrando-se alongado na direção leste-oeste. Esta intrusão é associada a um conjunto de cerca de vinte outras intrusões correlatas do Arco Magmático de Goiás, formadas durante o Ciclo Orogênico Brasileiro (0,67-0,60 Ga).

Os principais tipos litológicos do depósito são cumulados que variam de dunito, peridotito, piroxenito, hornblendito a diversos tipos de rochas gabróicas. Estes formam duas sequências com composição e evolução distintas, denominadas, respectivamente, Sequência Norte e Sequência Sul. O depósito é formado por quatro corpos de minério, chamados S_1 , S_2 , S_3 e

G_2 . O corpo de minério S_1 , hospedado por websterito e gabronorito na sequência mais fracionada do complexo, forma um conjunto de vários corpos irregulares e descontínuos de sulfetos de Ni-Cu disseminados (Figura 3). Estes corpos apresentam características como geometria, teores, relações de contato e estruturas próprias, bem como diferentes posições espaciais dentro do complexo (SILVA et al., 2011). Americano do Brasil tem reservas estimadas em 5,0 Mt de minério, a teores de 0,62% Ni, 0,65% Cu e 0,04% Co (NILSON et al., 1986).

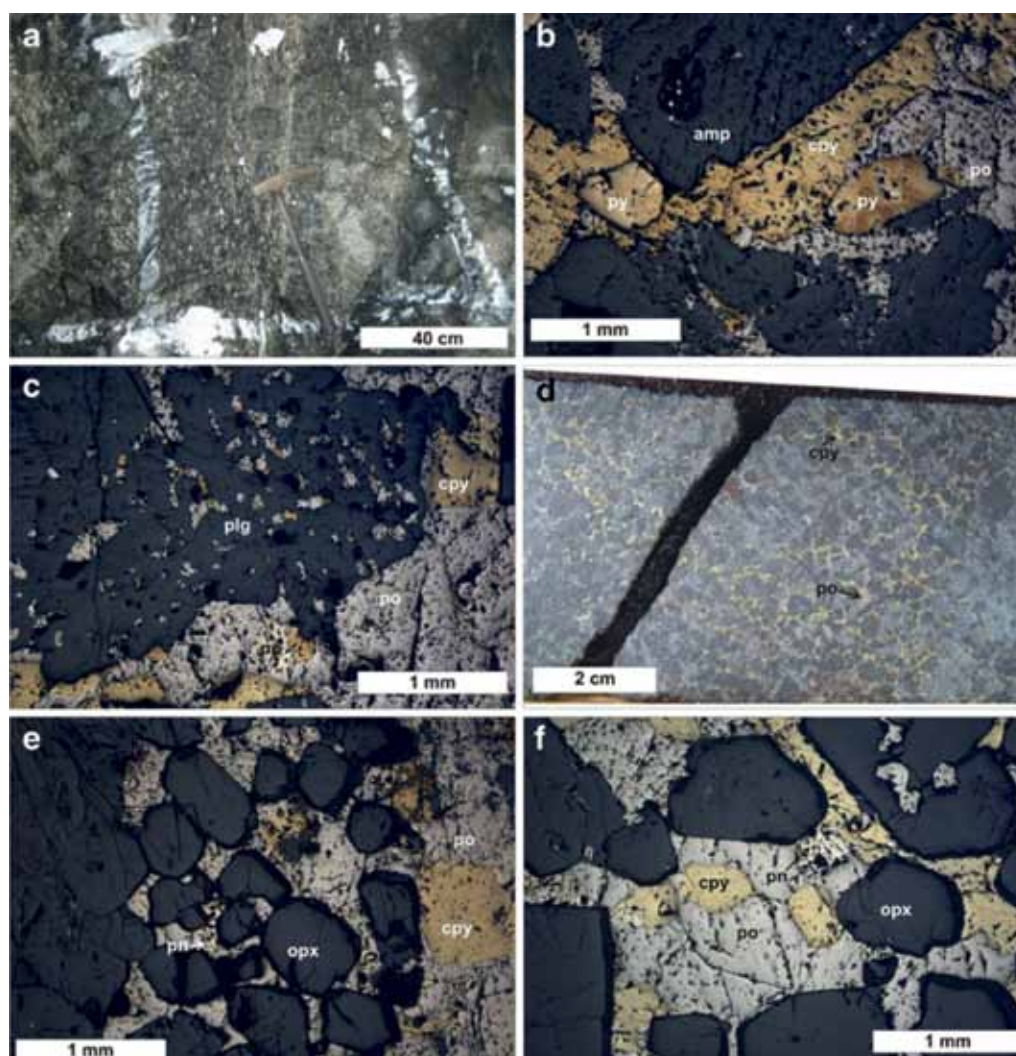


Figura 3 (a) Sulfetos disseminados no corpo de minério S_1 de Americano do Brasil; (b) fotomicrografia de sulfetos mostrando grãos arredondados de pirita circundados por pirrotita e calcopirita; (c) fotomicrografia plagioclásio intercumulus intimamente associado a sulfetos; (d) minério com textura reticulada, em testemunho de sondagem; (e) fotomicrografia de contato gradacional entre sulfetos maciços e grãos de ortopiroxênio; (f) fotomicrografia de sulfetos intersticiais e cristais cumulados de ortopiroxênio (Fonte: SILVA et al., 2011).

Depósito de Ni-Cu-Co-Pt-Pd-Au de Fortaleza de Minas

O depósito de Fortaleza de Minas localiza-se na região sudoeste do Estado de Minas Gerais, a cerca de 350 km de Belo Horizonte. O depósito é hospedado em rochas komatiíticas do mesoarqueano (2,86 Ga) pertencentes ao *greenstone belt* Morro do Ferro, que foi afetado pelo metamorfismo e intrusões graníticas do paleoproterozoico (2,2-1,9 Ga), bem como pela deformação neoproterozoica (~ 0,6 Ga). O *greenstone belt* é circundado por migmatitos do Complexo Barbacena (3,3-2,7 Ga) e parcialmente coberto por rochas metassedimentares do neoproterozoico. O depósito tem o formato tabular e contém três tipos de minérios. O mais importante consiste de minério vulcanogênico maciço e disseminado, seguido por venulações de sulfetos tectonicamente remobilizados e também por veios hidrotermais tardios (Figura 4). Os minerais de minério compreendem pirrotita, pentlandita, calcopirita, cobaltita-gersdorffita, EGP e magnetita. As reservas são estimadas em 10 Mt com teores de 2,5% Ni, 0,4% Cu, 500 ppm de Co e 0,7 g/t Pt, Pd e Au (CARVALHO; BRENNER, 2010).

Depósito de Ni-Cu-Pt-Pd de Santa Rita

O depósito de Santa Rita associa-se ao complexo máfico-ultramáfico da Fazenda Mirabela, uma intrusão paleoproterozoica localizada no sudeste da Bahia, próximo à cidade de Ipiaú. O Complexo Mirabela situa-se a leste do Cráton do São Francisco, hospedado em rochas arqueanas na porção sul do Cinturão Itabuna-Salvador-Curaçá. A intrusão apresenta um formato elipsoidal em superfície, com eixo maior medindo cerca de 4,4 km na direção nordeste e eixo menor com cerca de 2,3 km na direção noroeste. Resultados isotópicos U-Pb em zircão indicaram idades radiométricas de 1990 ± 28 Ma para a cristalização deste complexo (LAZARIN, 2012).

O depósito de Ni-Cu-EGP de Santa Rita corresponde a um nível sulfetado que acompanha o acamamento magmático do Complexo Mirabela em toda a sua extensão. Esse horizonte sulfetado localiza-se na parte superior da Zona Ultramáfica, com espessura variável entre 40 e 200 metros e extensão lateral superior a 2 km. A mineralização consiste de disseminações de sulfeto distribuídas desde o dunito, na base, até o ortopiroxenito, no topo, com predomínio de harzburgito,

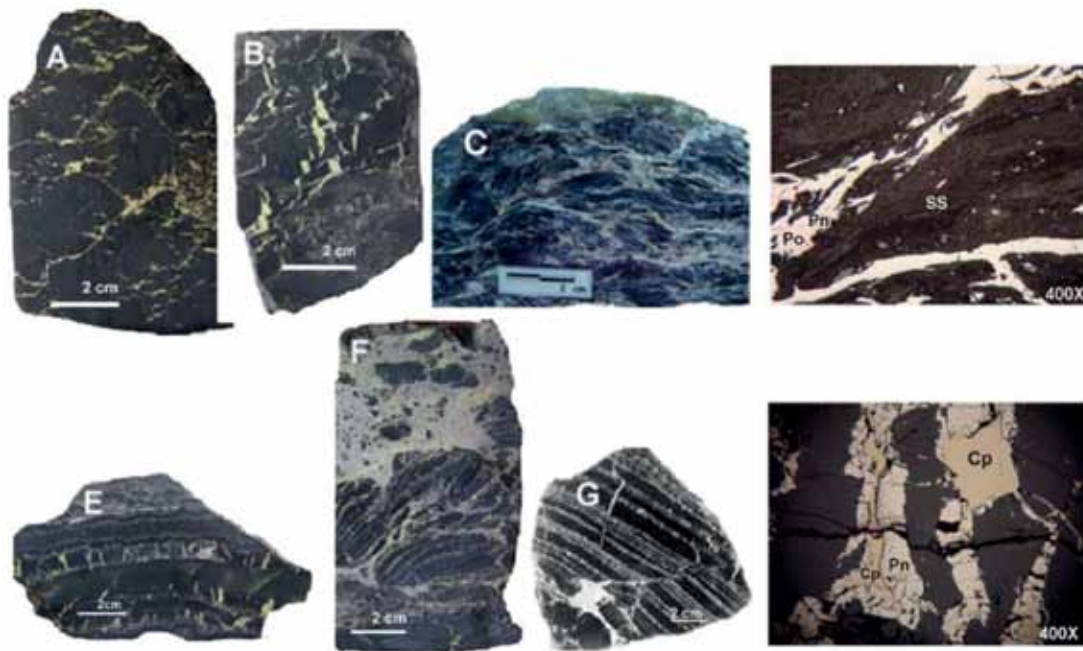


Figura 4 Variedades de minérios remobilizados de Fortaleza de Minas. (A) Minério de pirrotita, calcopirita e pentlandita em fraturas de serpentinito; (B) minério em serpentinito; (C) minério cisalhado com leitos de sulfetos na foliação milonítica de serpentinito e talco xisto; (D) minério com remobilização de pirrotita e pentlandita em fraturas do serpentinito; (E) minério com alternância de leitos de silicatos, óxidos e sulfetos; (F) aparência geral do minério de formação ferrífera da lapa do corpo mineralizado; (G) formação ferrífera da fácies sulfeto transformada em minério por injeções de minério maciço; (H) minério com veios de pentlandita e calopirita remobilizados em fraturas de formação ferrífera (Fonte: CARVALHO; BRENNER, 2010).

olivina ortopiroxenito e ortopiroxenito (Figura 5). As reservas são estimadas em 18 Mt de minério, com 0,50% Ni, 0,20% Cu e 0,35 g/t de Pt + Pd (FERREIRA FILHO et al., 2013).

PANORAMA DO MERCADO BRASILEIRO

De acordo com dados da ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, em 2006, o Brasil produziu 36.300 t de níquel. A produção mundial naquele ano foi de 1,3 Mt. As exportações alcançaram 24.000 t e as importações atingiram 6.000 t. Os investimentos em curso na época foram da ordem de US\$4,0 bilhões. Em outubro de 2006, a Vale iniciou o processo de aquisição da INCO, grande produtora de níquel no Canadá.

Segundo dados do Plano Nacional de Mineração 2030, do Ministério de Minas e Energia, em 2008, o Brasil ocupava o 13º lugar no mundo, atingindo a marca de 67.000 t de níquel. A oferta mundial naquele ano foi

da ordem de 1,6 Mt, tendo Rússia, Canadá e Indonésia como os principais produtores. As duas principais empresas produtoras no Brasil eram a Votorantim e a Anglo American, com três complexos metalúrgicos produzindo *matte* de níquel, liga FeNi, carbonato de níquel e níquel eletrolítico.

A Vale iniciou a implementação do projeto Onça Puma, no Pará. Outro importante projeto de níquel entrou em fase de implementação pela Anglo American, em Barro Alto (GO). O tipo de minério desses projetos é predominantemente laterítico. Outros projetos de níquel que entraram em fase de implantação foram Vermelho (PA) e São João do Piauí (PI), da Vale, e Jacaré (PA), da Anglo American.

A empresa Mirabela Mineração iniciou suas operações em 2009 na Mina Santa Rita, em Itagibá (BA), produzindo sulfeto de níquel para exportação (50%) e comercializando o restante para produção metálica no Brasil.

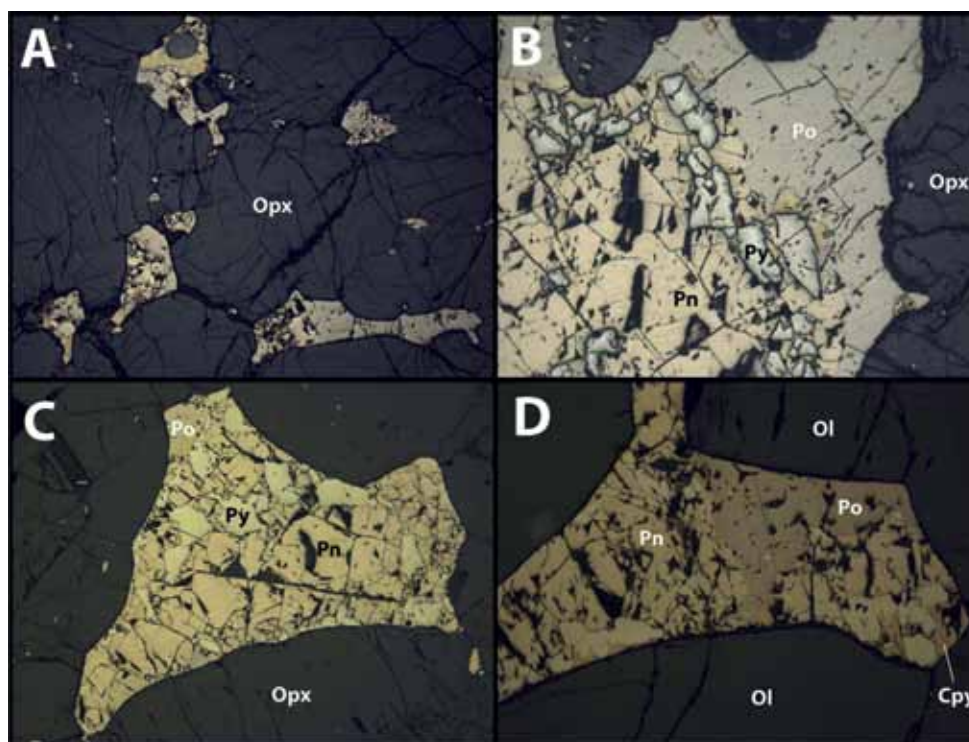


Figura 5 Fotomicrografias do minério sulfetado do depósito de Santa Rita, hospedado em dunito. (A) Minério intersticial típico, em ortopiroxenito; (B) massa de sulfeto constituída por agregados de grão fino de pentlandita, pirrotita e pirita com calcopirita subordinada (cor amarelo forte). O ortopiroxenito em contato com os sulfetos apresenta bordas arredondadas; (C) massa de sulfeto constituída por agregados de grão fino de pentlandita e pirita com pirrotita subordinada; (D) massa de sulfeto constituída por agregados de grão fino de pentlandita, pirrotita e pirita com calcopirita subordinada. O comprimento do lado maior do retângulo nas fotomicrografias B, C e D é de 5,00 mm, enquanto na fotomicrografia A é de 1,25 mm (FERREIRA FILHO et al., 2013).

De acordo com o DNPM (2014), em 2013, o Brasil produziu 13.006.961 t de minério de níquel, somando-se as contribuições dos Estados de Goiás (73,4%), Bahia (21,8%), Pará (4,1%) e Minas Gerais (0,7%). O Estado de Goiás produziu 6.054.248 t de minério com 69.532,6 t de níquel metálico, em depósitos de níquel laterítico localizados nos municípios de Niquelândia (61,6%) e Barro Alto (33,2%) e no depósito de níquel sulfetado de Americano do Brasil (5,2%). No período de 2010 a 2013, o depósito de Santa Rita (BA) produziu 22,9 Mt de minério, contendo 61.100 t de Ni e 18.400 t de Cu no concentrado. No Pará, em virtude de problemas estruturais da empresa produtora, ocorreu uma paralisação na produção, totalizando o ano base com 257.479 t de minério com teor de 2,1% e 1.884 t de liga FeNi com teor de 6,3%.

Minas Gerais produziu 354.641,1 t de minério com 954,3 t de níquel metálico. Apesar dos investimentos realizados na planta de beneficiamento na empresa produtora de *matte*, houve uma redução de 9,8% em relação ao ano anterior, justificado pelo fato da produção em Fortaleza de Minas ter paralisado por causa do desequilíbrio entre a oferta e a demanda global. Isto resultou em uma expressiva queda nos preços dos metais e no balanço econômico-financeiro da unidade, registrando-se uma oferta de *matte* 24.702,9 t com 42,7% de teor.

CONCLUSÃO

A maior parte da produção atual de níquel e a quase totalidade dos projetos em implantação no Brasil têm se desenvolvido sobre minério laterítico. O depósito de Santa Rita (BA) é uma exceção, constituindo a principal descoberta mundial de níquel sulfetado nos últimos anos.

O Brasil, com as seus recursos e potencial geológico, apresenta condições de se transformar em um dos maiores produtores no mercado internacional de níquel. A escassez de depósitos de níquel sulfetado no Brasil pode ser creditada a uma série de fatores, dentre eles: (i) a carência de mapas geológicos de detalhe ou em escala adequada; (ii) a ausência de levantamentos básicos de prospecção, envolvendo geofísica, geoquímica, sensoriamento remoto e outros, e (iii) a deficiência do conhecimento em relação aos processos tectônicos e metalogenéticos que ocorreram nas regiões do precambriano brasileiro.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, S.G.; BRENNER, T.L. Depósito de Ni-Cu-Co-Au-EGP de Fortaleza de Minas, Minas Gerais. In: *Modelos de Depósitos de Cobre do Brasil e sua Resposta ao Intemperismo*. Brasília: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, p. 84-111. 2010.
- DNPM. *Níquel - Sumário Mineral 2014*. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/niquel-sumario-mineral-2014/view>>. 2014. Acesso em 13 de julho de 2015.
- FERREIRA FILHO, C.F.; CUNHA, J.C.; CUNHA, E.M.; CANELA, J.H.C. Depósito de níquel-cobre sulfetado de Santa Rita, Itagibá, Bahia, Brasil. In: *Série Arquivos Abertos*, vol. 39. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM), 59 p. (mapa). 2013.
- LAZARIN, F.A. *Geologia, petrologia e estudos isotópicos dos depósitos de níquel-cobre sulfetados Santa Rita e Peri-Peri, Nordeste do Brasil*. Dissertação de Mestrado em Geologia, Universidade de Brasília, Brasília, 69 p. 2012.
- NALDRETT, A.J. *Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry and exploration*. Heidelberg, Springer Verlag, 702 p. 2004.
- NILSON, A.A.; SANTOS, M.M.; CUBA, E.A.; GOMES-de-SÁ, C.M. Jazida de níquel, cobre e cobalto de Americano do Brasil, Goiás. In: *Principais Depósitos Minerais Brasileiros - Ferro e Metais da Indústria do Aço*. Brasília, DNPM, v. 2, p. 258-273. 1986.
- SILVA, J.M.; FERREIRA FILHO, C.F.; BUHN, B.M.; DANTAS, E.L. Geology, petrology and geochemistry of the "Americano do Brasil" layered intrusion and its Ni-Cu sulfide deposits, Central Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 46, n. 1, p. 57-90. 2011.
- THE STATISTICS PORTAL. *Nickel mine production worldwide*. Disponível em: <<http://www.statista.com/statistics/264642/nickel-mine-production-by-country/>>. 2015. Acesso em 13 de julho de 2015.

O níquel no Brasil e seus depósitos lateríticos

Marcondes Lima da Costa

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará;
Pesquisador CNPq 1A

RESUMO

O Brasil, um importante *player* mundial da *commodity* níquel, foi fortemente atingido durante a crise de 2008/2009. Em 2013, representava tão somente 3,5% do mercado mundial, superado por Indonésia e Filipinas, os maiores produtores, seguidos por Rússia, Austrália, Canadá e Nova Caledônia. Acredita-se que, em 2015, esse mercado se recupere da crise recente. A produção nacional concentra-se em Goiás, Pará, Bahia e Minas Gerais. Enquanto as exportações diminuem, o consumo interno tende ao crescimento. Mundialmente o minério de níquel envolve tanto o sulfetado como o laterítico, mas no Brasil domina o laterítico, tanto silicatado como oxidado (óxi-hidróxidos de ferro). As principais minas estão em Niquelândia (GO), Barro Alto (GO), Onça-Puma (PA) e Mirabela (BA), além dos depósitos de Vermelho (PA), Capitão Gervásio (PI), Morro Sem Boné (MT), Montes Claros (GO) e Jacaré (PA), entre outros, sendo que Mirabela é o único não laterítico. Os perfis lateríticos formados durante o Terciário derivaram de rochas ultramáficas, com a mineralização Ni-silicatada (garnierita, esmectita, clorita e serpentinas) concentrada na zona saprolítica e a oxidada zona superior. Considerando a expressiva presença de ambiente ultramáfico e ampla formação de lateritos no país, ainda são promissoras as perspectivas para descoberta de novos depósitos.

Palavras-chave Níquel. Laterito. Rochas ultramáfica. Esmectita. Garnierita Oxidado.

O MERCADO DO NÍQUEL E PRODUTOS PRIMÁRIOS

Da mesma forma como vem acontecendo com a maioria das *commodities* minerais, que experimentaram enorme valorização durante bom tempo da década 2000-2010, mas que foram atingidas pela grande crise econômica de 2008/2009, com queda abrupta dos preços e diminuição da produção, o níquel e seus produtos não fugiram a esta regra, sendo que o Brasil, um importante *player* desta *commodity*, foi atingido profundamente. Aqui, projetos foram paralisados ou fechados e minas e parques industriais reduzidos em suas atividades, com forte impacto sobre produção, expansão, novas descobertas e mão de obra qualificada. Entre os cinco maiores produtores de níquel (Norilsk Nickel, Vale Inco, BHP Billiton, Falconbridge e Jinchuan) (MENDO, 2009), a brasileira Vale Inco ocupa o segundo lugar.

Em 2012, o Brasil permanecia na sétima posição no ranking mundial dos produtores de níquel, com 139.531 toneladas (t) (Tabela 1) (DNPM, 2014), ou seja, 6,2% da produção mundial, que foi de 2.266.231 t. Porém, em 2013, a produção brasileira foi tão somente de 104.829 t (queda de 24,9%), apenas 3,5% da produção mundial, que foi de 2.441.329 t, colocando-o na oitava posição mundial. As Filipinas, que já haviam ultrapassado a Rússia, tornando-se a maior produtora mundial em 2013, embora tenham aumentado ainda mais a produção, foram alcançadas pela Indonésia, que cresceu estrondosamente, tendo cada uma produzido 440.000 t. A Rússia, por sua vez, produziu 250.000 t, seguida por Austrália (240.000 t), Canadá (225.000 t) e Nova Caledônia (145.000 t) (DNPM, 2014). Outros produto-

res importantes são China, Cuba e Colômbia, que já ocupam, individualmente, de 3,2 a 3,5% do mercado mundial do níquel. Enquanto a produção mundial de níquel nos últimos três anos, portanto após a crise, aumentou em 37,9%, no Brasil este aumento foi menor, de apenas 28% (DNPM, 2014). Torna-se importante ressaltar a elevada queda dos preços internacionais na LME, em torno de 12.000 US\$/t, devido às mudanças das regras comerciais da Indonésia, que, como apresentado, se tornou um dos maiores produtores mundiais.

A produção nacional de minério de níquel, em 2011, alcançou 14.735.310 t, distribuídas entre os Estados de Goiás (46,1%), Bahia (38%), Pará (13,4%) e Minas Gerais (2,5%). Em Goiás, a produção se concentra em três municípios: Americano do Brasil, Niquelândia e Barro Alto, que, juntos, somaram 5.605.112,1 t de minério, com 65.734,2 t de níquel. A produção da liga FeNi experimentou um salto de 87,1% em relação ao ano anterior, graças aos investimentos realizados em Barro Alto. A produção de *matte* de níquel em Americano do Brasil foi de 23.573,69 t, com teor 6,7%. Em Niquelândia, a produção está representada por carbonato de níquel, que alcançou 42.296,31 t, a 46,4% de Ni (DNPM, 2014).

Na Bahia, a produção vem do município de Itagibá, com 133.192 t de concentrado de níquel, equivalente a 19.253 t de níquel contido. Porém, a produção em 2013/2014 foi afetada pelo cenário econômico e pela saída da Votorantim, principal compradora da produção, o que levou à demissão de grande leva de funcionários. No Pará, a produção vem do Município de São Félix do Xingu, com 5.765 t de níquel contido. A principal mina de Onça-Puma também foi paralisada, por problemas técnicos e ambientais.

Em Minas Gerais, a produção, embora pequena, ocorre em quatro municípios: Fortaleza de Minas, Liberdade, Ipanema e Pratópolis. Em Fortaleza de Minas, foram produzidos 29.317 t de *matte* de níquel, a 43,7% de Ni contido; em Liberdade, 489 t de concentrado, com 4,9% de níquel; em Ipanema, 100 t de concentrado, com teor de 1,0%; e em Pratópolis, 49.387 t de minério de níquel, com teor de apenas 0,39% de Ni (DNPM, 2014).

Grande parte do níquel produzido é empregada na produção de aço inoxidável, que experimentou crescimento significativo na última década. Também é empregado em outros aços especiais, como na galvanoplastia, alpacas, entre outros. A previsão é de que o consumo mundial, em 2015, alcance 1,5 milhões de toneladas de níquel, após recuperar-se da crise de 2008/2009, incluindo recuperação dos preços, que foram fortemente deprimidos com aquela crise.

No comércio exterior do Brasil, a tendência é de crescimento, em que a diferença entre o volume exportado e importado, cresce gradualmente. O Brasil importa ligas de ferroníquel e exporta *matte* de níquel e catodos de níquel. As importações, em 2012, cresceram em 53,8% em relação ao ano anterior, provindas, principalmente, da Finlândia (38,8%), Canadá (16,8%), Austrália (14,8%), África do Sul (10,4%) e Noruega (9,2%), equivalente em todas as suas formas a 23.573 t de Ni. As importações de compostos de níquel (óxidos e hidróxidos) totalizaram 93,9%. A usina de níquel de São Miguel Paulista (SP), importou 2.979 t de níquel contido de vários países, para a produção de níquel eletrolítico. Por outro lado, as importações, em 2013,

decreceram 11,1% em comparação ao ano anterior, devido à redução de manufaturados e produtos químicos (Tabela 1). As exportações estão representadas por semimanufaturados, principalmente para Finlândia, Países Baixos, China, Estados Unidos e Japão, em especial a liga FeNi, que experimentou um aumento de 369%, por conta do crescimento da produção de Goiás. Comparativamente, os produtos químicos tiveram retração de 43,3%, principalmente os hidróxidos e sulfatos de níquel. Todo o *matte* de níquel de Fortaleza de Minas e o concentrado de níquel de Itagibá foram exportados para Finlândia, enquanto todo o concentrado de níquel de São Felix foi exportado para Alemanha, Itália, Holanda, China, principalmente. Porém, já em 2013, as exportações experimentaram forte redução, de 26,7%, com relação a 2012 (Tabela 1). 2013 foi um ano difícil para a mineração do níquel no Brasil.

Em termos de consumo interno, a produção de FeNi de Barro Alto e Niquelândia foi destinada para a siderurgia dos Estados de Minas Gerais (91,8%), São Paulo e Rio Grande do Sul. Do níquel eletrolítico de São Miguel Paulista, 27% foi destinado a São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina, entre outros, para aplicação em ligas, superligas, aço inoxidável, siderurgia, galvanoplastia, fundidos de ferro e aço, ligas de alumínio e cobre.

As reservas medidas e indicadas no Brasil, em 2012, eram de 9,06 milhões de toneladas de minério contido, o que corresponde à terceira posição no cenário mundial, que é de 91,016 milhões de toneladas, ou seja, apenas 9,95% destas. A Austrália detém a primeira posição, com 20 milhões de toneladas (DNPM, 2014).

Tabela 1 Produção, importação e exportação, consumo aparente e preço médio de produtos de níquel no Brasil.

Discriminação		Unidade	2010(r)	2011(r)	2012(5)	2013(p)
Produção	Minério/Contido	(t)	11.128385/108.983	13.203.844/131.673	14.749.112/139.230	13.006.961/104.829
	Ni contido no carbonato de níquel	(t)	18.580	19.381	19.611	19.958
	Ni contido no <i>matte</i> de níquel	(t)	14.308	13.703	14.345	11.641
	Ni eletrolítico	(t)	19.111	20.521	21.437	19.823
	Ni contido na liga FeNi	(t)	8.465	16.750	31.342	34.501
Importação	Eletrolítico	(t) 103US\$-FOB	2.079 46.407	1.470 35.878	1.142 21.074	1.136 18.438
	Ferroníquel	(t) 103US\$-FOB	1 40	0 22	0 20	1 55

Discriminação		Unidade	2010(r)	2011(r)	2012(5)	2013(p)
Exportação	Eletrólítico	(t)	11.167	12.773	15.400	17.577
		103US\$-FOB	199.047	213.524	249.909	253.439
	Ferroníquel	(t)	102	19.672	92.342	79.752
		103US\$-FOB	1.814	118.515	516.589	354.180
Consumo aparente (1)	Eletrólítico	(t)	10.023	9.218	7.179	3.382
	Ferroníquel	(t)	8.364	-2.912	-61.000	-45.250
Preço médio (2)	Ferroníquel	US\$/t-FOB	17.784	6.025	5.594	4.441
	Níquel eletrólítico	US\$/t-FOB	17.825	16.717	16.228	14.419

Fontes: DNPM/DIPLAM-RAL, 2014, MDIC/SECEX, 2014. (1) Consumo aparente (produção + importação – exportação); (2) preço médio base exportação; (r) revisado; (p) preliminar.

Projetos em Andamento ou Previstos

Destaca-se o projeto Jacaré, da Anglo American, em São Félix do Xingu, que prevê a instalação de duas usinas para produção a partir de minério ROM com 1,64% Ni, via pirometalúrgica, e outro com 1,15% Ni, via hidrometalúrgica. Também esteve em andamento o projeto de Morro Sem Boné e Morro do Leme, em Mato Grosso, de igual forma da Anglo American.

Em Niquelândia, o projeto Ferro Níquel da Votorantim, que já estava em fase bem adiantada antes da crise de 2008/2009, foi paralisado, e prevê um *start up* em 2019. O projeto Onça-Puma, da Vale S.A., em Ourilândia do Norte, no sul do Pará, esteve com a planta paralisada em decorrência de vazamento nos fornos, além de problemas ambientais e conflitos indígenas (DNPM, 2014).

Em Capitão Gervásio (PI), outrora São João do Piauí, a mina foi arrendada e as atividades ficaram ao nível de planta piloto. No Pará, a Secretaria de Indústria, Comércio e Mineração, informa que um grupo inglês pretende viabilizar o projeto Araguaia situado no município de Conceição do Araguaia, com níquel laterítico com extração prevista para 2017 (DPNM, 2015).

TIPOS DE DEPÓSITOS DE NÍQUEL

Os principais depósitos produtores de níquel no mundo se classificam em dois grandes grupos segundo a natureza do mineral-minério e a gênese do minério: o primário, ou sulfetado, e o laterítico (Tabela 1), que compreende o oxidado, na verdade, os óxi-hidróxidos de ferro (e manganês restritamente) portadores de Ni (goethita e hematita), com teor normalmente de 1 a 1,6% Ni (como os de Goro, Nova Caledônia; Baía de Moa, Cuba; Cawse e Ravensthorpe, Austrália); os Ni-silicatos, geralmente associados com oxi-hidróxidos

de Mn, tipo asbolana, mineralizados também em Co (asbolana, litioforita e heterogenita). O minério Ni-silicato compreende os silicatos hidratados de Mg (serpentinhas, talco, clorita, sepiolitas, vermiculitas e “garnieritas”), que, geralmente, constituem um agregado complexo, conhecido genericamente como garnierita, que são os mais ricos em Ni (1,5 a 2,5%), localizados na Nova Caledônia, em Cerro Matoso, na Colômbia, e em Marlborough na Austrália. As argilas Ni-esmectitas (nontronita, beidellita, montmorilonita e saponita), localizadas em Murrin Murrin e Bulong na Austrália, com teor menor de Ni, de 1 a 1,5% Ni), são menos abundantes (FREYSSINET et al., 2005). Enquanto os depósitos de níquel sulfetado se encontram fundamentalmente relacionados com complexos máficos, em geral acamadados, os lateríticos derivaram principalmente de rochas ultramáficas mineralizadas em Ni, serpentinizadas ou não, em que o teor encontra-se acima de 0,25%. Geralmente, o Ni primário está hospedado na estrutura de olivinas, por vezes em parte piroxênios, ou seus produtos de alteração hidrotermal, com talco, serpentinhas, cloritas e argilas complexas. Normalmente, nestes minerais, além do Ni, associam-se Mn e concentrações menores de cobalto (Co) e cobre (Cu), que, durante o intemperismo laterítico, podem atingir acumulações econômicas, principalmente o Co.

Os depósitos e minas de níquel, principalmente os lateríticos (Figura 1), estão espalhados pelo mundo inteiro, com destaque para Filipinas, Indonésia, Rússia, Austrália, Canadá, Nova Caledônia, Brasil, China, Cuba e Colômbia, os principais produtores, bem como muitos outros depósitos pequenos distribuídos na Europa (OLIVEIRA, 1990; FREYSSINET et al., 2005; ELIOPOULOS et al., 2012) (Figura 1). Por outro lado, os depósitos primários são mais restritos, com destaque para aqueles de Canadá, Rússia e em parte do Brasil.

A maior parte da produção de Ni no mundo provém, no entanto, dos depósitos lateríticos.

No Brasil, os depósitos de níquel se enquadram tanto em primários (sulfetados) como em lateríticos, em que os lateríticos são mais abundantes, certamente por conta da maior frequência de corpos ultramáficos e das condições climáticas tropicais favoráveis que atingiram quase toda a região do espaço Brasil durante o cenozoico, mais especificamente do eoceno ao mioceno. A produção de níquel do país vem destes dois tipos de depósitos.

Os principais depósitos de níquel do Brasil (Figura 1) são: Vermelho, Onça-Puma e Jacaré, no Estado do Pará; Niquelândia, Americano do Brasil, Barro Alto, Crixás, Santa Fé e Montes Claros, em Goiás; Mirabela, na Bahia; Morro do Níquel, Liberdade, Fortaleza de Minas, Ipanema e Pratópolis, em Minas Gerais; Capitão Gervásio, então São João do Piauí, no Piauí; Morro Sem Boné e Morro do Leme, em Mato Grosso; e Jacupiranga, em São Paulo. Somente os depósitos de Fortaleza de Minas, Americano do Brasil (Santa Marta) e Mirabela são de origem primária, com mina em operação a céu aberto, com destaque para Mirabela (temporiamente em fase paralisação); as demais são tipicamente lateríticos, porém com minas produtivas apenas Niquelândia (mina e instalações industriais), Barro Alto, Onça-Puma (paralisada temporariamente), Ipanema e Pratópolis.

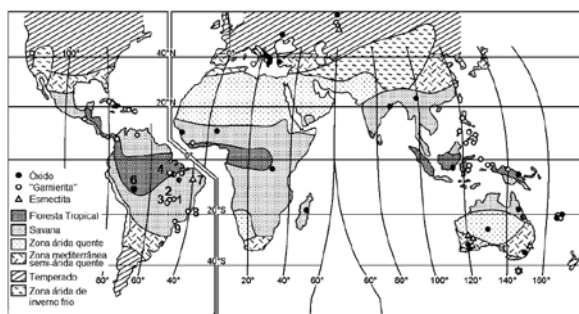


Figura 1 Distribuição mundial dos principais depósitos de Ni laterítico, classificados segundo o principal tipo mineral de minério de níquel (óxido, silicato ou garnierita) e zona morfoclimática de Büdel (1982). 1: Niquelândia; 2: Barro Alto; 3: Montes Claros; 4: Jacaré; 5: Vermelho; 6: Morro do Leme e Morro sem Boné; 7: Capitão Gervásio; 8: Ipanema; 9: Liberdade. (Fonte: FREYSSINET et al., 2005, modificado).

O ZONEAMENTO DA MINERALIZAÇÃO DE NÍQUEL NO PERFIL LATERÍTICO

Em termos gerais, o perfil laterítico mineralizado a níquel pelo mundo afora derivou de rochas ultramáficas. Ele estrutura-se em horizontes ou zonas, embora com grandes variações em espessura e texturas primárias ou reliquias, com espessura (profundidade) entre 10 e 50 m. O perfil completo da base para o topo (Figura 2) é assim constituído:

- A rocha-mãe e/ou substrato, geralmente e constituída por rochas ultramáficas serpentinizadas;
- Saprolito grosso (Saprocha) com matações e/ou blocos métricos de rocha sã;
- Saprolito fino, macio e/ou terroso;
- Saprolito ferruginoso;
- Possível zona plásmica, que pode se confundir com Saprolito ferruginoso; e
- Crosta ferruginosa marrom avermelhada, ligeiramente magnética.

É notável a descontinuidade de Mg, que se dá na transição saprolito macio ou terroso com saprolito ferruginoso, respectivamente os domínios Mg-silicatos (garnieritas; argilas complexas/asbolanas) e Ni-hidróxidos de ferro. A maioria dos depósitos lateríticos de níquel do Brasil se enquadra parcialmente no perfil geral anteriormente descrito (Figura 2).

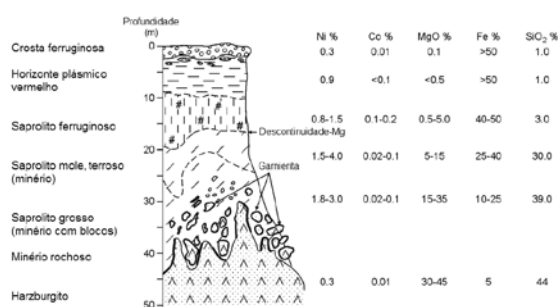


Figura 2 Exemplo de perfil laterítico mineralizado em Ni, em Nova Caledônia que encontra paralelo no Brasil. (Fonte: FREYSSINET et al., 2005, modificado).

EXEMPLOS DE DEPÓSITOS LATERÍTICOS NO BRASIL

O Depósito de Jacaré, Pará

Segundo a Anglo American (2010) o depósito de Jacaré conta com 495 Mt @1,19 Ni + 0,13 Co. A fonte primária de níquel está relacionada às rochas ultramáficas paleoproterozoicas da Suite Cateté formada por rochas acamadadas complexas, as mesmas dos depósitos de Onça-Puma e Vermelho sob o domínio Carajás. O espesso perfil laterítico desenvolvido e mineralizado foi intensamente truncado pela erosão; perfis completos são localizados. A maior parte do relevo mais elevado é sustentado pelas zonas silicosas tipo calcedônia (silcrete) reticulado e cavernoso, ocre, envolvendo goethita e argila. Crostas lateríticas ferruginosas encontram-se normalmente desmanteladas e como parte de colúvio. No entanto, reconhece-se o saprolito grosso sobreposto a dunitos e peridotitos (Figura 3A e B), mineralizado a Ni-esmectitas, Ni-cloritas, Ni-serpentinhas e “garnieritas” (Figura 3C) (minério silicatado para rota pirometalúrgica); uma zona ferruginosa acima mineralizada a Ni-goethita (minério oxidado para rota hidrometalúrgica) associada a hematita e maghemita, com porção basal mineralizada a Co, provavelmente como asbolana; é sobreposta pela zona plásmica ferruginosa-silicosa (calcedônia/silcrete: quartzo), que contém ainda goethita e caulinita, com baixo teor de Ni e a crosta desmantelada e/ou solo, não mineralizado (rejeito) com < 0.5 Ni.

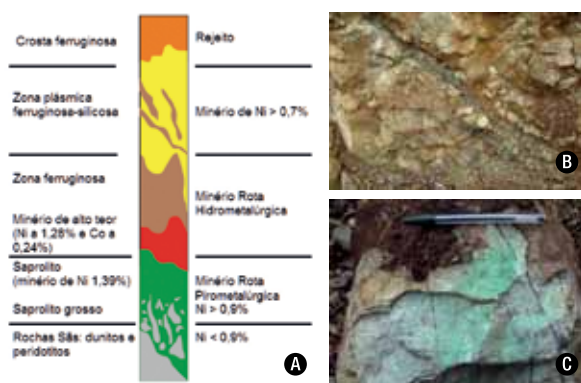


Figura 3 A. Estruturação geral do perfil laterítico mineralizado em níquel, no depósito de Jacaré, em São Félix do Xingu, Pará. B. Exposição no campo do saprolito grosso (peridotito parcialmente intemperizado com mineralizações de Ni-esmectitas em zonas de fraturas). C. “Garnieritas” + crisoprásio em fraturas, vênulas. Jacaré, Pará (A). (Fonte Figura 3A: Anglo American, 2010, modificado; Fonte Figuras 3B e 3C: Marcondes Lima da Costa).

O Depósito do Morro do Leme e Morro Sem Boné, Mato Grosso

Os dois corpos Morro do Leme e Morro Sem Boné (Figura 4B), a cerca de 30 km de distância entre si, emergem de em uma extensa planície desenvolvida sobre a Formação Guaporé, constituída de sedimentos Tércio-quaternários. Seus substratos, no entanto, são formados por dunitos e peridotitos serpentinizados mesoproterozoicos da Suite Intrusiva Cacoal (NUNES, 2000), a partir dos quais se desenvolveu espesso (até cerca de 30 m) perfil laterítico mineralizado a níquel (Figura 4A e B). O topo desses morros encontra-se a mais 300 m de altitudes e desnível de 200 m. Estudos de prospecção geoquímica detalhada, petrografia e mineralogia da mineralização foram realizados por Nunes (2000) nos dois Morros e mostram que há fortes correlações entre os mesmos em termos de rochas geradoras e estruturação do perfil laterítico. Este se destaca pela zona saprolítica grossa mineralizada em Ni (Ni-serpentinhas e “garnieritas”) com 1,5 a 3,2% Ni (NUNES, 2000), que se restringem a vênulas e veios em fraturas, associadas com crisoprásio (Figura 4). Essas garnieritas são igualmente observáveis no Morro Sem Boné (Figura 4C). Os teores de Ni e mesmo de Co parecem ser mais elevados no Morro Sem Boné. Seus serpentinitos apresentaram de 0,1 a 2,0% de Ni (NUNES, 2000). Sucede-se, então, o saprolito fino, que é dominado por Ni-esmectitas e em parte oxi-hidróxidos e Fe (Ni-goethita) quando derivado de peridotitos e apenas por Ni-goethita de dunitos (Figura 4A). Os oxi-hidróxidos de Mn, que normalmente estão representados por asbolana, ocupam a base do domínio dos oxi-hidróxidos de Fe. Uma crosta ferruginosa desmantelada, apenas localmente intacta, constituída de goethita e hematita, não mineralizada, capeia o perfil laterítico. Bolsões de calcedônia conhecidas como silcretes tipo box works são frequentes, principalmente nas zonas saprolíticas.

O Depósito (mina) de Niquelândia, Goiás

Os depósitos de níquel de Niquelândia se enquadram, classicamente, nos tipos lateríticos a silicatos na base e óxidos (óxi-hidróxidos) no topo. Já foram motivos de vários estudos desde os anos 1940 (OLIVEIRA, 1990a, b) e, nos últimos anos, receberam contribuições detalhadas sobre a mineralogia silicatada (VIEIRA COELHO et al., 2000a, b; CARVALHO J.R. et al., 2004), os solos (GARNIER et al., 2009) e também sobre caracterização multitemática, principalmente por geofísicos (BARBOSA, 2012). Porém, o perfil laterítico e sua evolução não receberam um trabalho maior, ficando restritos a Oliveira (1990b; OLIVEIRA et al., 1992).

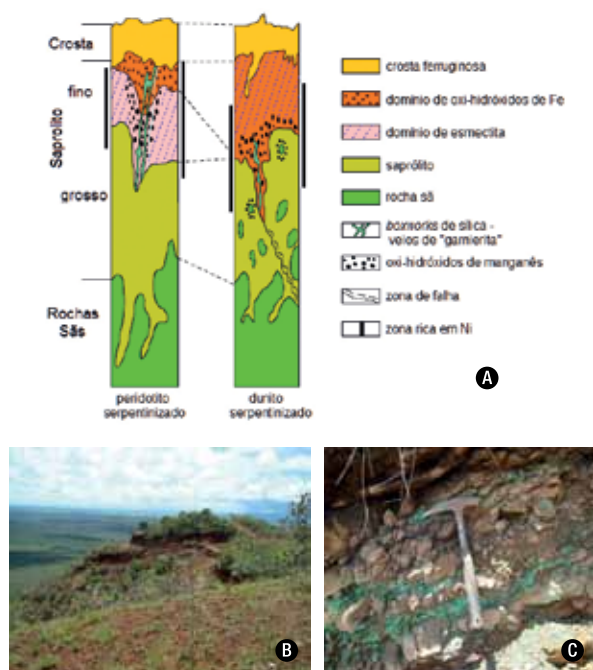


Figura 4 A. Estruturação de perfis lateríticos mineralizados em níquel, derivados de ultramáficas distintas (peridotitos e dunitos serpentinizados), no Morro do Leme, em Comodoro (MT). B. Paisagem plana em que emergem o Morro Sem Boné e, ao fundo, o do Leme não delineável na foto. C. Dunitos parcialmente intemperizados mineralizados a Ni-esmectitas + crisoprásio. (Fonte Figura 4A: NUNES, 2000, modificado; Fonte Figuras 4B e 4C: Marcondes Lima da Costa).

Os depósitos constituem um corpo serrano, constituído por vários morros, em geral sustentado por espesso pacote de sílex (calcedônia) marrom, orientados norte-sul, ressaltando o intenso processo erosivo que atingiu a área no seu todo. O perfil é variável tanto na vertical quanto lateralmente, porém mesmo assim é possível estabelecer uma sucessão de horizontes ou zonas (Figura 5A). O substrato e as possíveis rochas geradoras estão representados por dunitos, peridotitos e piroxenitos, os primeiros, em geral, serpentinizados. Os teores de Ni nessas rochas estão na ordem de 0,1 a 0,3% (OLIVEIRA, 1990b), favoráveis, portanto, ao enriquecimento econômico. Seu primeiro estágio de alteração, a rocha alterada, seguido pelos saprolitos grosso e argiloso, constituído de serpentina, clorita e esmectita, que pode formar bolsões esverdeados (Figura 5B, C, D), portanto portadores de Ni (Ni-silicatos). Veios de “garnierita” com crisoprásio ocorrem com frequência (Figura 5 E). O teor de NiO varia de 1 a 5% (OLIVEIRA, 1990). Bolsões de cor negra e, por vezes, pulverulentos se destacam localmente, sendo constituídos por asbolana, além de outros oxi-hidróxidos de Mn (Figura 6A). Sucede-se a zona ferruginosa do saprolito

e a zona tipicamente ferruginosa (oxi-hidróxidos de Fe), que, quando ultrapassa 1% NiO (OLIVEIRA, 1990), constitui-se no minério oxidado (goethita e hematita). Nesta zona, localmente dominam, também, as calcedônias (silcrete) (Figura 5B). Ao topo, localmente pode ocorrer a crosta ferruginosa ou solos com < 1% NiO.

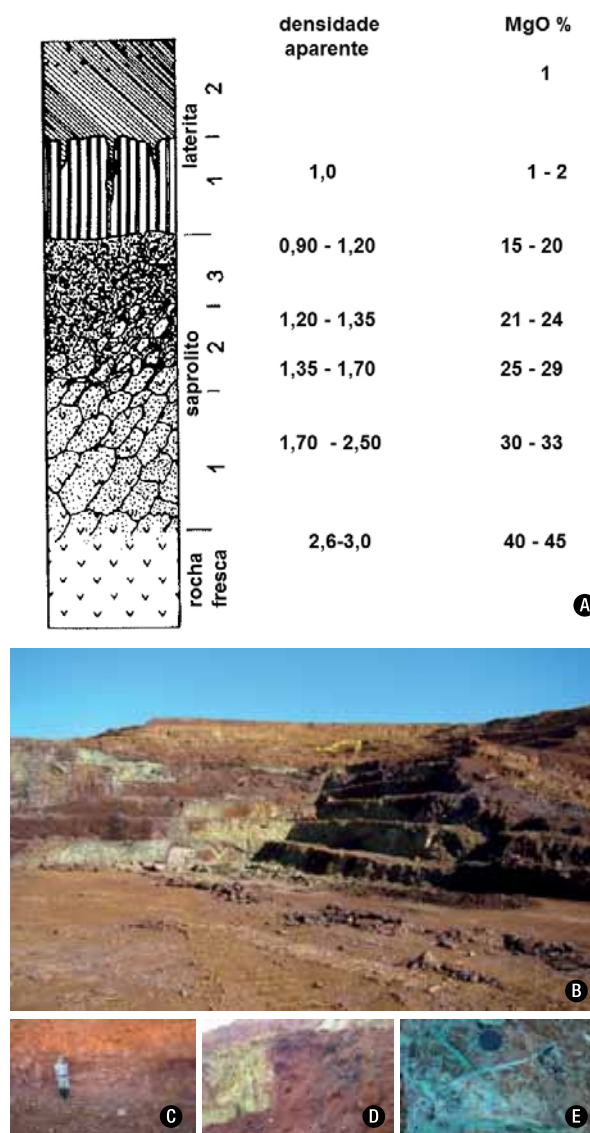


Figura 5 A. Perfil laterítico simplificado do relevo de baixada do depósito de níquel de Niquelândia. Saprolito 1: rocha alterada; Saprolito 2: saprolito ferruginoso; laterita 2: laterita vermelha, ou seja, crosta ferruginosa, parcialmente desmantelada. B. Exposição parcial do perfil de alteração tendo na base o saprolito grosso derivado de dunito em que se reconhece, no campo, a esfoliação esferoidal clássica. C. Dunito parcialmente intemperizado desenvolvendo esfoliação. Na foto, o caro geólogo Luiz Flávio. D: Ni-esmectitas verdes envoltas por zona de oxi-hidróxidos de Fe e, em parte, de Mn, como asbolanas. E: Vênulas de “garnierita” + crisoprásio. FALTOU INSERIR AS LETRAS NAS FIGURAS. (Fonte Figura 5A: OLIVEIRA, 1990b, modificado; Fonte Figuras 5B, 5C, 5D e 5E: Marcondes Lima da Costa).

O Depósito de Montes Claros, Goiás

O depósito de Montes Claros se situa no contexto da intrusão cretácica ultrabásica alcalina de Montes Claros (Província Alcalina de Goiás, mesozoica) encaixadas em arenitos, as quais incorporam dunitos e peridotitos serpentinizados e silicificados, serpentinitos, piroxenitos, sienitos, entre outras rochas. Elevações que atingem até 620 m de altitude, com desnível de 180 m, se destacam na área rebaixada (420 a 480 m), dominada por cobertura eluvio-coluvionar ou solos marrons avermelhados ricos em hematita e magnetita, que recobrem o domínio das rochas ultramáficas (FREITAS, 2007). Os perfis lateríticos apresentam distintas profundidades, variando de 5 a 17 m, mas em geral são pouco espessos. Eles parecem truncados erosivamente, de forma intensiva, que atingiu em muitos casos a zona saprolítica (Figura 6A). Isto explicaria o domínio da cobertura elúvio-coluvionar rica em hematita-magnetita/maghemita, que no perfil da figura 6A está como solo. Em geral se observa de fato uma discordância erosional e químico-mineralógico entre solo/cobertura e saprolito. É notório o desenvolvimento do saprolito grosso não mineralizado com a mineralogia das rochas primárias e por oxi-hidróxidos de Mn-Co, sobreposto pelo saprolito argiloso mineralizado, com até 2,0% Ni, constituído por serpentina, talco, esmectita, quartzo, cromita e goethita. O termo argiloso parece impróprio, pois apenas indica fração granulométrica argila e não o domínio de minerais de argila. O solo tem praticamente a mesma composição mineralógica, apenas mudando as proporções, em que os minerais de ferro se tornam ainda mais abundantes, e ocorre ainda vermiculita. Isto confirma a sua derivação erosional a partir do saprolito subjacente. O quartzo abundante, representa os bolsões de calcedônia (silcrete).

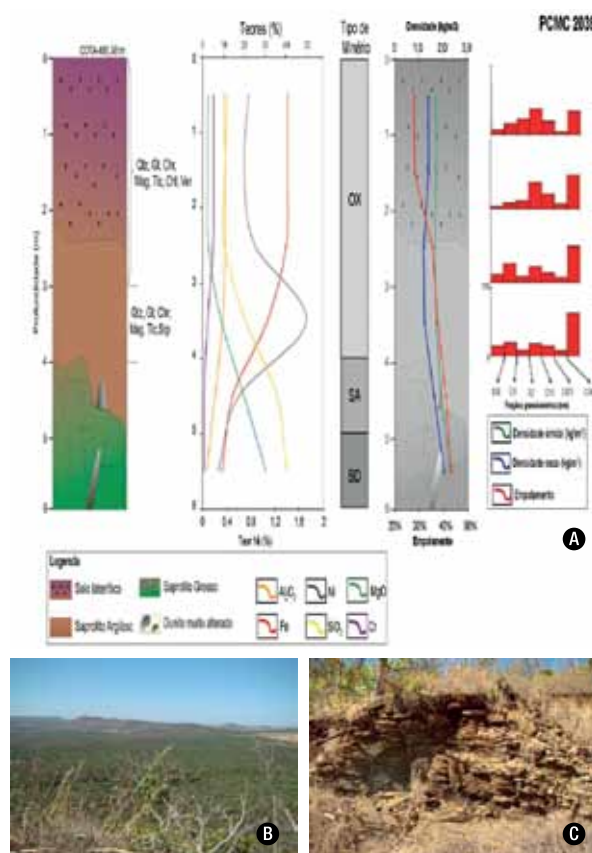


Figura 6 A. Perfil laterítico truncado mineralizado a níquel em Montes Claros, com indicação dos principais minerais (Qtz: quartzo; Gt: goethita; Chl: clorita; Tlc: talco; Ver: vermiculita; Srp: serpentina; Mag: magnetita; Chr: cromita) e a distribuição dos teores de Fe, Ni, Cr, Fe₂O₃, Al₂O₃ e MgO. B. Paisagem dissecada plana esculpida sobre colúvios/solos e saprolitos mineralizados a Ni e inselbergs de rochas ultrabásicas alcalinas em Montes Claros. C. Detalhe de perfil intemperado laterítico truncado ao nível do saprolito grosso a saprocha dominada por calcedônia, crisoprázio, clorita e oxi-hidróxidos de Fe em Montes Claros. FALTOU INSERIR AS LETRAS NAS FIGURAS (Fonte Figura 6A: FREITAS, 2007, modificado; Fonte Figuras 6B e 6C: Marcondes Lima da Costa).

CONCLUSÕES

Pelo exposto, o Brasil detém terrenos e evolução geológica favoráveis à alta fertilidade em níquel laterítico, porém perde, cada vez mais, a sua importância como principal player desta commodity mineral no cenário mundial. Foi rapidamente suplantado por países como Filipinas e Indonésia, até então com pouca tradição mineral, mas que, nos últimos anos, galgaram patamares invejáveis, fazendo com que a participação mundial de nosso país caísse para módicos 3,5%. Isto demonstra uma falta de política mineral de médio e longo prazo dentro de normalidade jurídica e ambiente econômico-financeiro estável.

REFERÊNCIAS

- ANGLO AMERICAN. *Jacaré Nickel Deposit*. Apresentação SimexMin, Ouro Preto. Disponível em: <<http://www.adimb.com.br/simexmin2010/port/>>. 2010. Acesso em 15 de junho de 2015.
- BARBOSA, I.O. *Modelo de depósito do complexo máfico-ultramáfico de Niquelândia, GO, com base em dados multitemáticos*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, 107 p. 2012.
- BÜDEL, J. *Climatic geomorphology*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 443 p. 1982.
- CARVALHO JUNIOR, O.A.; MARTINS, E. S.; CARVALHO, A.P.F.; MENESES, P.R.; GUIMARAES, R.F.; CARDOSO, F.B.F. Estimativa da abundância de minerais do depósito de níquel laterítico da mina Fazenda por espectrorradiometria. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 34, n. 4, p. 579-586. 2004.
- DNPM. *Níquel - Sumário Mineral 2014*. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/niquel-sumario-mineral-2014/view>>. 2014. Acesso em 15 de junho de 2015.
- ELIOPOULOS, D.G.; ECONOMOU-ELIOPOULOS, M.; APOSTOLIKAS, A.; GOLIGHTLY, S.J. Geochemical features of the nickel-laterite deposits from Balkan Peninsula and Gordes, Turkey: The genetic and environmental significance of arsenic. *Ore Geology Review*, v. 48, p. 423-427. 2012.
- FREITAS, R. *Níquel laterítico de Montes Claros-GO*. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Geologia. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. 2007.
- FREYSSINET, P.H.; BUTT, C.R.M.; MORRIS, R.C.; PIANTONE, P. Ore-forming processes related to lateritic weathering. *Economic Geologist*, Anniversary volume, p. 681-722. 2005.
- FU, W.; YANG, J.; YANG, M.; PANG, B.; LIU, X.; NIU, H.; HUANG, X. Mineralogical and geochemical characteristics of serpentinite-derived laterite profile from East Sulawesi, Indonesia: Implications for the lateritization processes and Ni supergene enrichment in tropical rainforest. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 93, p. 74-88. 2014.
- GARNIER, J.; QUANTIN, C.; GUIMARÃES, E.; GARK, V.K.; MARTINS, E.S.; BECQUER, T. Understanding the genesis of ultramafic soils and catena dynamics in Niquelândia, Brazil. *Geoderma*, v. 151, p. 204-214. 2009.
- GOLIGHTLY, J.P. Nickeliferous laterite deposits. *Econ. Geol.* 75th Anniversary volume. p. 710-735. 1981.
- GOLIGHTLY, J.P. Progress in understanding the evolution of nickel laterites. *Society of Economic Geologists*, Special publications number 15, Chapter X, II. p. 451-486. 2010.
- MENDO CONSULTORIA, J. Perfil da Mineração do Níquel. MME/Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral – SGB/Banco Mundial, *Relatório Técnico 24*. 55. 2009.
- NUNES, N.S.V. *Geologia e resultados prospectivos das áreas Morro do Leme e Morro Sem Boné - Mato Grosso*. MME, Goiânia. 61 p. 2000.
- OLIVEIRA, S.M.B. Estágio atual do conhecimento a cerca do minério laterítico de níquel no Brasil e no Mundo. *Boletim do Instituto de Geociências da USP*, São Paulo, v.11, n. 2, p. 49-57. 1990a.
- OLIVEIRA, S.M.B. *Os depósitos de níquel laterítico do Brasil*. Tese de Livre Docência, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo-SP. 89 p. 1990b.
- OLIVEIRA, S.M.B.; TRESCASES, J.J.; MELFI, A.J. Lateritic nickel deposits of Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 27, n. 2, p. 137-146. 1992.
- VIEIRA COELHO, A.C.; PONCELET, G.; LADRIÈRE, J. Nickel, iron-containing clay minerals from Niquelândia deposit, Brazil: 1. Characterization. *Applied Clay Science*, v.17, n. 3-4, p. 163-181. 2000a.
- VIEIRA COELHO, A.C.; LADRIÈRE, J.; GUIMARÃES, E.; PONCELET, G. Nickel, iron-containing clay minerals from Niquelândia deposit, Brazil: 2. Behaviour under reducing conditions. *Applied Clay Science*, v.17, n. 3-4, p. 183-204. 2000b.

Potencial mineral: cobre

Caetano Juliani

Lena V. S. Monteiro

Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo

Carlos Marcello Dias Fernandes

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará

RESUMO

O cobre representa uma *commodity* importante na indústria de base, sendo previsto um crescimento contínuo da sua demanda mundial nos próximos 25 anos, que poderá ser intensificado com a recuperação econômica dos países desenvolvidos e em desenvolvimento. No Brasil, a demanda por cobre tem sido historicamente maior que a produção. Aproximadamente 87% das reservas lavráveis (~1,6% das reservas mundiais) são depósitos do tipo IOCG, presentes na Província Mineral de Carajás. A produção (1,5% da produção mundial) concentra-se nas minas do Sossego, Salobo, Chapada, Caraíba, Niquelândia, Fortaleza de Minas e Americano do Brasil e a autossuficiência dependerá da abertura de novas minas em Carajás e da descoberta de novas reservas. Para tanto, conceitos metalogenéticos inovativos, o desenvolvimento de novas províncias e o emprego de novas tecnologias serão necessários ao desenvolvimento do potencial metalogenético relativo a depósitos IOCG, Cu e Cu–Au do tipo pórfiro, Cu hospedado em rochas sedimentares, VHMS e outros.

Palavras-chave Cobre. Potencial mineral. Produção. Reservas. IOCG. Pórfiro. Epitermal.

INTRODUÇÃO

Apesar da queda da demanda e dos preços do cobre (Cu) nos últimos anos, notadamente em 2015, é previsto um crescimento do consumo mundial de cobre nos próximos 25 anos. Consequentemente, a produção dessa *commodity* deve vir a ser maior que toda a sua produção histórica acumulada ao longo das últimas décadas, alcançando cerca de 635 Mt de Cu contido (DOGGETT, 2014; HEITHERSAY, 2014). No Brasil, a demanda por cobre tem sido historicamente maior que a sua produção. Essa é uma das *commodities* com impacto negativo na balança comercial brasileira, representando, em 2014, 12,8% das importações de bens minerais do país (LIMA; NEVES, 2014). Ainda que exista a perspectiva de abertura de novas minas, sobretudo na Província Mineral de Carajás, para atender as demandas internas e possibilitar a autossuficiência em cobre nos próximos anos, será necessária a expansão das reservas brasileiras, a partir do desenvolvimento de depósitos já conhecidos e de novas descobertas.

Em termos globais, as mais de 100 minas de cobre com exploração iniciada nos últimos 20 anos tiveram um tempo médio da descoberta à produção de cerca de 20 anos, indicando que para manutenção do suprimento futuro de cobre ao mercado, torna-se necessário um programa contínuo de exploração mineral. Deve ainda ser considerado que os minérios têm apresentado teores decrescentes de cobre, além de aumento do seu conteúdo de arsênio, flúor e urânio, dentre outros elementos deletérios, ultrapassando a capacidade de beneficiamento das refinarias, o que tem aumentado os custos de produção da *commodity*.

No Brasil, o grande *boom* de descobertas de anomalias e/ou depósitos ocorreu na década de 1970, mas a abertura das principais minas de cobre iniciou-se apenas no início dos anos 2000. Como exemplos, podem ser citadas a Mina de Chapada, em Goiás, descoberta em 1973 pela empresa canadense INCO Ltda., com produção iniciada em 2007, e a Mina de Salobo, na Província Mineral de Carajás, descoberta em 1974. Embora esta última constitua o maior depósito de cobre já descoberto no país, sua operação somente se iniciou em 2011. Assim, para aumento da produção brasileira nas próximas décadas, é fundamental que haja um programa de desenvolvimento da exploração em províncias com depósitos conhecidos e o uso de tecnologias que possibilitem uma redução no tempo de entrada de produção, em conjunto com a exploração de novas províncias, com base em novos conceitos genéticos e exploratórios.

Para atender a demanda mundial prevista, estima-se que a produção de cobre poderá crescer até 3% ao ano, dobrando a produção atual até 2039 (DOGGETT, 2014). Considerando-se os projetos em desenvolvimento, os recursos potenciais excedem 350 Mt de cobre metálico, o que poderia suprir as demandas mundiais nas próximas décadas. Ainda assim, houve registro de queda de 20% da produção de cobre em relação à capacidade de produção teórica (ICSG, 2013) e tem havido dificuldades sociais e ambientais para implantação de minas com recursos expressivos, tais como Oyu Tolgoi, na Mongólia (HUMPHREYS, 2010) e Pebble, EUA (MUDD et al., 2013), que representa um dos maiores projetos de cobre do mundo. Adicionalmente, o adiamento, em 2012, do projeto de expansão

da mina de Olympic Dam, na Austrália, que representa o maior depósito de urânio, o quinto maior de cobre e o terceiro de ouro do mundo (HEITHERSAY, 2014), aponta para a preponderância de fatores tecnológicos, ambientais, sociais e econômicos para o sucesso dos empreendimentos (SPYKES et al., 2013). Nesse sentido, embora os recursos de cobre em depósitos já conhecidos sejam significativos, as reservas de cobre vêm diminuindo em termos globais (SPYKES et al., 2013).

Os desafios para a exploração mineral serão cada vez maiores, uma vez que os maiores depósitos, os mais próximos à superfície, os com assinaturas geofísicas mais evidentes e os com padrões claros de alteração hidrotermal foram, ou serão, encontrados primeiro. Assim, nas próximas décadas, novas ideias, novos modelos, novas províncias e diferentes tecnologias serão necessárias para que o sucesso na exploração mineral seja obtido. Adicionalmente, a exploração mineral terá como desafio o foco na descoberta de novas reservas de cobre, ou seja, depósitos de cobre economicamente viáveis, e não simples recursos (SPYKES et al., 2013). Nesse sentido, a descoberta de depósitos de classe mundial, cujo valor das reservas exceda significativamente os elevados custos da mineração e do refino por um período mínimo de cinco ou seis ciclos econômicos, tem sido o foco das companhias *majors* no país.

Contudo, parte das descobertas recentes não representam depósitos de classe mundial de interesse para as companhias *majors*. O desenvolvimento desses projetos e o aumento da produção de cobre no país poderia ser alcançado pela mineração de pequeno porte, desde que os órgãos governamentais desenvolvam políticas justas e ágeis de incentivo, que encorajem os pequenos empreendedores a implantarem projetos com visão efetiva de desenvolvimento sustentável, com planejamento que considere as diferenças de escala, em relação aos projetos da mineração de grande porte, e seus impactos tecnológicos, operacionais, ambientais e sociais.

DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS DEPÓSITOS

A maioria dos depósitos cupríferos brasileiros concentram-se na Província Mineral de Carajás (Figura 1) e apresentam semelhanças com os depósitos de óxido de ferro-cobre-ouro (*Iron oxide-Copper-Gold deposits* ou IOCG) (HITZMAN et al., 1992, 2000), tais como Salobo, Sossego, Cristalino, Igarapé Bahia/Alemão (Tabela 1) (HUHN et al., 1999; LINDENMAYER, 2003; RÉQUIA et al., 2003; TALLARICO et al., 2005; MONTEIRO et al.,

2008). Nessa província também são conhecidos outros depósitos magmáticos-hidrotermais neoarqueanos ou paleoproterozoicos, sem conteúdos elevados de magnetita ou hematita (Serra Verde, Estrela, Breves), considerados menos expressivos (NUNES et al., 2001; XAVIER et al., 2005; LINDENMAYER, 2005; BOTELHO et al., 2005).

Depósitos de cobre polimetálicos com evidências de formação por processos vulcano-exalativos, semelhantes aos depósitos de sulfeto maciço hospedados em rochas vulcânicas (*Volcanic-Hosted Massive Sulfide* ou VHMS), são também conhecidos em Carajás (depósito de Cu-Zn de Pojuca Corpo Quatro) (MEDEIRO NETO; VILLAS, 1985). Esses depósitos têm evolução complexa e registram sobreposição de eventos hidrotermais relacionados à evolução tectônica e magmática da Província Mineral de Carajás.

Depósitos VHMS também foram caracterizados em outras províncias ou distritos minerais, com destaque para Aripuanã e Cabaçal/Alto Jauru, no Mato Grosso, Bom Jardim de Goiás, Jauru e Palmeirópolis, em Goiás, e Flexal-Patos, no Pará (Figura 1) (ARAÚJO et al., 1995; LEITE et al., 2005; PINHO et al., 2010; KLEIN et al., 2014).

Depósitos de sulfetos magmáticos associados a komatiítos ocorrem em Fortaleza de Minas (MG) e Boa Vista (GO) e a intrusões máficas-ultramáficas em Americano do Brasil, Mangabal I e II e Buriti (Niquelândia), em Goiás, Poço Redondo e Porto da Folha no Complexo de Canindé (SE), Limoeiro (PE), Serrote da Lage (AL), e Vale do Rio Curaçá (Caraíba), Vale do Rio Jacurici (Várzea do Macaco) e Fazenda Mirabela (Santa Rita), na Bahia (Figura 1) (OLIVEIRA, 1990; TEIXEIRA et al., 2010b; BARNES et al., 2011; MOTA e SILVA et al., 2011, 2013, 2015; FRAGUAS, 2012; FOO et al., 2012; FERREIRA FILHO et al., 2013; GARCIA, 2013; DIAS et al., 2014). Os depósitos de Serrote da Lage e Caraíba apresentam evidências de sobreposição de processos hidrotermais epigenéticos que resultam em padrões de alteração hidrotermal e de minério semelhantes aos dos depósitos IOCG (TEIXEIRA et al., 2010b; FRAGUAS, 2012; FOO et al., 2012; GARCIA, 2013).



Figura 1 Mapa do Brasil mostrando a distribuição dos principais depósitos e minas de cobre do país (Fonte: DARDENNE; SCHOBENHAUS, 2003; MISI et al., 2012, modificado). Áreas potenciais para ocorrência de pórfiros de Cu, de Cu-Mo e de Cu-Au do: (A) e (B) Paleoproterozoico, bem preservados, cálcio-alcalinos e alcalinos; (C) Neoproterozoico, metamorfisados; (D) Mesoproterozoico e do Neoproterozoico, metamorfisados; (E) Eopaleozoico, alcalinos; e depósitos IOCG do: (F) Neoproterozoico e Eopaleozoico.

As mineralizações das Minas do Camaquã (Caçapava do Sul e Lavras do Sul), no Rio Grande do Sul, são consideradas vinculadas a sistemas magmático-hidrotermais distais, epitermais de baixa temperatura (BETTENCOURT, 1973, 1976; REMUS et al., 1999; TONIOLO et al., 2010; BONGIOLO et al., 2011; RENAC et al., 2014) ou de origem tardi-diagenética a epigenética hidrotermal associada com a canalização de fluidos conatos aquecidos pelo vulcanismo em falhas (VEIGEL; DARDENNE, 1990). A Mina de Pedra Verde, no Ceará, seria um exemplo, segundo Matos (2012), de depósito de cobre hidrotermal hospedado em rochas (meta) sedimentares, com características que se assemelham às dos depósitos do Zambian Copper Belt, classificados como *Sedimentary Rock-Hosted Stratiform Copper Deposits* (COX et al., 2007; HITZMAN et al., 2010).

O depósito de Chapada, em Goiás, é considerado um possível depósito de cobre do tipo pórfiro, metamorfizado em fácies anfibolito (KUYUMJIAN et al., 2010). Em Itapeva, São Paulo, o depósito de Cu–Au de Santa Blandina (PARISOT et al., 1990), representa um exemplo de *skarn* com grossulária–andradita, quartzo e diopsídio em rochas carbonáticas do Grupo Açungui. Típicos skarns de W–Mo–Cu foram também descritos por Mello e Bettencourt (1998) em calcários da mesma unidade em contato com o Granito Itaóca, no Vale do Ribeira, em São Paulo e no Paraná.

Na Bacia do Paraná, ocorrências de cobre (–ouro–prata), como as de Realeza (PR) (Figura 1), são associados a brechas hidrotermais nos basaltos da Formação Serra Geral e a injectitos de areia, considerados vinculados a sistemas hidrotermais epigenéticos relacionados ao aquífero Guarani, representando novos guias prospectivos (ARENA et al., 2014).

Província Mineral de Carajás

A Província Mineral Carajás destaca-se mundialmente por apresentar a maior quantidade conhecida de importantes depósitos IOCG (Figura 2). Os depósitos IOCG de Carajás são também considerados os únicos de classe mundial de idade arqueana, formados em eventos hidrotermais em ca. 2,70 Ga e ca. 2,57 Ga (RÉQUIA et al., 2003; TASSINARI et al., 2003; TALLARICO et al., 2005; MORETO et al., 2015a, 2015b), embora alguns depósitos registrem também idades paleoproterozoicas (ca. 1,88 Ga) (TALLARICO, 2003; SILVA et al., 2005; MORETO et al., 2015a, 2015b).

Os depósitos IOCG de Carajás (Figura 3) se concentram em importantes corredores estruturais associados às zonas de cisalhamento de Cinzento ao norte (Salobo, Igarapé Bahia/Alemão, Gameleira, Pojuca, Paulo Afonso, Furnas, Pólo e Igarapé Cinzento), e de Canaã

ao sul (Sossego, Cristalino, Alvo 118, Borrachudos, Castanha, Bacaba, Bacuri, Visconde e Jatobá).

Os atributos geológicos dos depósitos IOCG de Carajás são muito variáveis (LINDENMAYER, 1990, 2003; HUH; NASCIMENTO, 1997; ALMADA; VILLAS, 1999; RÉQUIA et al., 2003; TALLARICO et al., 2005; VILLAS et al., 2005; DREHER et al., 2008; MONTEIRO et al., 2008a, 2008b; XAVIER et al., 2010, 2012; MELO et al., 2014). Esses depósitos são hospedados tanto em unidades metavulcanossedimentares neoarqueanas do Supergrupo Itacaiúnas (Figura 3), como em gnaisses e migmatitos do embasamento e apresentam relação espacial ou temporal com intrusões neoarqueanas félsicas (granitos e pórfiros) e máficas (dioritos, gabros e gabronoritos).

As extensas zonas de alteração hidrotermal sódica, sódica–cálcica, potássica e clorítica, assim como o enriquecimento em óxidos de ferro (magnetita >> hematita) são típicas. Associações minerais de alta temperatura com almandina–grunerita–biotita–magnetita caracterizam os depósitos do setor norte, enquanto os depósitos do setor sul apresentam zonas de alteração hidrotermal controladas pelo nível crustal de formação, como, por exemplo, predominância de escapolita, albita–actinolita, magnetita–apatita em depósitos formados em níveis intermediários, e de feldspato potássico e clorita nos níveis mais rasos (MONTEIRO et al., 2010).

Os corpos de minério se associam a brechas com calcopirita ou bornita–calcocita. As assinaturas isotópicas (O, H, B, Cl), assim como os estudos de inclusões fluidas, apontam para a natureza híbrida dos sistemas IOCG de Carajás, com herança de componentes mantélicos, magmáticos e externamente derivados, marinhos e meteóricos (CHIARADIA et al., 2006; DREHER et al., 2008; MONTEIRO et al., 2008a, 2008b; XAVIER et al., 2008; PESTILHO, 2011; TORRESI et al., 2012).

O ambiente geotectônico representou um fator de primeira ordem para a formação dos depósitos IOCG, que são relacionados a extensas zonas de cisalhamento E–W translitosféricas. A assinatura típica dos depósitos IOCG, enriquecidos em Cu, Ni, Co, EGP, U, LREE, P, Cl e F, pode refletir a composição de fluidos derivados da cristalização de magmas gerados a partir da fusão do manto litosférico subcontinental metassomatizado, devido à uma subdução prévia (GROVES et al., 2010) ou à interação com plumas mantélicas (TEIXEIRA et al., 2015). Múltiplos episódios de circulação de fluidos hidrotermais teriam sido responsáveis pela lixiviação, concentração e (re) mobilização de metais e outros elementos químicos. Semelhanças na evolução de fluidos nos sistemas hidrotermais arqueanos e paleoproterozo-



Figura 2 Distribuição dos depósitos de cobre mundiais e do Brasil segundo as classes minerais mais importantes. Em termos mundiais, os depósitos de Cu do tipo pórfiro relacionados a margens ativas representam os maiores recursos de cobre, enquanto no Brasil os depósitos IOCG, sobretudo os da Província Mineral de Carajás, arqueana, têm relevância econômica (Fonte: Elaborada pelos autores).

zoicos também refletem heranças de componentes a partir de mecanismos de interação fluido-rocha, incluindo zonas previamente mineralizadas.

Os depósitos cupro-auríferos da Província Carajás incluem, além dos IOCG, depósitos sem significativos conteúdos de óxidos de ferro, tais como o depósito de Cu-Au-(Mo) de Serra Verde (VILLAS; SANTOS, 2001; REIS; VILLAS, 2002; MARSCHIK et al., 2005) e os depósitos paleoproterozoicos de Cu-(Au) de Águas Claras (VILLAS; SILVA, 1998), de Cu-Au-(W-Bi-Mo-Sn) de Breves (TALLARICO et al., 2004; XAVIER et al., 2005; BOTELHO et al., 2005) e de Cu-Au-(Li-Be-Sn-W) de Estrela (LINDENMAYER et al., 2005), que apresentam padrões distintos de alteração hidrotermal, com zonas de *greisens* superpostas.

O depósito de Cu-Zn Pojuca Corpo Quatro, descoberto na década de 1970, difere dos demais por apresentar características de depósitos VHMS. É hospedado por unidades metavulcanossedimentares e apresenta mineralização primária *stratabound*, com calcopirita, pirrotita e esfalerita, e mineralização remobilizada, com pirrotita, calcopirita e molibdenita, descrita como um produto de eventos hidrotermais do tipo IOCG posteriores (SCHWARZ; FRANTZ, 2013), associados à colocação do granito anorogênico Pojuca (ca. 1,88 Ga) (MEDEIROS FILHO; VILLAS, 1985). Rochas com

antofilita-cordierita representariam o produto metamórfico de rochas de zonas de alteração hidrotermal formadas por processos exalativos singenéticos de fundo oceânico (MEDEIROS FILHO; VILLAS, 1985).

Arco Magmático de Mara Rosa

O depósito de Cu-Au-(Zn-Mo-Pb) de Chapada e os depósitos de Corpo Sul e Suruca, em Goiás, são hospedados em quartzo-feldspato-biotita, xistos associados a anfibolitos, atribuídos à sequência metavulcanossedimentar neoproterozoica do Arco Magmático de Mara Rosa. Nessa sequência se observam também intrusões de diorito e de quartzo diorito. As rochas hospedeiras e as zonas mineralizadas foram intensamente deformadas e metamorfasadas nas fácies anfibolito durante o evento colisional Brasileiro (KUYUMJIAN et al., 2010; YAMANA GOLD, 2014; OLIVEIRA et al., 2014). A alteração hidrotermal pré-metamórfica foi interpretada como formada por zonas de propilitização, biotitização, sericitização e argilitização. O modelo genético proposto para Chapada é o de um depósito de Cu-Au do tipo pórfiro metamorfasado (KUYUMJIAN et al., 2010; YAMANA GOLD, 2014; OLIVEIRA et al., 2014) e, de acordo com esse modelo, as intrusões dioríticas representariam a fonte dos fluidos magmáticos que geram o sistema hidrotermal.

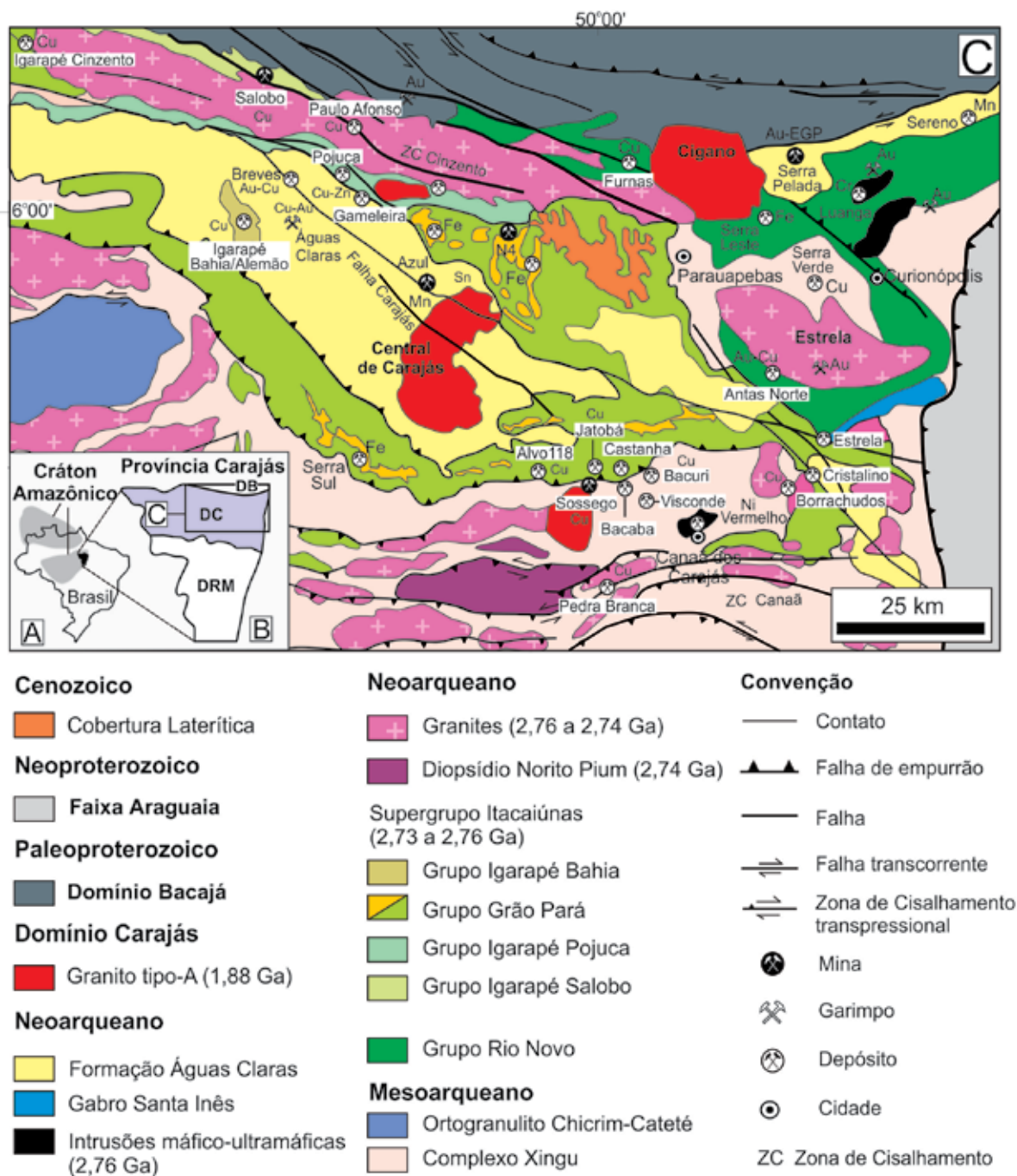


Figura 3 (A) Localização da Província Carajás no Crátão Amazônico; (B) Divisão da Província Carajás nos domínios Rio Maria (DRM) e Carajás (DC), limitado a norte pelo Domínio Bacajá (DB); (C) Mapa geológico do Domínio Carajás da Província Carajás e áreas adjacentes (VASQUEZ et al., 2008, modificado) com a localização dos depósitos minerais.

Distrito Cuprífero do Vale do Rio Curaçá

O Vale do Rio Curaçá representa o distrito cuprífero mais antigo do Brasil. Insere-se no Orógeno Itabuna–Salvador–Curaçá, que representa um cinturão orogênico paleoproterozoico localizado na borda leste do Cráton do São Francisco. De acordo com Teixeira et al. (2010a), mais de 300 intrusões máficas–ultramáficas foram identificadas nos complexos Caraíba (ortognaisses granulíticos arqueanos; ca. 2,69 a 2,63 Ga) (SILVA et al., 1997) e Tanque Novo–Ipirá (sequência metavulcanossedimentar).

Os principais corpos mineralizados (Caraíba, Alvo R22, Surubim, Vermelhos e Sussuarana) são hospedados por piroxenitos, noritos e glimeritos. Apresentam sulfetos *intercumulus* (calcopirita, bornita, covelita, cubanita, digenita, pirita, pirrotita e pentlandita) disseminados e em rede, considerados ortomagmáticos (DELGADO; SOUZA, 1975; LINDENMAYER, 1982). Contudo, também ocorre uma fase de mineralização epigenética estruturalmente controlada, constituindo veios e brechas com calcopirita e bornita na matriz, que são acompanhadas por conteúdos expressivos de magnetita, concentrações anômalas de apatita e zircão, e alteração sódica (albita–andesina) localizada, além de intenso metassomatismo potássico com formação de microclínio e flogopita (TEIXEIRA et al., 2010a; GARCIA, 2013). Esse último evento foi responsável pela formação de rochas ricas em feldspato potássico a partir de metabasitos deformados, onde zonas hidrotermalizadas com sericita, clorita, hematita e barita são também reconhecidas. Desta forma, segundo Garcia (2013), o modelo evolutivo dos depósitos do Vale do Rio Curaçá aponta para uma história multifásica, incluindo: (i) mineralização primária magmática (ca. 2,6 Ga); (ii) edificação do orógeno Itabuna–Salvador–Curaçá, com metamorfismo progressivo e granito-gênese associados (ca. 2,08 Ga); (iii) remobilização hidrotermal durante o colapso orogênico e instalação de um sistema IOCG (ca. 2,04 Ga) associado à mineralização epigenética; (iv) soerguimento do orógeno e metassomatismo tardio (ca. 1,92 Ga).

Depósito Serrote da Lage

O depósito de Serrote da Lage em Craíbas/Arapiraca (AL), descoberto em 1982 pela DOCEGEO, se associa à sequência metavulcanossedimentar do Grupo Jaramataia, constituída por gnaisses quartzosos e granada-biotita gnaisses, mármore, rochas calciossilicáticas e formações ferríferas subordinadas, e à Suíte Serrote da Lage, que representa um complexo máfico–ultramáfico proterozoico. Esse complexo, constituído por corpos de ilmenita–magnetitito, ortopiroxenito e no-

rito, foi fortemente tectonizado, metamorfsado nas fácies granulito e hidrotermalizado (FOO et al., 2012). A mineralização magmática de Cu–Fe–Au ocorre disseminada nos magnetititos e nos magnetita noritos e é representada por calcopirita e bornita como fase *intercumulus*, com magnetita, hercinita e piroxênio na fase *cumulus*. Houve remobilização de calcopirita e bornita em fraturas e em brechas nas rochas metavulcaníticas e metamáficas, acompanhada por alteração hidrotermal com biotita e anfibólio, considerada epigenética e comparável a de sistemas hidrotermais IOCG (FOO et al., 2012).

PRODUÇÃO E RESERVAS CONHECIDAS

As reservas brasileiras de cobre lavráveis somaram, em 2013, 11,14 Mt de Cu contido (LIMA; NEVES, 2014), representando 1,6% das reservas mundiais (690 Mt de Cu contido). Mais de 87% dessas reservas se concentram na Província Mineral de Carajás e adjacências (região de Tucumã), no Estado do Pará. As minas de Salobo e Sossego totalizam reservas de 1.491,40 Mt @ 0,9% Cu, enquanto os recursos dos demais depósitos cupríferos conhecidos na província (Igarapé Bahia–Alemão, Cristalino, Alvo 118, Furnas, Paulo Afonso, entre outros) superam 2.500 Mt @ 0,7% (Tabelas 1 e 2) (ARAÚJO, 2014).

As reservas de cobre também são encontradas em Goiás (Mina de Chapada em Alto Horizonte, Americano do Brasil, Bom Jardim de Goiás e Niquelândia), Bahia (Vale do Rio Curaçá em Curaçá e Jaguariri), Rio Grande do Sul (Caçapava do Sul e Lavras do Sul), Alagoas (Serrote da Lage em Arapiraca), São Paulo (Santa Blandina em Itapeva), Minas Gerais (Fortaleza de Minas) e Mato Grosso (Aripuanã e Rio Branco), como apresentado na Tabela 1.

Em 2014, a produção de cobre se concentrou em poucas minas operadas pelas companhias VALE (Sossego, PA), Salobo Metais (Salobo, PA), Mineração Maracá (Chapada, GO), Mineração Caraíba (Pilar–Surubim, BA), Votorantim Metais Níquel (Niquelândia, GO e Fortaleza de Minas, MG) e a Prometalica Mineração Centro-Oeste (Americano do Brasil, GO) (IBRAM, 2012; DNPM, 2014; LIMA; NEVES, 2014). A produção de cobre no país totalizou 210.700 t de concentrado de Cu em 2012 (1,3% da produção mundial) e 261.950 t em 2013 (1,5% da produção de cobre mundial).

As minas de cobre Sossego e Salobo foram as primeiras da Província Mineral de Carajás a entrarem em produção, respectivamente em 2004 e 2011, e respondem por uma parte significativa da produção

de cobre do país (Tabela 1). A mina de Sossego, em Canaã dos Carajás (PA), apresenta produção estável de 140 mil t/ano de Cu contido de concentrado, com previsão de vida útil até 2024. A mina de Salobo iniciou as operações na Fase I, em 2011, com capacidade de produção anual de 100.000 t de Cu e deve concluir a integração com a Fase II, em 2015, alcançando o dobro de sua capacidade de produção (ARAÚJO, 2014), com vida útil de 50 anos. Devido ao aumento de produção da mina de Salobo, em Carajás, a produção de cobre brasileira medida pelo Índice de Produção Mineral (IPM), em 2014, apresentou crescimento de 15,1% em relação à produção de 2013 (DNPM, 2014; LIMA; NEVES, 2014), representando 5,08% do valor total de produção mineral brasileira.

Outros projetos da VALE em Carajás poderão resultar em aumento da produção de cobre nos próximos anos, dependendo de fatores econômicos e ambientais, tais como: Alvo 118 com mineração e refino de cobre por SXEW, objetivando produção de 38 mil t/ano de cátodo de cobre; Alemão, com estimativa de 80.000 t/ano de Cu contido em concentrado; e Cristalino, com produção de 100.000 t/ano de Cu contido em concentrado (Tabela 2). Esse último, localizado a 45 km a leste da Mina de Sossego, poderá alimentar a planta de processamento dessa mina, com vida útil prevista até 2024 (ARAÚJO, 2014), assim como corpos satélites dessa mina (Bacaba, Visconde, Bacuri, Jatobá, Castanha).

Tabela 1 Principais minas de cobre do Brasil com dados relativos a reservas iniciais, teores e produção (TPa).

Depósito (Empresa)	Descoberta	Período de exploração	Tipologia	Atributos Geológicos	Reservas/ e teores	Produção de Concentrado
Salobo, PA (VALE)	1974	2011 – Atual	IOCG (1) (2) (3)	Minério com cc–bn–mag associado a rochas com mag–alm–gru–bt–tur (1)	1.136,4 Mt @ 0,71% Cu e 0,4 g/t Au (4)	Cu: 200.000 (Fase I-II) (*) Au: 5; Ag: 500
Sossego, PA (VALE)	1997	2004 – Atual	IOCG (5)	Brechas com ccp–py–mag e zonas com alteração Na e Na–Ca (Sequeirinho) e K e chl (Sossego) (5)	355 Mt @ 1,1 % Cu e 0,28 g/t Au (6)	Cu: 140.000
Chapada, GO (Yamana)	1973	2007 – Atual	Cu–pórfiro (7) (8)	Disseminações de ccp–py–mag–(bn–mo–sp–gn) em gnaisses e xistos cortados por intrusões dioríticas (7)	479,843 Mt @ 0,25 g/t de Au e 0,29 % de Cu (8)	Cu: 65.000
Caraíba, BA (Mineração Caraíba)	1874	1982 – Atual	Segregação magmática/ IOCG (9)(10)	Ccp–bn disseminada em piroxenitos (intrusão máfica–ultramáfica) e ccp–bn em brechas com alteração hidrotermal (Fe–K) associada (9)	Pilar: 24,64 Mt @ 1,8 % Cu; Surubim: 8,72 Mt @ 0,88% Cu; Vermelhos: 51,41 Mt @ 0,91 % Cu	Cu: 28.000
Americano do Brasil, GO (Prometalica)	1969	2006 – Atual	Segregação magmática (11)	Sulfetos (po, py, ccp, pn) maciços e disseminados e em rede em intrusão máfica–ultramáfica	3,1 Mt @ 1,12 % Ni e 1,02 % Cu (11)	Cu: 8.500 Ni: 6.000

Depósito (Empresa)	Descoberta	Período de exploração	Tipologia	Atributos Geológicos	Reservas/ e teores	Produção de Concentrado
Buriti, GO (Votorantim Metais)	1908	1979 – Atual	Níquel laterítico (12)	Minério saprolítico silicatado (gar e Ni-sme) e oxidado (gt), com Cu–Co, formado a partir de dunitos e piroxenitos (12)	53 Mt @ 1,45 % Ni; 0,172% Co; 0,05% Cu (13)	Cu: 1.200; Co: 1.700; Ni: 20.000
Santa Rita, BA (Mirabela Mineração)	1985	2010 – Atual	Segregação magmática (14)	Nível estratiforme com sulfetos disseminados (Ni–Cu–PGE) em sequência cumulática em intrusão acamadada (14)	121 Mt @ 0,60 % Ni, 0,16 % Cu, 0,016 % Co e 91 ppb Pt (14)	Ni: 150.000
O'Toole, Fortaleza de Minas, MG	1983	1997 – 2013	Segregação magmática/ Remobilização hidrotermal (15) (16)	Sulfetos (po, pn, ccp, mag, EGP) maciços brechoides e disseminados em komatiitos e vênulas e veios tardios (15) (15)	10 Mt @ 2,5% Ni, 0,4% Cu, 500 ppm Co, 0,7 g/t Pt, Pd e Au (17)	Ni–Cu–Co: 150.000
Cabaçal, MT	1879	1987 – 1991	VHMS/Remobilização em zona de cisalhamento (18)	Sulfetos (py, po, gn, sp, ccp, Au, Bi) maciços, venulares e brechados em vulcânicas félsicas e tufitos com ser, chl, silicificação (18)	869.279 t @ 0,82% Cu e 5 g/t Au (18)	
Santa Blandina, SP	1941	1945 – 2004	Skarn de Cu–Au (19)	Filões com py, ccp e bn em escarnito (grs–adr, di) no contato entre granito e rochas carbonáticas (19)	576.844 t @ 2,62% Cu	Cu: 640
Camaquã (Uruguai e São Luiz)	1865	1875 – 1996 com interrupções	Epitermal distal (20) (21)	Sulfetos (cc–bn, py, ccp, qtz, hem, brt) disseminados/ filões em rochas siliciclásticas da Bacia do Camaquã (20)	22,53 Mt @ 0,76% Cu (1901–1996) (21)	3,5 Mt de minério com 44.000 t de Cu (até 1996)
Pedra Verde, CE	1833	1960 – 1994 com interrupções	Depósito em rochas sedimentares	Sulfetos (mrc, py, ccp, bn, cc, Ag) disseminados em filito com cal–chl, ser, hem e silicificação (22)	44,23 Mt @ 0,9% Cu	Sem informação

(*) Previsão; TPa = toneladas por ano; (1) LINDENMAYER (2003), (2) RÉQUIA et al. (2003), (3) MELO (2014), (4) ARAÚJO (2014), (5) MONTEIRO et al. (2008), (6) LANCASTER et al. (2000), (7) KUYUMJIAN et al. (2010), (8) YAMANA GOLD (2014), (9) TEIXEIRA et al. (2010a), (10) GARCIA (2013), (11) MOTA-e-SILVA (2011), (12) OLIVEIRA (1990), (13) VOTORANTIM METAIS (2015), (14) BARNES et al. (2011), (15) BRENNER et al. (1990), (16) CARVALHO; BRENNER (2010), (17) BRENNER (2007), (18) PINHO et al. (2010), (19) PARISOT et al. (1990), (20) BETTENCOURT (1976), (21) TONIOLO et al. (2010), (22) MATOS (2012). Abreviações: adr = andradita; alm = almandina; Bi = bismuto nativo; bn = bornita; brt = barita; bt = biotita; cal = calcita; cc = calcocita; ccp = calcopirita; chl = clorita; di = diopsídio; gar = garnierita; gn = galena; grs = grossulária; gru = grunerita; gt = goethita; hem = hematita; mag = magnetita; mo = molibdenita; mrc = marcassita; Ni-sme = esmectita níquelífera; pn = pentlandita; py = pirita; po = pirrotita; sp = esfalerita; qtz = quartzo; ser = sericita; tur = turmalina; Na = zona de alteração hidrotermal sódica; Na–Ca = alteração sódico-cálcica; K = alteração potássica; Fe–K = alteração ferro-potássica.

No Vale do Curaçá, na Bahia, a mina subterrânea de Pilar (Mineração Caraíba), em Jaguarari, foi responsável por até 80% da produção de minério e de concentrado de cobre até o começo dos anos 2000, antes do início da exploração na Mina do Sossego, em Carajás. Produz, anualmente, mais de 852.383 t de minério de cobre, enquanto a Mina de Surubim (Mineração Caraíba), em Curaçá, extrai 1.243.690 t de minério de cobre em mina a céu aberto. A Mina de Vermelhos, em Juazeiro (BA), tem capacidade de produção de 30.000 t/ano de Cu contido de concentrado, com início de produção em 2016. A Mina de Chapada (Mineração Maracá – Yamana Gold), em Alto Horizonte (GO), opera desde 2007 com capacidade de 65.000 t/ano de Cu contido de concentrado, com planejamento operacional inicial até 2019 (YAMANA GOLD, 2014, 2015). O início da operação dessa mina, assim como as de Sossego e Salobo, permitiu que a produção de cobre no país alcançasse um novo patamar.

Em relação aos projetos futuros, na Província Mineral de Carajás e adjacências, os depósitos de Pedra Branca (16,74 Mt @ 2,29% Cu e 0,66 ppm Au), Antas

Norte (6,38 Mt @ 2,38% Cu e 0,50 ppm de Au) e Antas Sul (10,08 Mt @ 0,82% Cu e 0,2 ppm de Au) (MOTTRAM, 2014) estão em desenvolvimento pela Avanco Resources Limited. Esses apresentam alteração hidrotermal semelhante a dos depósitos IOCG. Com decreto de lavra obtido em 2015, há previsão de produção anual de 12.000 t de concentrado de cobre e de 217 kg de Au na Mina Antas Norte.

Em Tucumã (PA), encontra-se o depósito de Boa Esperança, localizado a aproximadamente 180 km a sudoeste de Carajás. Foi descoberto em 2003 pela Codelco do Brasil Mineração Ltda, que transferiu os direitos minerários para a Mineração Caraíba em 2007. O depósito representa um corpo de brecha mineralizado em Cu–Co–Mo associado a intensa alteração hidrotermal potássica, clorítica e carbonática (HENRIQUE et al., 2013) e é considerado uma variante dos depósitos do tipo IOCG sem ouro. Os recursos são estimados em 66,5 Mt com teores médios de 0,72% Cu, com previsão de entrada em operação para 2016, com produção de 30.000 t/ano de concentrado de Cu.

Tabela 2 Principais depósitos de cobre do Brasil com dados relativos a recursos, teores e capacidade de produção de concentrado prevista (TPa).

Depósito (Empresa)	Descoberta	Período de exploração	Tipologia	Atributos Geológicos	Recursos/ e teores	Produção
Cristalino, PA (VALE)	1884	2016 (*)	IOCG (1)	Brechas com ccp–py–mag em rochas metavulcânicas máficas e félsicas com alteração Na, K, chl (1)	482 Mt @ 0,65% Cu e 0,06 g/t Au (2)	Cu: 100.000
Alvo 118, PA (VALE)	1997	2016 (*)	IOCG	Brechas com ccp–py–hem associadas à alteração K e chl (3)(4)	170 Mt @ 1,0% Cu e 0,3 g/t Au (5)	Oxidado: 38.000 (*)
Antas Norte e Sul, PA (Avanco)	2011	2015 (*)	Variante dos IOCG (6)	Brechas com ccp e alteração hidrotermal (act, bt), próximo ao granito Estrela e gabro	6,38 Mt @ 2,38% de Cu; 10,08 Mt @ 0,82% de Cu (6)	Cu: 12.000 Au: 217 kg/ano
Boa Esperança, PA (Mineração Caraíba)	2003	2016 (*)	Variante dos IOCG	Brecha mineralizada em Cu–Co–Mo. Intensa alteração hidrotermal (K, chl e cal) (7).	66,5 Mt @ 0,72% Cu (7)	Cu: 30.000
Aripuanã, MT (Votorantim Metais)	1980	2018 (*)	VHMS + metamorfismo de contato e cisalhamento (8)	Stringer com sp, po, gn, py e ccp e sulfetos maciços, bandados, e disseminados em vulcânicas bimodais com chl, cal, bt, tr (8)	34 Mt @ 4,27% Zn, 1,50% Pb, 0,29% Cu, 0,30 g/t Au and 37,39g/t Ag (9)	Cu: 4.000 Zn: 65.000 Pb: 25.000
Serrote da Lage, AL (Vale Verde/ Aura Minerals)	1982	2016 (*)	Segregação magmática/ IOCG (10)	Ccp–bn–py–po <i>intercumulus</i> em noritos em intrusão máfica–ultramáfica metamorfisada e remobilização de ccp–bn em fraturas e brechas	170 Mt @ 0,51% Cu, 0,09 g/t Au, 14,8 % Fe (10)	Cu: 40.000

Depósito (Empresa)	Descoberta	Período de exploração	Tipologia	Atributos Geológicos	Recursos/ e teores	Produção
Igarapé Bahia/ Alemão, PA (VALE)	1974/1996	Au: 1992 – 2002	Au laterítico e IOCG (11)	Brecha com ccp–mag–bn–mo–co em rochas vulcanossedimentares com intensa cloritização	219 Mt @ 1,4% Cu e 0,86 g/t Au (11)	Au: 60 t (1992–2002) Cu: 80.000
Furnas, PA (VALE)	1978		IOCG	Brechas com ccp–bn associadas a rochas com mag–alm–gru	500 Mt @ 0,7 % Cu	Sem informação
Gameleira, PA (VALE)	1970		IOCG	Veios e brechas com ccp–bn em rochas com am–pl–qtz, bt–qtz–alm e mag–qtz–gru (12)	100 Mt @ 0,7% Cu (12)	Sem informação
Pojuca, PA (VALE)	1970		VHMS (13)	Mineralização <i>stratabound</i> (ccp, py, po, sp) em rochas vulcanossedimentares	58 Mt @ 0,87% de Cu e 0,90% de Zn (13)	Sem informação
Breves, PA (VALE)	1998		Depósito polimetálico de Cu–Au–(Ag–W–Bi–Mo–Sn) (14)	Minério disseminado/ <i>stockwork</i> (ccp, apy, py, mo, po, wo, cst, bis) em zona apical de granito tipo A intrusivo em rochas sedimentares	50 Mt @ 1,22% Cu, 0,75 g/t Au, 2,4 g/t Ag, 1200 g/t W, 175 g/t Mo, 75 g/t Bi, 70 g/t Sn (14)	Sem informação
Estrela, PA (VALE)	1980		Depósito polimetálico de Cu–Au–(Li–Be–Sn–W) (15)	Veios/ brechas com ccp, Co–py, Ni–po, mo e bn em metandesitos e gabros com alteração K e <i>greisens</i> , próximo à cúpula de granito do tipo A	230 Mt @ 0,5% Cu (15)	Sem informação
Pedra Branca, PA (AVANCO)	2003		IOCG (6)	Corpos tabulares com ccp–py–po hospedados por granito cisalhado, intrusivo em gnaisses, e diorito (6)	16,74 Mt com 2,29% de Cu e 0,66 Au (6)	Sem informação
Limoeiro, PE (Votorantim Metais)	2009		Segregação magmática (16)	Po–ccp–pn disseminados no topo de uma intrusão ultramáfica tubular conolítica (16)	35 Mt @ 0,25 Ni, 0,27% Cu, 0,4 ppm Pd, 0,15 Pt (16)(17)	Sem informação
Palmeirópolis, GO	1974		VHMS	Sulfetos (po, py, sp, ccp, gn) maciços e disseminados em anfibolitos (com alm–bt, ath–bt) (18)	4 Mt @ 1,23% Cu; 4,64% Zn; 0,72% Pb; 25,1 g/t Ag (18)	Sem informação
Bom Jardim de Goiás, GO	1974		VHMS (19)	<i>Stockwork</i> com ccp e py com silicificação associada, hospedado por sequência vulcanossedimentar	4,57 Mt @ 0,92% Cu (19)	Sem informação

(*) Previsão; (1) HUHNS et al. (1999), (2) NCL BRASIL (2005), (3) TALLARICO (2003), (4) TORRESI et al. (2012), (5) RIGON et al. (2000), (6) MOTTRAM (2014), (7) HENRIQUE et al. (2013), (8) LEITE et al. (2005), (9) VOTORANTIM METAIS (2015), (10) FOO et al. (2012), (11) TALLARICO et al. (2005), (12) CORDEIRO (1999), (13) MEDEIROS NETO; VILLAS (1985), (14) NUNES et al. (2001), (15) LINDENMAYER et al. (2005), (16) (17) MOTA-E-SILVA et al. (2013, 2015), (18) ARAÚJO et al. (1995), (19) OLIVEIRA (2000). Abreviações: act = actinolita; alm = almandina; am = anfibólio; apy = arsenopirita; ath = antofilita; bis = bismutinita; bn = bornita; bt = biotita; cal = calcita; ccp = calcopirita; chl = clorita; co = cobaltita; Co–py = pirita cobaltífera; cst = cassiterita; gn = galena; gru = grunerita; hem = hematita; mag = magnetita; mo = molibdenita; pl = plagioclásio; pn = pentlandita; py = pirita; po = pirrotita; sp = esfalerita; qtz = quartzo; tr = tremolita; wo = wolframita; Na = zona de alteração hidrotermal sódica; Na–Ca = alteração sódico-cálcica; K = alteração potássica.

IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E ESTRATÉGICA PARA O PAÍS

O cobre representa uma *commodity* com uso importante na indústria de base, incluindo construção civil (condutores elétricos de baixa tensão para instalações prediais, tubos e conexões para água quente e gás, laminados), setor automobilístico, telecomunicações (cabos de pares metálicos), eletrodomésticos da linha branca e energia. Seu uso é intensificado com investimentos em obras de infraestrutura, notadamente em redes de transmissão e distribuição de energia e, usualmente, seu consumo reflete o aumento da atividade econômica dos países desenvolvidos.

No segundo semestre de 2014, as vendas de minério de cobre foram responsáveis por 6,3% das receitas da CFEM. Esse valor é o segundo maior em arrecadação por *commodity*, que é fortemente concentrada no ferro, e totalizou 72,4% e 58,3% da receita da CFEM em 2013 e 2014, respectivamente. Com a queda do preço do minério de ferro, a participação do cobre nas exportações brasileira aumentou em 2014, representando 6,1% das exportações de bens minerais (LIMA; NEVES, 2014). No entanto, o cobre ainda representa uma das principais *commodities* importadas pelo país, representando, em 2014, 12,8% das importações (exceto os hidrocarbonetos), atrás apenas do potássio (42,3%) e do carvão (31,5%). O Chile é o principal país de origem das importações brasileiras, totalizando 13,7%. As importações desse minério aumentaram em US\$ 91,8 milhões, 27,2% em variação, entre o último semestre de 2013 e o de 2014 (LIMA; NEVES, 2014). No ano de 2013, o Brasil importou 507.641 t de bens primários de minério e/ou concentrado de cobre, equivalentes a 152.292 t em metal contido, a um custo de US\$ FOB 1,06 bilhão (DNPM, 2014). A expectativa é que, com a segunda etapa da mina de Salobo (PA) entrando em produção, o Brasil poderá ser autossuficiente em Cu (MARINI, 2015).

Historicamente, os custos da produção nacional de cobre têm sido elevados, superiores aos do cobre importado estabelecidos pelo LME (*London Metal Exchange*), em parte devido aos elevados custos operacionais de Carajás, que dominou a produção de cobre no país até o início dos anos 2000 (TILTON, 2015). No entanto, a abertura de novas minas (Sossego - 2004; Americano do Brasil - 2006; Chapada - 2007; Salobo - 2011) e a modernização das instalações de Carajás, com significativos investimentos em tecnologia, possibilitaram a diminuição dos custos operacionais e uma mudança significativa no minero-negócio de cobre no país.

O cenário atual representa um avanço em relação ao início do desenvolvimento dos projetos de cobre no país, caracterizado pelo extenso tempo de maturação devido à pouca experiência nacional com mineração de cobre; dependência de *know-how* e experiência relativa aos grandes depósitos de cobre nos Andes com tipos de mineralizações e depósitos distintos; dificuldades na caracterização tecnológica dos minérios e no emprego de tecnologias de beneficiamento de minérios oxidados e sulfetados; e dificuldades para o licenciamento ambiental em função das dimensões dos projetos, da legislação vigente, sua localização e da necessidade de grandes áreas para as bacias de rejeito. Parte dessas dificuldades ainda trazem impactos negativos ao desenvolvimento de novos projetos.

PERSPECTIVAS DE AUMENTO DE RESERVAS

A descoberta de novos depósitos que possam aumentar as reservas de cobre deverá considerar novos modelos genéticos e o desenvolvimento de novas províncias metalogenéticas. A classe dos depósitos IOCG, devido à sua importância econômica na Província Mineral de Carajás, representa um importante alvo de pesquisa mineral em diferentes regiões do país. Entre as áreas com projetos em desenvolvimento podem ser citadas as de São Félix do Xingu (Projeto Liberdade), Província Borborema (MAAS et al., 2003; MACHADO, 2006; HUHN et al., 2011, 2014) e o Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá (Vale do Rio Curaçá e Bloco Gavião na Chapada Diamantina Ocidental) (GARCIA, 2013; CAMPOS, 2013).

Mudanças recentes nos paradigmas relativos aos depósitos cupríferos do Vale do Rio Curaçá apontam para a importância de processos metassomáticos epigenéticos associados a zonas de cisalhamento e circulação de fluidos hidrotermais em larga escala para a gênese desses depósitos que, a exemplo do depósito Carajás, podem registrar a sobreposição de processos magmáticos e hidrotermais associados a sistemas IOCG (FRAGUAS, 2012; GARCIA, 2013). Essas novas evidências geológicas são importantes na conceituação de novos modelos exploratórios, ampliando, assim, o potencial metalogenético da região.

De acordo com Huhn et al. (2014), essa mudança de perspectiva, ao estabelecer os vínculos dos depósitos IOCG com importantes zonas de cisalhamento, possibilitou a reavaliação de áreas conhecidas na Província Borborema desde a década de 1930 e a retomada de trabalhos sistemáticos de exploração mineral pela

INCO Brasil, nos anos 2000, e pela VALE, em 2005. Assim, a potencialidade de ocorrência de depósitos do tipo IOCG no contexto da Província Borborema tem sido tema de estudos recentes, como os de Maas et al. (2003), Machado (2006) e Lisboa et al. (2009) na Faixa/Terreno Orós–Jaguaribe e na região limitada pelas cidades de Mandacaru, São Julião, Fronteiras e Pio IX (PI), além de Campos Sales (CE), bem como as pesquisas de Huhn et al. (2011) no Projeto Aurora, na região do Cariri (CE), e de Huhn et al. (2014) na região de Riacho do Pontal (BA). Parte das ocorrências cupríferas se associam a bacias pós-orogênicas ediacaranas ou cambro-ordovicianas instaladas sobre expressivos lineamentos, como, por exemplo, a Bacia de Jaibaras no Lineamento Transbrasileiro (PARENTE et al., 2011), a Bacia de Aurora no Lineamento Patos (PARENTE; ARTHAUD, 2004) e a Bacia de Carnaubinha (LISBOA et al., 2009).

Nessas áreas, os depósitos de cobre estão comumente em brechas hidrotermais quartzo–hematíticas associadas a importantes zonas de cisalhamento e com alteração hidrotermal expressiva (cloritização, albitização, alteração potássica com feldspato potássico, silicificação, sericitização, hematitização e sulfetização tardia com calcopirita, calcocita, pirita e bornita) (HUHN et al., 2011, 2014). Esses estudos, de fato, expandem o potencial para ocorrência de depósitos IOCG em terrenos e zonas de cisalhamento de idade brasileira ou eopaleozoicas, assim como evidenciam a relevância de importantes descontinuidades trans-crustais, como o contato entre a Província Borborema e o Cráton do São Francisco (HUHN et al., 2014).

Embora os depósitos de cobre conhecidos no Brasil sejam predominantemente do tipo IOCG, também ocorrem depósitos do tipo pórfiro metamorfisados, como o da Chapada (GO), o que configura um modelo exploratório adicional para antigos arcos magmáticos nos cinturões paleo- a neoproterozoicos no Brasil. Entretanto, a exploração desses terrenos tem exigido maiores estudos das alterações hidrotermais em sistemas epitermais–pórfiro, sobretudo com ênfase na identificação dos produtos metamórficos das rochas hidrotermalizadas em graus variados, assim como estudos de isótopos estáveis, dentre outras ferramentas mais atuais.

Neste contexto, destaca-se que, atualmente, muitos estudos têm sido desenvolvidos em diversas províncias metalogenéticas maduras, como na Escandinávia, por exemplo, onde mineralizações epitermais e do tipo pórfiro de Cu–Au–Mo metamorfisadas têm sido definidas (e.g. KINNUNEN, 2008; NORDIN, 2008). Face à ocorrência de depósito semelhante no Arco Mágmat

de Mara Rosa, pode ser considerado que há potencial para ocorrência de outros depósitos desse tipo no Brasil nas áreas delimitadas na Figura 1.

De modo análogo, faixas móveis como o Cinturão Ribeira (Figura 1), com diversas ocorrências de metais de base conhecidas no Vale do Ribeira em São Paulo e no Paraná, apresentam também potencial para ocorrência de mineralizações epitermais e do tipo pórfiro metamorfisadas. Os corpos de *skarns* mineralizados em cobre na mesma região, como os de Santa Blandina e Itaóca, são também sugestivos para existência de depósitos do tipo pórfiro neoproterozoicos, notadamente em regiões com rochas vulcânicas félsicas nas proximidades, que indicariam nível de erosão ainda não tão avançado.

É bem conhecida a relação existente entre mineralizações epitermais *high-sulfidation* e os pórfiros de cobre e cobre–molibdênio com ouro associado em arcos magmáticos continentais (ARRIBAS JR., 1995; SILLITOE, 2010). Recentemente, foram também caracterizadas mineralizações epitermais *high-sulfidation* metamorfisadas nas fácies anfibolito no Grupo Serra do Itaberaba (SP), do Mesoproterozoico (PÉREZ-AGUILAR et al., 2005, 2014), corroborando o potencial para depósitos do tipo pórfiro metamorfisados no Cinturão Ribeira. Rochas hiper-alumínicas têm sido descritas em diversas sequências metavulcanossedimentares no Brasil e podem ser produto metamórfico de rochas afetadas por alteração argílica avançada, embora poucos estudos sobre esse tema já tenham sido desenvolvidos sobre esse assunto no Brasil.

As sequências metassedimentares de baixo grau do Paleoproterozoico ao Neoproterozoico e, notadamente, as presentes nas bacias ediacarianas associadas aos sistemas de riftes distribuídos ao longo de todo Sudeste e Nordeste do Brasil apresentam vinculação com magmatismo intermediário a félsico com potencial para ocorrência de pórfiros alcalinos de Cu–Au, justificando pesquisas nessas regiões com esse foco exploratório.

Em unidades vulcânicas formadas em arcos continentais, Juliani et al. (2005) descreveram na Província Mineral do Tapajós uma mineralização aurífera epitermal *high-sulfidation* muito bem preservada, de ca. 1,87 Ga, associada a rochas vulcânicas e vulcanoclásticas félsicas do Grupo Iriri *sensu lato*. Essa ocorrência *per se* já definiria um potencial exploratório para pórfiros de cobre e molibdênio (ARRIBAS JR., 1995; SILLITOE, 2010) no Cráton Amazônico. Após essa descoberta, entretanto, um grande número de mineralizações epitermais vem sendo identificado na mesma província, assim como na região do Iriri e do Xingu, incluindo as dos tipos *high*-, *intermediate*- e *low-sulfidation*

(JULIANI et al., 2013), ao longo de uma faixa de mais de 600 km de extensão e 250 km de largura (Figura 1), tanto em rochas de ca. 1,88 Ga como em vulcânicas de 1,97 – 1,95 Ga (TOKASHIKI et al., 2015).

Na Província Mineral do Tapajós, sistemas epitermais *intermediate-sulfidation* mineralizados em ouro e metais de base também se associam a rochas vulcânicas e vulcanoclásticas cálcio-alcalinas félsicas de idades de ca. 2,0 Ga, 1,97 a 1,95 Ga e 1,89 a 1,86 Ga (JULIANI et al., 2013; TOKASHIKI, 2015; TOKASHIKI et al., 2015). Adicionalmente, alterações hidrotermais *low-sulfidation* têm sido verificadas em vulcânicas cálcio-alcalinas de alto potássio e em riolitos alcalinos do tipo A de ca. 1,87 Ga, às quais se associam pórfiros com alterações potássicas, sericitica, propilítica e silicificação, por vezes com sulfetos de metais de base e sulfossais, notadamente de bismuto.

Ainda na Província Mineral do Tapajós, no Chapéu do Sol, Correa-Silva (2002) e Aguja et al. (2013) demonstraram a existência de mineralizações do tipo pórfiro de Cu–Mo, associada a diques de pórfiro riódacítico em riolitos de 1,88 Ga, às quais houve a superposição de mineralização de ouro epitermal *low-sulfidation*. Echeverri-Misas (2010) e Usero et al. (2011) caracterizaram a mineralização de ouro e cobre do Palito como do tipo pórfiro, relacionada a um *stock* de granito tardi-tectônico de alto potássio. Complementarmente, Juliani et al. (2002) definiram a mineralização de ouro do Granito Batalha como magmática–hidrotermal, formada em nível crustal profundo, com alterações hidrotermais semelhantes a sistemas do tipo pórfiro.

Sabe-se que somente os magmas cálcio-alcalinos geram mineralizações *high-sulfidation* (ARRIBAS JR., 1995), mas quando esses fluidos hidrotermais migram para partes mais distais do centro eruptivo, podem ser geradas alterações *low-* ou *intermediate-sulfidation*, devido à neutralização primária dos fluidos ao reagirem com as rochas encaixantes (HEDENQUIST et al., 2000). Assim, as ocorrências de alterações hidrotermais *low-sulfidation* não excluem, em princípio, o potencial para ocorrência de pórfiros de cobre nas regiões citadas. No entanto, comumente, alterações hidrotermais *low-sulfidation* se associam a magmas do tipo I altamente evoluídos, ou do tipo A, aos quais também podem ser vinculados depósitos de classe mundial de Cu–Au (e.g. Cadia Hill, Cadia East e depósitos associados – 44 Moz Au e 7,5 Mt Cu, Lachlan Belt – Austrália) (WOOD, 2012a, 2012b, 2014). Esses depósitos geneticamente associados a pórfiros graníticos alcalinos, se formaram em períodos de tectônica extensional durante o desenvolvimento do arco magmático e constituem, hoje, importantes alvos para a pesquisa mineral de ouro e de cobre.

Juliani et al. (2013, 2014a, 2014b), com base em dados geoquímicos, petrográficos, estruturais, de ambiente de sedimentação e geofísicos, têm indicado que as zonas de cisalhamento arqueanas de Carajás parecem continuar até a Província Mineral do Tapajós, onde serviram de conduto para parte do vulcanismo e controlaram a formação de caldeiras vulcânicas paleoproterozoicas, o que sugere que a crosta arqueana continua por debaixo das sequências paleoproterozoicas, ao menos até o rio Tapajós. A região seria formada, de acordo com esses autores, pela sobreposição de pelo menos dois arcos vulcânicos continentais superpostos, em função da migração causada por alterações no mergulho da placa oceânica, denominados Arcos Tapajônicos. Essa proposição difere das interpretações anteriores, segundo as quais os arcos magmáticos seriam oceânicos e amalgamados a um núcleo arqueano, e também por inferir que a subducção deu-se aproximadamente de sul para norte, e não de sudoeste para nordeste. Essa estruturação parece ter resultado em zonamentos magmáticos e metalogenéticos que, se confirmados, resultarão em um grande potencial para pórfiros de Cu–Au, Cu–Mo–(Au) nas unidades cálcio-alcalinas e de Cu–Au nas suítes graníticas tardias, alcalinas (JULIANI et al., 2013, 2014a, 2014b) (Figura 1).

Em síntese, o ambiente tectônico e os tipos de alterações hidrotermais e mineralizações associadas, com elevado número de ocorrências de calcopirita (predominante), bornita, calcocita, molibdenita, esfalerita, galena e de pirita na Província Mineral do Tapajós são claramente indicativas de um potencial teórico para ocorrência de mineralizações do tipo pórfiro de Cu, e de Cu–Mo com ouro associado na região. Isso poderá, no futuro, propiciar o desenvolvimento de uma nova província mineral para cobre no Brasil.

Mineralizações semelhantes às anteriores têm sido, mais recentemente, descritas na Província Alta Floresta ou Juruena, em terrenos com idades paleo- a mesoproterozoicas, mas provavelmente em um nível de erosão um pouco mais acentuado que o observado em grande parte da Província Mineral do Tapajós. Assis et al. (2014) descreveram diversas mineralizações magmáticas–hidrotermais, podendo ser citados os depósitos de Au–(Cu) do Pé Quente, do Luisão e o X1, e de Au–(Cu–Pb–Zn) do Francisco e do Bigode. Todos esses depósitos foram formados entre ca. 1,78–1,77 Ga e são geneticamente relacionados à colocação de quartzo-feldspato pórfiros da mesma idade, atribuídos às suítes Colíder e Teles Pires (ASSIS, 2015). Independentemente do estilo, e com algumas distinções dos depósitos do tipo pórfiros clássicos, essas mineralizações disseminadas e controladas por estruturas, assim como as anteriormente descritas, são claramente

magmáticas–hidrotermais. Isso indica haver potencial para ocorrência de pórfiros de cobre e de cobre–ouro, em especial nas unidades formadas por magmas mais primitivos e colocados em ambiente crustal mais raso, o que deve ser também considerado nos modelos exploratórios para cobre no Brasil.

Na região de São Félix do Xingu, a sudeste do Cráton Amazônico, afloram pelo menos duas sequências de rochas vulcânicas, pertencentes às formações Sobreiro (cálcio–alcalina) e Santa Rosa (alcalina do tipo A), ambas com idades de ca. 1,88 Ga (JULIANI; FERNANDES, 2010). Nessas rochas, assim como em sub-vulcânicas e em brechas hidrotermais, foram identificadas zonas de alteração hidrotermal potássica, propilítica, sericitica e argílica intermediária (com montmorillonita + caolinita/halloisita + illita) por Cruz et al. (2015), típicas de sistemas magmáticos–hidrotermais, com fluidos derivados da consolidação de magmas misturados em diferentes proporções com águas meteóricas. Esses sistemas hidrotermais se associam predominantemente ao magmatismo alcalino que se desenvolveu no *back-arc* (FERNANDES et al., 2011) e, portanto, poderiam desenvolver pórfiros de cobre e ouro, apesar de haver poucos indícios de metais de base associados às diversas ocorrências de ouro epitermal na região.

Pelo exposto, pode-se concluir que há um grande potencial geológico para exploração de cobre em terrenos de diversas idades em diferentes regiões do país. No entanto, as características da geologia do Brasil, as coberturas de solo e os sistemas minerais identificados, indicam ser importante o desenvolvimento de técnicas e métodos exploratórios e, sobretudo, reforçam a necessidade de levantamentos geológicos mais detalhados e precisos, que busquem não apenas evidências de indícios de mineralizações, mas também de zonas de alteração hidrotermal, metamorfisadas ou não. Essas ações podem abreviar os trabalhos exploratórios e, eventualmente, propiciar a descoberta de novos e importantes depósitos de cobre e, até mesmo o desenvolvimento de novas províncias com produção de cobre no Brasil.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Jorge S. Bettencourt e aos geólogos Roque Fernandes Coelho e Diógenes de Almeida Campos pelas significativas contribuições na revisão desse texto, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico de Pesquisa (Proc.: CT-Mineral 550342/2011-7, CNPq 481969/2013-6 CNPq 308365/2014-3) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Geociências da Amazônia (Proc.: MCT/CNPq/FAPESPA/PETROBRAS 573733/2008-2) pelo apoio para o desenvolvimento das pesquisas que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALMADA, M.C.O.; VILLAS R.N. O depósito Bahia: exemplo de depósito arqueano vulcanogênico de sulfetos de Cu/Au tipo Beshi em Carajás, Pará. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 6, SBG-NN, Manaus, *Boletim de Resumos Expandidos*, p. 98-101, 1999.
- ARAÚJO, P.S. Salobo Copper/Gold Operation – VALE. SIMEXMIN 2014, ADIMB. 2014. Disponível em: <<http://www.adimb.com.br/simexmin2014/pdfs/14/SJDR/15H%20PAULO%20SILVA%20ARAUJO.pdf>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- ARAÚJO, S.M.; FAWCETT, J.; SCOTT, S.D. Metamorphism of hydrothermally altered rocks in a volcanogenic massive sulfide deposit: the Palmeirópolis, Brazil, example. *Revista Brasileira de Geologia*, v. 25, n. 3, p. 173-184, 1995.
- ARENA, K.R.; HARTMANN, L.A.; BAGGIO, S.B. Geological controls of copper, gold and silver in the Serra Geral Group, Realeza region, Paraná, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 63, p. 178-200, 2014.
- ARRIBAS JR. A. Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid. In: THOMPSON, J.F.M. (Ed). *Magmas, fluids, and ore deposits*. Mineralogical Association of Canada Short Course, v. 23, p. 419-454, 1995.
- ASSIS, R.R. *Depósitos auríferos associados ao magmatismo félsico da Província de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico: litogeoquímica, idade das mineralizações e fonte dos fluidos*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015, 363 p.
- ASSIS, R.R. et al. Metalogênese do setor leste da Província de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico. In: SILVA, M. da G. et al. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014, v. 1, p. 305-340.
- BARNES, S.J. et al. The Santa Rita Nickel Sulfide Deposit in the Fazenda Mirabela Intrusion, Bahia, Brazil: Geology, Sulfide Geochemistry and Genesis. *Economic Geology*, v. 106, n. 7, p. 1083-1110, 2011.
- BETTENCOURT, J.S. Geologia da Mina de Camaquã, RS. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1973.
- BETTENCOURT, J.S. Minéralogie, inclusions fluides et isotopes stables d'oxygène et de soufre de la mine de cuivre de Camaquã, RS (une étude préliminaire). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 29, SBG, Ouro Preto, *Anais*, v. 2, p. 409-423. 1976.
- BONGIOLO, E.M. et al. Evidence of Ediacaran glaciation in southernmost Brazil through magmatic to meteoric fluid circulation in the porphyry-epithermal Au-Cu deposits of Lavras do Sul. *Precambrian Research*, v. 189, p. 404-419, 2011.
- BOTELHO, N.F. et al. 2005. Caracterização geológica e metalogenética do depósito de Cu (Au, W, Mo, e Sn) Breves, Carajás. In: MARINI, O.J.; QUEIROZ, E.T.; RAMOS B.W. (Orgs.). *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. DNPM-CT-Mineral-FINEP-ADIMB, p. 339-389.
- BRENNER, T.L. 2007. *The Fortaleza de Minas nickel, copper, and platinoid deposits: ore types, tectonics, and volcanological aspects*. Tese de Doutorado, IGCE-UNESP, 102 p.
- BRENNER, T.L.; TEIXEIRA, N.A.; OLIVEIRA, J.A.L.; FRANKE, N.D.; THOMPSON, J.F.H. The O'Toole nickel deposit, Morro do Ferro greenstone belt, Brazil. *Economic Geology*, v. 85, p. 904-920, 1990.
- CAMPOS L.D. *O Depósito de Au-Cu Lavra Velha, Chapada Diamantina Ocidental: um exemplo de depósito da classe IOCG associado aos terrenos paleoproterozoicos do Bloco Gavião*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2013, 117 p.
- CARVALHO, S.G.; BRENNER, T.L. 2010. Depósito de Ni-Cu-Co-Au-EGP de Fortaleza de Minas, Minas Gerais. In: BRITO, R.S.C.; SILVA, M.G.; KUYUMJIAN, R.M. (Ed.) *Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo*. CPRM, 2010, p. 99-126.
- CHIARADIA, M. et al. 2006. Origin of fluids in iron oxide-copper-gold deposits: constraints from $\delta^{7}\text{Cl}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and Cl/Br. *Mineralium Deposita*, v. 41, p. 565-573.
- CORDEIRO, A.A.C. Pesquisa mineral: panorama atual da CVRD na Amazônia. Simpósio de Geologia da Amazônia, 4, SBG/NO, *Anais*, 1999, p. 80-83.
- CORRÊA-SILVA, R.H. *Caracterização de um sistema epitermal low-sulfidation (adulária-sericita) mineralizado em Au-Cu-Mo em vulcânicas paleoproterozoicas na Província Aurífera do Tapajós: implicações metalogenéticas e tectônicas*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2002, 159 p.
- COX, D.P. et al. Sediment-hosted copper deposits of the world: deposit models and database. USGS Open-File Report 03-107. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-107/>>. 2007.
- CRUZ, R.S. et al. A study of the hydrothermal alteration in Paleoproterozoic volcanic centers, São Félix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil, using short-wave infrared spectroscopy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 304, p. 324-335, 2015.
- DARDENNE, M.A.; SCHOBENHAU, S.C. Depósitos minerais no tempo geológico e épocas metalogenéticas. In: BIZZI, L.A. et al. (Ed.) *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*. CPRM, Brasília. 2003.
- DELGADO, L.M.; SOUSA, J.D. Projeto Cobre Curaçá. Geologia Econômica do Distrito Cuprífero do Rio Curaçá, Bahia, Brasil. Relatório Final. CPRM. 1975. v. IA. DNPM/CPRM.
- DIAS, J.R. et al. O corpo Várzea do Macaco e as mineralizações de cromo, níquel e cobre, Complexo Máfico-ultramáfico Jacurici, Cráton São Francisco, Bahia. *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, p. 289-308, 2014.
- DNPM. *Informe Mineral 2o/2014* (Julho-Dezembro/2014).
- DOGGETT, M. The role of exploration in future copper supply. SIMEXMIN 2014 ADIMB. Disponível em: <<http://www.adimb.com.br/simexmin2014/pdfs/13/17H05%20MICHAEL%20DOGGETT.pdf>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- DREHER, A.M. et al. New geologic, fluid inclusion and stable isotope studies on the controversial Igarapé Bahia Cu-Au deposit, Carajás province, Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 161-184, 2008.
- ECHEVERRI-MISAS, C.M. *Evolução magmática, alteração hidrotermal e gênese da mineralização de ouro e cobre do Palito Província Aurífera do Tapajós (PA)*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo, 2010, 235 p.

- FERNANDES, C.M.D. et al. High-K calc-alkaline to A-type fissure-controlled volcano-plutonism of the São Félix do Xingu region, Amazonian craton, Brazil: Exclusively crustal sources or only mixed Nd model ages? *Journal of South American Earth Sciences*, v. 30, p. 1-18, 2011.
- FERREIRA FILHO, C.F. et al. *Depósito de Níquel-Cobre Sulfetado de Santa Rita, Itagibá, Bahia, Brasil*. 39. ed. Salvador - Bahia: Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, 2013. v. 01. 59 p.
- FOO, B. et al. *Technical Report on the Feasibility Study for the Serrote da Laje Project, Alagoas State, Brazil*. NI 43-101 Aura Minerals Inc. Micon International Limited, 2012, 314 p.
- GARCIA, P.M.P. *Metalogênese dos depósitos cupríferos de Caraíba, Surubim, Vermelho e Sussuarana, Vale do Curaçá, Bahia, Brasil*. Dissertação de Mestrado, UFBA, 2013.
- GROVES, D.I. et al. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*, v. 105, p. 641-654, 2010.
- HEDENQUIST, J.W.; ARRIBAS JR., A.; GONZALEZ-URIEN, E. Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, v. 13, p. 245-277, 2000.
- HEITHERSAY, P. *Mineral resources for future generations*. SIMEXMIN 2014, ADIMB. 2014. Disponível em: <<http://www.adimb.com.br/simexmin2014/pdfs/15H%20PAUL%20HEITHERSAY.pdf>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- HENRIQUE, E.F.; ANDRADE, P.J.M.B.; VALLE, J.G.X.P. Geophysics over the Boa Esperança copper-cobalt deposit, Carajás province, Pará State, Brazil. In: *International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, 13, Rio de Janeiro, 2013, SBGF.
- HITZMAN, M.W.; SELLEY, D.; BULL, S. Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through Earth history. *Economic Geology*, v.105, p. 627-639, 2010.
- HITZMAN, M.W. Iron oxide-Cu-Au deposits: what, where, when and why? In: PORTER, T.M. (Ed.), *Hydrothermal iron-oxide copper-gold and related deposits: a global perspective*. PGC Publishing, Adelaide, 2000, p. 9-25.
- HITZMAN, M.W.; ORESKES, N.; EINAUDI, M.T. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, v. 58, p. 241-287, 1992.
- HUHN, S.R.B. et al. Descoberta do depósito Cu-(Au) Cristalino: Geologia e mineralização associada região da Serra do Rabo – Carajás – PA. In: *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 6, SBG-NN, *Anais*, Belém, 1999. p. 140-143.
- HUHN, S.R.B. et al. Caracterização geológica do prospecto de óxido de ferro-cobre-ouro (IOCG) Aurora, Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Geologia*, v. 41, n. 3, p. 525-538, 2011.
- HUHN, S.R.B. et al. Geology of the Riacho do Pontal iron oxide copper-gold (IOCG) prospect, Bahia, Brazil: hydrothermal alteration approached via hierarchical cluster analysis. *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, n. 2, p. 309-324, 2014.
- HUHN, S.R.B.; NASCIMENTO, J.A.S. São os depósitos cupríferos de Carajás do tipo Cu-Au-U-ETR? In: COSTA, M.L.; ANGÉLICA, R.S. (Coords.). *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Belém: SBG-NN, v. 1, p. 143-160, 1997.
- HUMPHREYS, D. The great metals boom: a retrospective. *Resources Policy*, v. 35, n. 1, p. 1-13, 2010.
- IBRAM. *Informações e análises da Economia Mineral Brasileira – Cobre*. 7ª Edição. 2012.
- ICSG. *Long term availability of copper*. International Copper Study Group. 2013. Disponível em: <http://www.icsg.org/index.php/the-world-of-copper/71-uncategorised/114-long-term-availability-of-copper>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- JULIANI, C. et al. The Batalha Au-Granite system – Tapajós Province, Amazonian Craton, Brazil: hydrothermal alteration and regional implication. *Precambrian Research*, v. 119, p. 225-256, 2002.
- JULIANI, C. et al. Paleoproterozoic high-sulfidation mineralization in the Tapajós Gold province, Amazonian Craton, Brazil: geology, mineralogy, alunite argon age, and stable-isotope constraints. *Chemical Geology*, v. 215, p. 95-125, 2005.
- JULIANI, C. et al. Estruturação dos arcos magmáticos paleoproterozoicos na porção sul do Cráton Amazônico: implicações geotectônicas e metalogenéticas. In: *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 13, SBG-NN, Belém. 2013 [CD-ROM]
- JULIANI, C. et al. Arcos magmáticos continentais paleoproterozoicos superpostos na porção sul do Cráton Amazônico. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 47, SBG, Salvador, 2014a. [CD-ROM]
- JULIANI, C. et al. Metalogênese da Província Tapajós. In: SILVA, M. da G. et al. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014b, v. 1, p. 229-263.
- JULIANI, C.; FERNANDES C.M.D. Well-preserved Late Paleoproterozoic volcanic centers in the São Félix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 191, p. 167-179, 2010.
- KINNUNEN, A. *A Palaeoproterozoic high-sulphidation epithermal gold deposit at Orivesi, Southern Finland*. Academic Dissertation, Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Finland. 2008.
- KLEIN, E.L.; ROSA-COSTA, L.T.; VASQUEZ, M.L. Metalogênese da borda oriental do Cráton Amazônico. In: SILVA, M. da G. et al. (Orgs.). *Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras*. CPRM, 2014. p. 171-193.
- KUYUMJIAN, R.M. et al. Depósito de cobre-ouro porfirítico Chapada, Goiás. In: BRITO, R.S.C.; SILVA, M.G.; KUYUMJIAN R.M. (Ed.) *Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo*. CPRM, 2010. p. 49-70.
- LANCASTER, J.O. et al. Discovery and geology of the Sossego copper-gold deposit, Carajás district, Pará State, Brazil. In: *International Geological Congress*, 31, *Abstracts*, Rio de Janeiro. 2000. [CD-ROM]
- LEITE, J.A.D. et al. Caracterização do depósito polimetálico (Zn, Pb, Ag, Cu-Au) de Aripuanã, Mato Grosso. In: MARINI, O.J.; RAMOS, B.W.; QUEIROZ, E.T. (Orgs.). *Caracterização de depósitos minerais de distritos mineiros da Amazônia*. Brasília. DNPM-CT-Mineral-FINEP-ADIMB, 2005, p. 601-680.

- LIMA T.M., NEVES C.A.R. (Coords). *Sumário Mineral 2014*. Vol. 34. DNPM/MME, Brasília
- LINDENMAYER, Z.G. *Evolução geológica do Vale do Rio Curaçá e dos corpos máfico-ultramáficos mineralizados a cobre*. Dissertação de Mestrado, UFBA, 1982. 140 p.
- LINDENMAYER, Z.G. *Salobo sequence, Carajás, Brasil: geology, geochemistry and metamorphism*. PhD thesis, University of Ontario, Canada, 1990. 407 p.
- LINDENMAYER, Z.G. et al. Caracterização geológica do Alvo Estrela (Cu–Au), Serra dos Carajás, Pará. In: MARINI, O.J.; RAMOS, B.W.; QUEIROZ E.T. (Orgs.). *Caracterização de depósitos minerais de distritos mineiros da Amazônia*. Brasília. DNPM-CT-Mineral-FINEP-ADIMB, 2005. p. 137-205.
- LINDENMAYER, Z.G. Depósito de Cu–Au do Salobo, Serra dos Carajás: uma revisão. In: RONCHI, L.H.; ALTHOFF, F.J. (Eds.) *Caracterização e modelamento de depósitos minerais*. Ed. Unisinos, 2003. p. 69-98.
- LISBOA, L.H. D.; ARAÚJO, J.B.; PARENTE, C.V. Indicativo de depósito de cobre epigenéticos associado à bacia molássica de Carnaubinha, Pio IX, Piauí. *Revista de Geologia*, v. 22, p. 233-241, 2009.
- MAAS, M.V.R. et al. Aplicação da geofísica aérea na exploração mineral e mapeamento geológico do setor sudoeste do Cinturão Cuprífero Orós–Jaguaribe. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n. 3, p. 279-288, 2003.
- MACHADO, M.A. *Caracterização descritiva e genética de ocorrências cupro-hematíticas no setor sudoeste do sistema Orós–Jaguaribe, Província Borborema*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2006, 118 p.
- MARINI, O.J. *Potencial mineral do Brasil*. Academia Brasileira de Ciências. 2015. (Nesse volume).
- MARSHCHIK, R. et al. Late Archean Cu–Au–Mo mineralization at Gameleira and Serra Verde, Carajás Mineral Province, Brazil: constraints from Re–Os molybdenite ages. *Mineralium Deposita*, v. 39, p. 983-991, 2005.
- MATOS, J.H. da S.N. *Evolução metalogenética da mina de cobre de Pedra Verde (CE)*. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 2012.
- MEDEIROS NETO, F.A.; VILLAS, R.N. Geologia da jazida de Cu + Au do corpo 4E/Pojuca, Serra dos Carajás. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 2, SBG-NN, Belém, *Anais*, v. 3, p. 97-112, 1985.
- MELLO, I.S.C.; BETTENCOURT, J.S. Geologia e gênese das mineralizações associadas ao maciço Itaoca, Vale do Ribeira, SP e PR. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, n. 3, p. 269-284, 1998.
- MELO, G.H.C. *Evolução temporal do depósito de óxido de ferro–cobre–ouro de Salobo, Província Carajás*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. 2014.
- MISI, A.; TEIXEIRA, J.B.G.; SÁ, J.H.S. (Orgs.) *Mapa Metalogenético Digital do Estado da Bahia e Principais Províncias Minerais*. CBPM, 2012, 244 p. + 1 CD-ROM.
- MONTEIRO, L.V.S. et al. Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints. *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 129-159, 2008a.
- MONTEIRO, L.V.S. et al. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. *Ore Geology Review*, v. 34, p. 317-336, 2008b.
- MONTEIRO, L.V.S. et al. Metalogênese da Província Carajás. In: SILVA, M. da G. et al. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014, v. 1, p. 43-91.
- MORETO, C.P.N. et al. Neoproterozoic and Paleoproterozoic iron oxide–copper–gold events at the Sossego deposit, Carajás province, Brazil: Re–Os and U–Pb geochronological evidence. *Economic Geology*, v. 110, p. 809-835, 2015a.
- MORETO, C.P.N. et al. Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide–copper–gold deposits of the Southern Copper belt, Carajás Province, Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 50, p. 517-546, 2015b.
- MOTA-E-SILVA, J. et al. Geology, petrology and geochemistry of the “Americano do Brasil” layered intrusion, central Brazil, and its Ni–Cu sulfide deposits. *Mineralium Deposita*, v. 46, p. 57–90, 2011.
- MOTA-E-SILVA, J.; FERREIRA FILHO, C.F.; GIUSTINA, M.E.S.D. The Limoeiro Deposit: Ni–Cu–PGE Sulfide Mineralization Hosted Within an Ultramafic Tubular Magma Conduit in the Borborema Province, Northeastern Brazil. *Economic Geology*, v. 108, p. 1753-1771, 2013.
- MOTA-E-SILVA, J. et al. Platinum-group minerals in the Limoeiro Ni–Cu–(PGE) sulfide deposit, Brazil: the effect of magmatic and upper amphibolite to granulite metamorphic processes on PGM formation. *Mineralium Deposita*, Online First, 2015. DOI: 10.1007/s00126-015-0585-0. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00126-015-0585-0>>. Acesso em 30 de setembro de 2015.
- MOTTRAM, S.O. Projeto Cobre/Ouro Estágios I e II (Rio Verde e Pedra Branca, Pará) - Building a copper producer in Carajás – Avanco Resources Limited. *SIMEXMIN 2014*, ADIMB. 2014. Disponível em: <<http://www.adimb.com.br/simexmin2014/pdfs/14/SJDR/17H55%20SIMON%20MOTTRAM.pdf>>; Acesso em 30 de agosto de 2015.
- MUDD, G.M.; WENG, Z.; JOWITT, S.M. A detailed assessment of global Cu resource trends and endowments. *Economic Geology*, v. 108, p. 1163-1183, 2013.
- NCL BRASIL. *Revision de La Estimación de Recursos del Proyecto Cristalino*. Vale S.A Internal Report, 2005, p. 1-103.
- NORDIN, R. The Aitik copper mine, Sweden – Exploration and expansion. In: International Geological Congress, 33, IUGS, Oslo, 2008.
- NUNES, A.R. et al. A descoberta do depósito Breves da Província Mineral de Carajás. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 7, SBG-NN, p. 57-60. 2001. [CD-ROM]
- NUNES, C.M.D. *Caracterização de um sistema epitermal high-sulfidation paleoproterozoico na Província Aurífera do Tapajós, Pará*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. 2001, 174 p.
- OLIVEIRA, C.G. et al. Metalogênese do Arco Magmático Goiás. In: SILVA, M. da G. et al. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014, v. 1, p. 455-466.

- OLIVEIRA, I.W.B. *Cobre de Bom Jardim, Estado de Goiás. Informe de Recursos Minerais. Série Oportunidades Minerais - Exame Atualizado de Projeto, nº 03, CPRM, 2000, 18 p.*
- OLIVEIRA, S.M.B. *Os depósitos de níquel laterítico do Brasil. Tese de Livre-Docência. Universidade de São Paulo. 1990. 92 p.*
- PARENTE, C.V.; ARTHAUD, M.H. Geologia e tipologia do minério da ocorrência de Cu-Fe associada à sequência metavulcano-sedimentar Cahoeirinha, região de Aurora, CE. *Revista e Geologia*, v. 17, p. 157-172, 2004.
- PARENTE, C.V. et al. Contexto geológico, tipológico e geoquímico isotópico das brechas hidrotermalizadas de ferro e cobre tipo IOCG, associadas à bacia eo-paleozoica Jaibaras, da Província Borborema, Brasil. In: FRANTZ, J.C.; MARQUES, J.C.; JOST, H. (Org.). *Contribuições à Metalogenia do Brasil. Porto Alegre: UFRGS, 2011, v. 1, p. 175-200.*
- PARISOT, J.-C. et al. Dispersão e acumulação do cobre nos produtos do intemperismo de depósitos cupríferos do Brasil. *Revista do Instituto de Geociências USP*, v. 11, n. 2, p. 21-33, 1990.
- PEREZ-AGUILAR A. et al. Stable isotopic constraints on Kuroko-type paleohydrothermal systems in the Mesoproterozoic Serra do Itaberaba Group, São Paulo State, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 18, p. 305-321, 2005.
- PEREZ-AGUILAR A. et al. Produtos metamórficos de sistemas high-sulfidation oceânicos mesoproterozoicos, Grupo Serra do Itaberaba, SP. *Revista do Instituto Geológico*, v. 35, p. 1-17, 2014.
- PESTILHO, A.L.S. *Sistemática de isótopos estáveis aplicada à caracterização da evolução dos paleo-sistemas hidrotermais associados aos depósitos cupríferos Alvo Bacaba e Alvo Castanha, Província Mineral de Carajás, PA. Dissertação de Mestrado, UNICAMP. 2011.*
- PINHO, F.E.; BARBOZA, E.S.; FERNANDES, C.J. Depósito de cobre de Cabaçal, Mato Grosso. In: BRITO R.S.C., SILVA M.G., KUYUMJIAN R.M. (Eds.) *Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo. CPRM, 2010. p. 127-146.*
- REIS, F.N.; VILLAS, R.N. Mineralização e alteração hidrotermal no depósito cupro-aurífero de Serra Verde, Província Mineral de Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 32, p. 69-86, 2002.
- REMUS, M.V.D. et al. The Camaquã Cu-(Au-Ag) and Santa Maria Pb-Zn-(Cu-Ag) mines of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. In: SILVA, M.G.; MISI, A. (Ed.) *Base Metal deposits of Brazil, MME/ CPRM/DNPM, Belo Horizonte, 1999, p. 54-63.*
- RENAC, C. et al. Isotopic fluid changes in a Neoproterozoic porphyry-epithermal system: The Uruguay mine, southern Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 60, p. 146-160, 2014.
- RÉQUIA, K. et al. Re-Os and Pb-Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, northern Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 727-738, 2003.
- RIGON, J.C. et al. Alvo 118 copper-gold deposit: geology and mineralization, Serra dos Carajás, Pará, Brazil. In: *International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro, SBG-IUGS. 2000 [CD-ROM]*
- SCHWARZ, M.; FRANTZ, J.C. Depósito de Cu-Zn Pojuca Corpo Quatro: IOCG ou VMS? *Pesquisas em Geociências*, v. 40, n. 1, p. 5-19, 2013.
- SILLITOE, R. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, v. 105, p. 3-41, 2010.
- SILVA, C.M.G., VILLAS, R.N. The Águas Claras Cu-sulfide ± Au deposit, Carajás region, Pará, Brazil: geological setting, wall-rock alteration and mineralizing fluids. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, n. 3, p. 315-326, 1998.
- SILVA, L.C. et al. U-Pb SHRIMP ages in the Itabuna-Caraíba TTG high-grade complex: the first window beyond the Paleoproterozoic overprinting of the eastern Jequié Craton, NE Brazil. In: *International Symposium. Granites and Associated Mineralizations, 2, Salvador, Extended Abstracts, 1997. p. 282-283.*
- SILVA, M.G. et al. Geologia e mineralizações de Fe-Cu-Au do Alvo GT46 (Igarapé Cinzento, Carajás). In: MARINI, O.J.; QUEIROZ, E.T.; RAMOS, B.W. (Eds.) *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. DNPM-CT-Mineral-FINEP-ADIMB, 2005. p. 94-151.*
- SILVA, M.G. et al. Metalogênese do Setor Setentrional do Cráton do São Francisco. In: SILVA, M.G. et al. (Orgs.) *Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras. CPRM, 2014. p. 93-118.*
- SYKES, J.P.; PACKY, D.J.; TRENCH, A. An economist, a scientist and a geologist walk into a bar and discuss resource depletion. Centre for Exploration Target. CET Newsletter, v. 25, p. 1-4. 2013. Disponível em: <<http://www.cet.edu.au/secure-pdf/depletion.pdf>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- TALLARICO, F.H.B. *O cinturão cupro-aurífero de Carajás, Brasil. Tese de Doutorado, UNICAMP, 2003. 229 p.*
- TALLARICO, F.H.B. et al. Geological and SHRIMP II U-Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 39, p. 68-86, 2004.
- TALLARICO, F.H.B. et al. Geology and SHRIMP U-Pb geochronology of the Igarapé Bahia deposit, Carajás copper-gold belt, Brazil: an Archean (2.57 Ga) example of iron-oxide Cu-Au-(U-REE) mineralization. *Economic Geology*, v. 100, p. 7-28, 2005.
- TALLARICO, F.H.B.; MELLITO, M.K.; BABINSKI M. Age and origin of the Cu-(Au-Mo-Ag) Salobo 3A ore deposit, Carajás Mineral Province, Amazonian craton, northern Brazil. *Episodes*, v. 26, p. 2-9, 2003.
- TEIXEIRA, J.B.G. et al. Depósitos de cobre do Vale do Rio Curaçá, Bahia. In: BRITO, R.S.C.; SILVA M.G.; KUYUMJIAN, R.M. (Ed.) *Modelos de depósitos de Cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo. CPRM, 2010a. p. 71-96.*
- TEIXEIRA, J.B.G.; LINDENMAYER, Z.G.; SILVA M.G. Depósitos de óxido de Fe, Cu-Au de Carajás. In: BRITO, R.S.C.; SILVA, M.G.; KUYUMJIAN, R.M. (Org.) *Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo. CPRM, 2010, p. 15-48.*
- TEIXEIRA N.A. et al. Alkaline Porphyry Copper Deposits And Iocg – What Is The Link? In: *Simpósio de Geologia da Amazônia, 14, SBG/NO, 2015 [CD-ROM]*.
- TILTON, J.E. *World metal demand: trends and prospects. Resources for the Future Press, 2015. 368 p.*

- TOKASHIKI, C. do C. *Mineralizações low- e intermediate-sulfidation de ouro e de metais de base em domos de riolito paleoproterozoicos na porção sul da Província Mineral do Tapajós*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências – USP, 2015.
- TOKASHIKI, C. do C. et al. Eventos vulcânicos de 1,97 Ga com mineralizações de ouro epitermais low- e intermediate-sulfidation na porção sul da Província Mineral do Tapajós (PA). In: GORAYEB, P.S.S.; LIMA, A.M.M. (Org.) *Contribuições à Geologia da Amazônia*, SBG-NN, v. 9, p. 119-138, 2015.
- TONIOLO, J.A.; REMUS, M.V.D.; REISCHL, J.L. Depósito de cobre das Minas do Camaquã, Rio Grande do Sul. In: BRITO, R.S.C.; SILVA, M.G.; KUYUMJIAN, R.M. (Ed.) *Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo*. CPRM, 2010. p. 163-188.
- TORRESI, I. et al. Hydrothermal alteration, fluid inclusions and stable isotope systematics of the Alvo 118 iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province (Brazil): implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, v. 47, p. 299-323, 2012.
- USERO, G. et al. Estudo das inclusões fluidas da mineralização paleoproterozoica de Au–(Cu) do tipo pórfiro do Palito, Província Aurífera do Tapajós (PA). In: FRANTZ, J.C.; MARQUES, J.C., JOST H. (Orgs.). *Contribuições à metalogenia do Brasil*. Porto Alegre. UFRGS/IG, v. 1, p. 111-128, 2011.
- VASQUEZ, M.L.; SOUSA, C.S.; CARVALHO, J.M.A. (Org.) Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Pará, escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil (PGB), Integração, atualização e difusão de dados da geologia do Brasil, Mapas Geológicos Estaduais. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Belém. 2008.
- VEIGEL, R., DARDENNE, M.A. Paragênese e sucessão mineral nas diferentes etapas de evolução da mineralização Cu–Pb–Zn do Distrito Camaquã, RS. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 20, p. 55-67, 1990.
- VILLAS, R.N. et al. Relações entre deformação, alteração hidrotermal e mineralização no depósito Cu–Au do Sossego, Província Mineral de Carajás. In: Simpósio Brasileiro de Metalogenia, 1, Gramado. 2005. [CD-ROM]
- VILLAS, R.N.; SANTOS, M.D. Gold deposits of the Carajás Mineral Province: deposit types and metallogenesis. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 300-331, 2001.
- VOTORANTIM METAIS. *Mineral Exploration: Main Projects – Aripuanã*. Disponível em: <<http://www.vmetais.com.br/en-US/Negocios/ExploracaoMineral/PrincipaisProjetos/Pages/Aripuana.aspx>>. Acesso em 30 de Agosto de 2015.
- WOOD, D. Discovery of the Cadia deposits, NSW, Australia (Part 1). *SEG Newsletter*, January, 2012, n. 88, 2012a.
- WOOD, D. 2012b. Discovery of the Cadia deposits, NSW, Australia (Part 2). *SEG Newsletter*, April, 2012, n. 89, 2002b.
- WOOD, D. Creating Walth and avoiding Gambler's ruin - Newcrest Mining Exploration, 1991–2006. *SEG Newsletter*, January, 2014, n. 96. 2014.
- XAVIER, R.P. et al. Fluid evolution in the Paleoproterozoic intrusion-related Breves Cu–Au–(Mo–W–Bi–Sn) deposit, Carajás Mineral Province, northern Brazil. *Contribuição à Geologia da Amazônia*, SBG-NN, 2005. v. 4: p. 129-137.
- XAVIER, R.P. et al. Tourmaline B-isotopes fingerprint marine evaporites as the source of high-salinity ore fluids in iron oxide–copper–gold deposits, Carajás Mineral Province (Brazil). *Geology*, v. 36, p. 743-746, 2008.
- XAVIER, R.P. et al. The iron oxide copper–gold deposits of the Carajás Mineral Province, Brazil: an updated and critical review. In: PORTER, T.M. (Ed.) *Hydrothermal iron oxide copper–gold and related deposits: a global perspective*. Australian Mineral Fundation, Adelaide, v. 3, p. 285-306. 2010.
- XAVIER, R.P. et al. The iron oxide copper–gold systems of the Carajás Mineral Province, Brazil. In: *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world: a tribute to Richard Sillitoe*. Special Publication of the Society of Economic Geologists, v. 16, p. 433-454, 2012.
- YAMANA GOLD. *CSR Report*. 2014. 74 p. Disponível em: <www.yamana.com/operations/reservesandresources>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- YAMANA GOLD. *First Quarter Report*, 2015. 76 p. Disponível em: <www.yamana.com/operations/reservesandresources>. Acesso em 30 de agosto de 2015.

Zinco no Brasil: tipos de depósitos, reservas e produção

Aroldo Misi

Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia, Instituto de Geociências e Instituto de Física; Grupo de Pesquisa em Metalogênese, Modelos Metalogenéticos e Exploração Mineral, Universidade Federal da Bahia

RESUMO

O zinco tem sido e continuará a ser indispensável para a vida moderna, com uso principalmente nas indústrias automobilística e de eletrodomésticos, bem como na construção civil. O Brasil possui uma grande e geologicamente diversificada área continental, com potencial para abrigar depósitos de grande valor econômico, representando pelo menos quatro dos cinco tipos de depósitos conhecidos mundialmente como portadores de classe mundial (reservas de mais 5 Mt de metal contido). Contudo, os únicos depósitos atualmente em produção são os de Vazante e Morro Agudo (Minas Gerais). O consumo de zinco no mercado mundial vem aumentando, mas, em contrapartida, a escassez que começou a se revelar na produção de importantes minas no mundo alerta para a necessidade de se pesquisar a ocorrência de novos depósitos econômicos no Brasil.

Palavras-chave Zinco. Brasil. Tipos de Depósitos. Produção e Reservas.

INTRODUÇÃO

Devido à sua resistência à corrosão e alto grau de reatividade com outros metais, o zinco (Zn) metálico é utilizado principalmente no revestimento de metais e ligas e na formação de ligas com alumínio, cobre e magnésio. O processo de revestimento para proteção contra a corrosão (processo de galvanização) é amplamente utilizado na indústria automobilística, na construção civil e na fabricação de equipamentos eletrodomésticos, e responde hoje por mais de 50% da demanda mundial do metal. Cerca de $\frac{3}{4}$ do zinco utilizado na indústria é constituído de Zn metálico. O restante é utilizado sob a forma de óxido, para vulcanização de borrachas, fabricação de medicamentos, cosméticos e outros compostos químicos. A Figura 1 mostra o consumo setorial de zinco no mundo em 2011.

O zinco é extremamente necessário para a vida moderna. Em termos de produção mundial de metais está em quarto lugar, sendo superado apenas pelo ferro, pelo alumínio e pelo cobre. A reciclagem de sucatas de zinco para extração do metal contribui com cerca de 20% do consumo mundial.

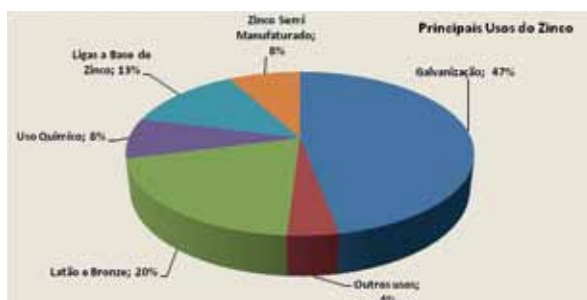


Figura 1 Usos de Zn no mundo (Fonte: ZWM, 2011).

DEPÓSITOS DE ZINCO

Tipos de depósitos e importância econômica

De acordo com dados recentes do Serviço Geológico dos EUA (USGS, 2015), as reservas mundiais de Zn atingiram cerca de 230 milhões toneladas (Mt) em 2014 e a produção global no mesmo ano chegou a 13,3 Mt. A Tabela 1 mostra produção e reservas, por país, durante o ano de 2014.

Tabela 1 Produção e Reservas mundiais de Zn em 2014.

País	Produção (103t)	Reservas (103t)
China	5.000	43.000
Austrália	1.500	62.000
Peru	1.300	29.000
Estados Unidos	820	10.000
México	700	16.000
Índia	700	11.000
Bolívia	410	4.500
Canadá	350	5.900
Cazaquistão	330	10.000
Irlanda	300	1.100
Outros Países	1.900	42.000
TOTAL	13.310	234.500

(Fonte: USGS, 2015).

A China lidera a produção e o consumo mundial há vários anos. A produção chinesa representa quase 36% do total, seguida da Austrália (11%) e do Peru (10%).

Os depósitos conhecidos no mundo podem ser assim classificados, do ponto de vista metalogenético:

Depósitos sulfetados relacionados ao vulcanismo submarino, em ambientes tectônicos diversos

Circulação de fluidos mineralizantes de caráter convecional e focalizados. São os chamados depósitos do tipo VHMS (*volcanic-hosted massive sulfides*), os quais mostram importantes concentrações de cobre, zinco e chumbo, sob a forma de sulfetos maciços estratiformes ou lenticulares, formados desde o Arqueano (ainda hoje continuam se formando em sistemas hidrotermais submarinos).

Esses depósitos ocorrem em vários continentes, alguns dos quais possuem reservas relativamente grandes, como Kidd Creek e New Brunswick, no Canadá (pouco mais de 50 milhões de toneladas, com teores variando entre 5 e 8% de Zn). A maioria, entretanto, mostra reservas pequenas, bem abaixo daquelas dos exemplos citados.

Depósitos sulfetados e não sulfetados relacionados a bacias sedimentares formadas em ambiente tectônico extensional, com ou sem relação direta com vulcanismo e/ou magmatismo

Circulação de fluidos hidrotermais mineralizantes de caráter convecional e focalizado. São conhecidos na literatura como SEDEX (*sedimentary-exhalative*) e formam grandes depósitos de sulfetos maciços e disseminados, principalmente de zinco e chumbo, em fácies sedimentares predominantemente siliciclásticas, mas também em fácies carbonáticas. Depósitos não sulfetados (silicato de zinco, *willemita*) podem também se formar nesse ambiente, mas são menores do que os sulfetados.

Os depósitos de zinco dessa classe, principalmente os sulfetados, abrigam as maiores reservas conhecidas de zinco. Em termos mundiais ocorrem principalmente na Austrália (HYC, Mount Isa, Century e Hilton), EUA, Alasca (Red Dog), China (Changba), Índia (Rampura) e Canadá (Sullivan), cada um com mais de 100 milhões de toneladas, com teores variando de 6 a 18% Zn, todos eles em bacias sedimentares mesoproterozoicas, associados a fácies siliciclásticas (folhelhos, siltitos e siltitos dolomíticos) (BETTS et al., 2003). Grandes depósitos ocorrem também no continente africano (Congo e Zâmbia), associados predominantemente a rochas carbonáticas (dolomíticas) neoproterozoicas, assim como na Irlanda, também associados a rochas carbonáticas, porém de idade Carbonífero Inferior (depósitos do tipo *Irish*).

Depósitos sulfetados relacionados a bacias sedimentares formadas em ambiente tectônico compressivo

Circulação de fluidos hidrotermais mineralizantes de caráter regional e por gravidade. São os depósitos de sulfetos de chumbo e zinco conhecidos como MVT (*Mississippi Valley Type*), que ocorrem em bacias de *foreland*, ou seja, em bacias continentais formadas pelo processo tectônico orogenético, quando grande quantidade de fluidos é gerada durante a orogênese e sua circulação tem caráter regional (não é focalizada).

Os depósitos minerais assim formados são de pequeno porte quando considerados isoladamente (menos de 2 milhões de toneladas, com teores raramente acima de 10% de Pb+Zn). Contudo, alguns distritos mineiros possuem mais de 300 depósitos espalhados numa grande área de centenas de quilômetros quadrados. Estão sempre associados a rochas carbonáticas (dolomito e calcário), preenchendo espaços vazios (brechas e fraturas) ou substituindo o carbonato. Mais de 80% dos depósitos conhecidos ocorrem em brechas de colapso, relacionadas a processos de karstificação. Os mais importantes e mais bem estudados depósitos desta classe encontram-se na região do Vale do Mississippi, EUA, distritos do sudoeste do Wisconsin, Tri-State (Missouri-Oklahoma-Kansas), Old Lead Belt e Viburnum trend, Missouri. São também importantes os depósitos do Território do Oeste do Canadá (distrito de Pine Point).

Depósitos sulfetados relacionados a processos de metassomatismo de contato (escarnitos)

Os depósitos escarníticos de Zn-Cu-Ag ocorrem predominantemente em rochas carbonáticas, associados a zonas de subducção ou de rifteamento. Esses depósitos contêm grandes reservas de minérios de alto teor (10-20% Zn+Pb; 30-300 g/t Ag). As rochas ígneas relacionadas variam muito em composição, desde diorito até granitos ricos em sílica. Os corpos ígneos são também de natureza diversificada, variando desde batólitos profundos, passando por complexos de diques e soleiras rasas, até extrusões vulcânicas (TEIXEIRA, 2008).

Exemplos de depósitos escarníticos com Zn-Cu-Ag são encontrados na área de Santa Rita, Distrito Central do Estado do Novo México, EUA, e em Antamina, no Peru. De acordo com Teixeira (2008):

A importância econômica crescente do depósito escarnítico de Cu-Zn de Antamina (que em 2004 produziu 370.957 toneladas de cobre e 224.483 toneladas

de zinco, segundo dados do Ministério de Energia e Minas do Peru), despertou o interesse na exploração de grandes depósitos de Cu-Zn do tipo skarn ao redor do mundo. Entretanto, as informações metalogenéticas sobre este tipo específico de depósito ainda são limitadas.

Depósitos não sulfetados relacionados a processos supergênicos

Durante o século 19 e até o início do século 20, o zinco metálico produzido no mundo era quase inteiramente proveniente de carbonato de zinco (*smithsonita*, ZnCO_3) porque não havia tecnologia para extração do metal a partir de sulfetos. Esta classe de depósitos continua a ser muito importante economicamente. Os depósitos não sulfetados supergênicos se formam a partir de qualquer outra classe de depósitos de zinco sulfetado quando submetidos a processos de intemperismo, gerando minerais oxidados de zinco a partir da alteração dos sulfetos. Os principais minerais formados são a *smithsonita* e a *hidrozincita* (carbonatos

de zinco), assim como a *hemimorfita* (silicato de zinco hidratado). A grande maioria dos depósitos oxidados ocorre em rochas carbonáticas. Os sulfetos ao serem oxidados, liberam zinco que é transportado pelas águas subterrâneas acidificadas sob a forma de sulfatos, com elevada solubilidade. A reatividade com rochas carbonáticas conduz à precipitação de carbonatos de zinco, daí a formação desses depósitos predominantemente em rochas carbonáticas.

Depósitos desta classe estão amplamente distribuídos em quase todos os continentes. As reservas de minério oxidado bem como os teores de zinco nesses depósitos variam muito, em função do tipo de depósito primário e da sua dimensão.

A Tabela 2 mostra os exemplos de depósitos mais importantes relacionados às classes acima apresentadas e sua importância em termos de produção e reservas. Os depósitos do tipo SEDEX são responsáveis por cerca de 50% das reservas de zinco produzidas no mundo.

Tabela 2 Classes de depósitos de Zn e importância econômica. Dados de produção (Zn e Pb refinados) e reservas (minério de zinco) referem-se aos depósitos exemplificados na quarta coluna.

Classe	Tipos	Idades	Exemplos	Reservas iniciais (Mt)	Produção (Mt)
(1)	VHMS	Arqueano ao Recente	Kidd Creek (Canadá)	17,4 4,53% Zn 0,145% Pb	0,150 Zn em 2014
(2)	SEDEX	Mesoproterozoico ao Carbonífero	Red Dog (Alasca, EUA)	140 16,5% Zn 4,6% Pb	1,0 Zn e 0,219 Pb em 2014
	Irish	Neoproterozoico ao Cretáceo	Navan (Irlanda)	69,9 10,1% Zn 2,6% Pb	0,176 Zn e 0,036 Pb em 2013
	Não sulfetado hipogênico	Mesoproterozoico ao Cambriano	Franklin District (02 minas), (EUA)	32,6 19,5% Zn	2,1 Zn de 1954 a 1986 na mina de Sterling
(3)	MVT	Cambriano ao Cretáceo	East Tennessee (EUA)	16,95 3,70% Zn	0,068 Zn em 2014
(4)	Escarnito	Fanerozoico	Antamina (Peru)	559 1,24% Cu 1,03% Zn	0,177 Zn 0,332 Cu em 2014
(5)	Não sulfetado supergênico	Mesozoico ao Recente (oxidação)	Mehdiabad (Irã)	218 7,2% Zn 2,3% Pb	?

(Fonte: FRANKLIN et al., 2005; NRCAN, 2014; GOODFELLOW; LYDON, 2007; USGS, 2011; DNR ALASKA, 2015; PEACE; WALLACE, 2011; ANDERSON et al., 2008; GSI, 2014; HITZMAN et al., 2003; FRONDEL; BAUM, 1974; STERLING MUSEUM, 2012; LEACH et al., 2001; NYRSTAR, 2005, 2009; LOVE et al., 2004; TEIXEIRA, 2008; GLENCORE, 2015;).

DEPÓSITOS DE ZINCO DO BRASIL

A Tabela 3 mostra os principais depósitos conhecidos no Brasil e cujas reservas foram dimensionadas. Podem existir controvérsias com relação ao enquadramento de um ou outro depósito na classe indicada, principalmente com relação aos que ocorrem nas sucessões carbonáticas neoproterozoicas do Grupo Bambuí (depósitos de Irecê e Nova Redenção), classificados por alguns autores como pertencentes à Classe 3, Tipo MVT (DARDENNE; FREITAS-SILVA, 1998). Na Tabela 4 estão indicadas as referências usadas para a classificação indicada, assim como para os demais dados, incluindo os de reserva e produção.

O Brasil, além de sua enorme área continental, possui uma grande diversidade de ambientes geológicos/geotectônicos, muitos deles favoráveis à existência de concentrações econômicas de minerais de zinco. Com exceção dos depósitos pertencentes à Classe 4,

todas as outras classes estariam representadas em nosso território, seja pela existência de minas em plena produção (Vazante e Morro Agudo) e de uma mina que encerrou suas atividades desde 1992 (Boquirá), ou de depósitos cuja economicidade ainda não foi definida. A única empresa produtora de zinco no País é a Votorantim Metais. As plantas metalúrgicas da empresa em Três Marias e Juiz de Fora (MG), são abastecidas por concentrados provenientes das minas de Vazante e Morro Agudo, também pertencentes à empresa. No depósito de Aripuanã (MT), a Votorantim desenvolve projeto em parceria com Karmin Resources para produção de zinco, chumbo, cobre, ouro e prata a partir de 2017. Em Camaquã-Santa Maria (RS) encontra-se também em desenvolvimento uma *joint venture* com Iamgold Brazil para produção de zinco, chumbo e cobre (DNPM, 2014). A Figura 2 mostra a localização dos principais depósitos de zinco do Brasil.

Tabela 3 Depósitos de Zn-Pb do Brasil. Dados de produção de Zn e Pb refinados e reservas de minério (em milhões de toneladas).

Depósitos	Classe	Tipo	Idade	Reservas (Mt)	Produção (Mt)
Vazante, MG (Zn, Pb)	(2)	Não sulfetado hipógeno	Mesoproterozoico	26,6 19,5% Zn	0.273 Zn em 2012 0,152 Zn em 2014
Morro Agudo, MG (Pb, Zn)	(2)	Irish	Mesoproterozoico	23,6 4,6% Zn 1,9% Pb	0.211 Zn 0,03 Pb em 2012
Santa Maria, RS (Pb, Zn, Cu)	(2)	SEDEX	Neoproterozoico	33,4 1,44% Pb 1,06% Zn	-
Palmeirópolis, TO (Zn, Cu, Pb)	(1)	VHMS	Mesoproterozoico	7,6 3,59% Zn 1,11% Cu 0,63% Pb	-
Pojuca, PA (Cu, Zn)	(1)	VHMS	Paleoproterozoico?	58 0,9% Zn	-
Canoas, PR (Zn, Pb)	(2)	SEDEX	Paleoproterozoico	0,367 3,82% Zn 3,45% Pb	-
Aripuanã, MT (Zn, Pb, Ag)	(1)	VHMS	Paleoproterozoico	35 6,29% Zn 2,25% Pb	-
Salobro, MG (Zn, Pb)	(2)	SEDEX	Paleoproterozoico	8,29 7,12% Pb+Zn	-
Boquirá, BA (Pb, Zn)	(2)	SEDEX	Arqueano - Paleoproterozoico	1,25 5% Pb 1,7% Zn (pré-1985)	0,450 Pb 0,008 Zn de 1959 a 1985
Irecê, BA (Pb, Zn)	(2)	Irish	Neoproterozoico	1,5 7,9% Zn	-
N. Redenção, BA (Pb, Zn)	(2)	Irish	Neoproterozoico	2,5 0,5% Zn 6,3% Pb	-

(Fontes: MONTEIRO et al., 2006; MISI et al., 2005, 2014; JC NOTÍCIAS, 2015; REMUS et al., 2000; OLIVEIRA, 2000; DOCEGEO, 1984; SCHWARTZ; FRANTZ, 2013; CONDE; YAMAMOTO, 1996; BIONDI et al., 2013; DNPM, 2014; CROCCO et al., 2006; FLEISCHER; ESPOURTEILLE, 1999; MISI, 1999)

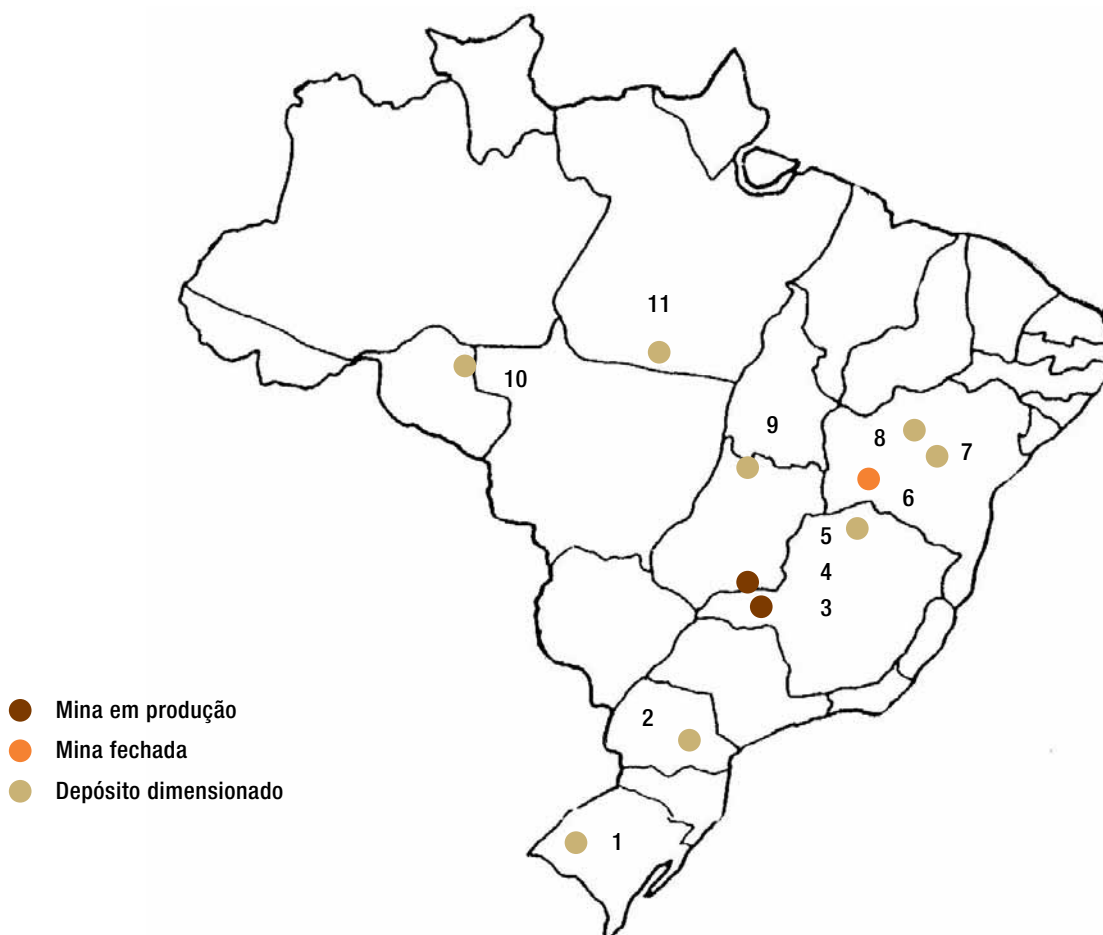


Figura 2 Localização dos principais depósitos de zinco do Brasil. 1 – Santa Maria-Camaquã, 2 – Canoas, 3 – Vazante, 4 – Morro Agudo, 5 – Salobro, 6 – Boiquira, 7 – Nova Redenção, 8 – Irecê, 9 – Palmeirópolis, 10 – Aripuanã, 11 – Pojuca. (Fonte: Elaborada pelo autor).

PERSPECTIVAS DO MERCADO DE ZINCO NO BRASIL E NO MUNDO

A China, além de ser o país de maior produção e consumo mundial de zinco, é também determinante do comportamento do mercado. O consumo do país em 2005 representou cerca de 30% do consumo mundial, segundo o Perfil do Minério de Zinco (MME; BANCO MUNDIAL, 2010). O Grupo Internacional de Estudos de Zinco e Chumbo (ILZSC) fez uma projeção de aumento da demanda global de chumbo e zinco em 2014 e 2015. A demanda de zinco foi prevista aumentar 5,1% e 2,9% nesses anos, respectivamente (NMB, 2014a). De acordo com os estudos do ILZSC, a importação de zinco e seus concentrados pelo Brasil, no período compreendido entre janeiro e setembro de 2014, foi de 131,7 mil toneladas, 35% inferior ao mesmo perí-

odo de 2013. No entanto, o valor médio nesse mesmo período foi de US\$ 703,00 por tonelada, superior ao valor médio pago no mesmo período de 2013. Deve-se salientar que nos últimos quatro meses do ano de 2014 os preços do zinco sofreram forte impacto com a desaceleração da indústria na China e com a grande valorização do dólar (Revista Valor Econômico, apud. NMB, 2014b). Mesmo assim, conforme consta do relatório de janeiro de 2015 do Serviço Geológico Norte Americano (USGS, 2015), a produção global de zinco refinado em 2014 manteve-se praticamente igual à de 2013. Porém, o consumo aumentou cerca de 5%, resultando num déficit produção-consumo de 400.000 toneladas de zinco refinado em 2014. A variação mensal do preço em 2015 manteve-se em alta a partir do mês de março (Figura 3).

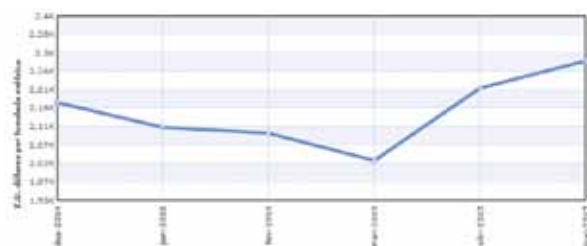


Figura 3 Variação mensal do preço do zinco (dezembro de 2014 a maio de 2015) em dólares americanos por tonelada métrica (puro 98% Zn). (Fonte: INDEX MUNDI, 2015).

Apesar do cenário de crise que vem se delineando com a redução do desenvolvimento econômico da China e de outros países (incluindo o Brasil), no final de dezembro de 2014 um cenário positivo em 2015 foi previsto por analistas financeiros (NMB, 2014b), confirmando previsões otimistas para a demanda brasileira feitas anteriormente (Figura 4). Isto se deve não só ao fato de que a China ainda mantém um ritmo de crescimento relativamente bom (em torno de 6 a 7%), mas também à escassez que começou a se revelar na produção de importantes minas. É o caso, dentre outras, da mina de Century, na Austrália, que deverá ter sua produção reduzida em 31% este ano. Outras minas importantes, por serem muito antigas, começaram a diminuir a produção devido à exaustão das suas reservas.

Com efeito, a Votorantim Metais (VM), a única empresa produtora de zinco no país, deverá iniciar ainda este ano a ampliação da mina de Vazante, aumentando a sua produção anual e estendendo a vida útil da mina até 2029 (NMB, 2015). Além disso, em parceria com a Karmin Resources, a Votorantim desenvolve projeto no depósito de Aripuanã (MT), com previsão de início da produção em 2017, e, com a Iamgold Brasil, desenvolve empreendimento para produção de zinco, chumbo e cobre em Camaquã (Caçapava do Sul) (DNPM, 2014).

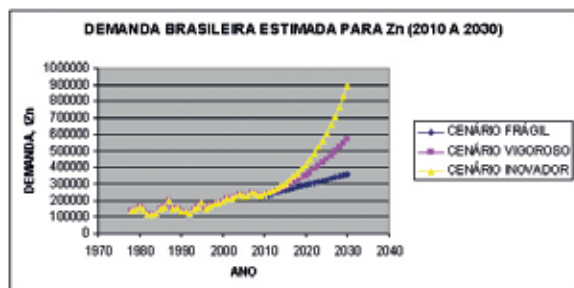


Figura 4 Previsão de aumento da demanda brasileira de zinco até o ano de 2030 segundo o Perfil do Minério de Zinco, mesmo considerando um cenário econômico frágil. (Fonte: MME; BANCO MUNDIAL, 2010)

CONCLUSÕES

Apesar do cenário pouco atrativo para investimentos em mineração do Brasil, não só por causa da crise econômica, mas também, e principalmente, em vista das incertezas sobre o Marco Regulatório da Mineração que tramita no Congresso há cerca de dois anos, verifica-se uma tendência favorável do mercado mundial, que estimulará o aumento da produção de zinco nos próximos anos. Neste sentido, o Brasil coloca-se em posição privilegiada pela sua grande área territorial, sua diversidade geológica e pelo grande potencial para abrigar depósitos das classes (1), (2) e (5), que são representadas por depósitos contendo grandes reservas, geralmente considerados de classe mundial (*World Class Deposits*). Ainda são válidas as constatações feitas há 15 anos segundo as quais “os dados que têm sido levantados, principalmente por grupos de pesquisa oriundos de universidades, vêm demonstrando cada vez mais a potencialidade dos nossos ambientes geológicos para abrigar grandes concentrações de metais base não ferrosos” (Misi, 2000).

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, I.K.; ASHTON, J.H.; BOYCE, A.J.; FALLICK, A.E.; RUSSELL, M. Ore deposition processes in the Navan Zn-Pb deposit, Ireland. *Economic Geology*, v. 93, p. 535-563. 2008.
- BETTS, P.G.; GILES, D.; LISTER, G.S. Tectonic environment of shale hosted massive sulfide Pb-Zn-Ag deposits of Proterozoic northeastern Australia. *Economic Geology*, v. 98, p. 557-576. 2003.
- BIONDI, J.C.; SANTOS, R.F.; CURY, R.F. The Paleoproterozoic Aripuanã Zn-Pb-Ag (Au, Cu) Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Mato Grosso, Brazil: Geology, Geochemistry of Alteration, Carbon and Oxygen Isotope Modeling, and Implications for Genesis. *Economic Geology*, v. 108, p. 781-811. 2013.
- CONDE, R.P.C.; YAMAMOTO, J.K. Avaliação de reservas por métodos computacionais: Um estudo de caso na Mina de Canoas 2, PR. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 26, p. 35-42. 1996.
- OLIVEIRA, W. B. Zinco, chumbo e cobre de Palmeirópolis, Estado do Tocantins. Goiânia: CPRM. Informe de Recursos Minerais. *Série Oportunidades Minerais - Exame Atualizado de Projeto*, 10, 19 p. 2000.
- CROCCO, E.A.; ABREU, F.R.; TEIXEIRA, N.; CANÇADO, F.L.L.; MACIEL, J.D.; SENA, F. E.; RAMOS, M.M. Mineralizações de zinco e chumbo do depósito Salobro, Porteirinha (MG). *Geociências*, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 359-378. 2006.
- DNPM. *Informe Mineral – Julho-Dezembro de 2014*. 2014. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/informes/informe_mineral_2014-02.pdf>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- DNR - Department of Natural Resources. *Red Dog Mine*. Alaska. 2015. Disponível em: <<http://dnr.alaska.gov/mlw/mining/largemine/reddog/>>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- DOCEGEO. *Relatório final da Pesquisa do Projeto Cobre Carajás-Pojuca*. Belém: DNPM, v.1, 1984.
- DRAKE, A. *Canadian Reserves of Selected Major Metals and Recent Production Decisions*. Natural Resources Canada. Disponível em: <<http://www.nrcan.gc.ca/mining-materials/exploration/8294#t2>>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- FRANKLIN, J.M.; GIBSON, H.L.; GALLEY, A.G.; JONASSON, I.R. Volcanogenic Massive Sulfide Deposits. In: HEDENQUIST, J.W.; THOMPSON, J.F.H.; GOLDFARB, R.J.; RICHARDS, J.P. (Eds.). *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Littleton, CO, Society of Economic Geologists. p. 523-560. 2005.
- FLEISCHER, R.; ESPOURTEILLE, F.S. The Boquira lead-zinc mine in Central Bahia, Brazil. In: SILVA, M. G.; MISI, A. (Eds.). *Base Metal Deposits of Brazil*. Belo Horizonte: MME/CPRM/DNPM, p. 44-53. 1999.
- FRONDEL, C.; BAUM, J.L. Structure and mineralogy of the Franklin zinc-iron manganese deposit, New Jersey. *Economic Geology*, v. 69, p. 157-180. 1974.
- GLENCCORE. *Corporate update and Production Report for the 12 months ended 31 December 2014*. 2015. Disponível em: <http://www.glenccore.com/assets/investors/doc/reports_and_results/2014/GLEN-2014-Q4-Production-Report.pdf>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- GOODFELLOW, W.D.; LYDON, J.W. Sedimentary exhalative (SEDEX) deposits. In: GOODFELLOW, W.D. (Ed.). *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, n. 5, p. 163-183. 2007.
- GSI- Geological Society of Ireland. *Ireland: exploration & mining news*. 2014. Disponível em: <<http://www.mineralsireland.ie/NR/rdonlyres/4F451964-DF10-4216-B728-FD5E6F76283A/0/IndustryNewsMay2014.pdf>>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- HITZMAN, M.W.; SELLEY, D.; BULL, S. Formation of Sedimentary Rock-Hosted Stratiform Copper Deposits through Earth History. *Economic Geology*, v. 105, p. 627-639. 2010.
- HITZMAN, M.W.; REYNOLDS, N.A.; SANGSTER, D.F.; ALLEN, C.R.; CARMAN, C.E. Classification, genesis, and exploration guides for nonsulfide zinc deposits. *Economic Geology*, v. 98, p. 685-714. 2003.
- INDEX MUNDI. *Zinco - Preço Mensal*. 2015. Disponível em: <<http://www.indexmundi.com/pt/pre%E7os-de-mercado/?mercadoria=zinco>>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- JC NOTÍCIAS. *Negócios - Mais R\$ 763 mi para a produção de zinco*. 2015. Disponível em: <<http://jcnoticias.com.br/postagem?id=20411&cat=219>>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- LEACH, D.L.; BRADLEY, D.C.; LEWCHUK, M.T.; SYMONS, D.T.A.; MARSILY, G.; BRANNON, J. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits through geological time: implications from recent age-dating research. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 711-740. 2001.
- LOVE, D.A.; CLARK, A.H.; GLOVER, J.K. The lithologic, stratigraphic, and structural setting of the giant Antamina copper-zinc skarn deposit, Ancash, Peru. *Economic Geology*, v. 99, p. 887-916. 2004.
- MISI, A.; IYER, S.S.S.; COELHO, C.E.S.; TASSINARI, C.C.G.; FRANCA-ROCHA, W.J.S.; CUNHA, I.D.; GOMES, A.S.R.; OLIVEIRA, T.F.de; TEIXEIRA, J.B.G.; FILHO, V.M.C. Sediment-hosted lead-zinc deposits of the Neoproterozoic Bambuí Group and correlative sequences, São Francisco craton, Brazil: a review and a possible metallogenic evolution model. *Ore Geology Reviews*, v. 26, p. 263-304. 2005.
- MISI, A.; KAREM, A.; KAUFMAN, A.J.; OLIVEIRA, T.F.; SANCHES, A.L.; OLIVEIRA, G.D. Review of the geological and geochronological framework of the Vazante sequence, Minas Gerais, Brazil: Implications to metallogenic and phosphogenic models. *Ore Geology Reviews*, v. 63, p. 73-90. 2014.
- MISI, A., *Um Modelo de Evolução para os Depósitos de Zinco e Chumbo Hospedados em Sedimentos Proterozoicos de Cobertura do Craton do São Francisco (Bahia e Minas Gerais)*. Tese apresentada para concurso de Professor Titular, Universidade Federal da Bahia, 151 p. 1999.
- MISI, A. Reservas Brasileiras de Zinco. In: *Seminário de Zinco e suas Aplicações*. ABM e Cia Mineira de Metais (Grupo Votorantim), São Paulo, 29 de março de 2000. p. 36-53.

- MME; BANCO MUNDIAL. Perfil do Minério de Zinco. *Relatório Técnico* 25, 33 p. 2010. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P16_RT25_Perfil_do_Minxrio_de_Zinco.pdf/c62970b3-3a98-480e-939f-ced2dc99b888>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- MONTEIRO, L.V.S.; BETTENCOURT, J.S.; JULIANI, C.; OLIVEIRA, T.F. Geology, petrography, and mineral chemistry of the Vazante non-sulfide and Ambrosia and Fagundes sulfide rich carbonate-hosted Zn-(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 28, p. 201-234. 2006.
- NMB. *Demanda por zinco e chumbo aumenta em 2015*. 2014. Disponível em: <<http://www.noticiasdeminerao.com/storyview.asp?storyID=826937440&section=Economia&sectionsourc=s1450688&Highlight=zinco&aspdsc=yes>>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- NMB. *Analistas preveem 2015 positivo para alumínio, zinco e níquel*. 2014. Disponível em: <<http://www.noticiasdeminerao.com/storyview.asp?storyID=826941395&section=Economia&sectionsourc=s1450688&Highlight=zinco&aspdsc=yes>>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- NMB. *Mineradoras de capital estrangeiro perdem US\$ 1,6 bilhão em 3 anos no Brasil*. 2015. Disponível em: <<http://www.noticiasdeminerao.com/storyview.asp?storyID=826951138&section=Economia&sectionsourc=s1450688&Highlight=mercado&aspdsc=yes>>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- NYRSTAR. *Nyrstar completes acquisition of East-Tennessee zinc mine complex in U.S. East-Tennessee and Gordonsville zinc mine complexes combined to create Nyrstar Tennessee Mines*. 2009. Disponível em: <<http://www.nyrstar.com/investors/en/news/Pages/1359374.aspx>>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- NYRSTAR. *Analyst Site Visit - Nyrstar Tennessee Mines*. 2010. Disponível em: <http://www.nyrstar.com/investors/en/Nyr_Documents/English/analyst_visit.pdf>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- PEACE, W.M.; WALLACE, M.W. Timing of mineralization at the Navan Zn-Pb deposit: A post-Arundian age for Irish mineralization. *Geology*, v. 28, n. 8, p. 711-714. 2011.
- REMUS, M.V.D.; HARTMANN, L.A.; MCNAUGHTON, N.J.; GROVES, D.I.; REISCHL, J.L. Distal magmatic-hydrothermal origin for the Camaquã Cu (Au-Ag) and Santa Maria Pb, Zn (Cu-Ag) deposits, Southern Brazil. *Gondwana Research*, v. 3, p. 155-174. 2000.
- STERLING MUSEUM. *The Enduring Significance of Sterling Hill*. 2012. Disponível em: <<http://sterlinghillminingmuseum.org/aboutus/historicsite.php>>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- SCHWARTZ, M.; FRANTZ, J.C. Depósito de Cu-Zn Pojuca Corpo Quatro: IOCG ou VMS? *Pesquisas em Geociências*, Porto Alegre, v. 40, n. 1, p. 05-19, jan./abr. 2013.
- TEIXEIRA, J.B.G. Metalogênese do zinco e depósitos de zinco do Brasil. *Relatório inédito*, 28 p. 2008.
- USGS – United States Geological Survey. *Red Dog*. 2011. Disponível em: <http://mrdata.usgs.gov/ardf/show-ardf.php?ardf_num=DL001>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- USGS – United States Geological Survey. *Mineral Commodity Summaries - Zinc*. 2015. Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/zinc/mcs-2015-zinc.pdf>>. Acesso em 25 de maio de 2015.
- ZWM. *Conhecendo o Zinco*. 2011. Disponível em: <http://www.zwm.com.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=130&Itemid=213&lang=pt>. Acesso em 25 de maio de 2015.

Alumínio e bauxita no Brasil

Marcondes Lima da Costa

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará;
Pesquisador CNPq 1A

RESUMO

O interesse por bauxita no Brasil iniciou-se nos anos 1920, mas a produção começou apenas nos anos 1940 em Minas Gerais e, no caso do alumínio metálico, em São Paulo. A partir de 1983, o país passou de importador a exportador de alumínio metálico e hoje é o quinto maior produtor de alumínio primário. As principais refinarias de alumina estão em Barcarena (PA) e São Luiz (MA), enquanto as de alumínio primário se encontram em Alumínio (SP), Barcarena e São Luiz. As reservas de bauxitas somam 3.6 bilhões de toneladas: 75% estão no Pará e 16% em Minas Gerais. As principais minas também estão no Pará (Trombetas, Paragominas e Juruti). Os depósitos são tipicamente lateríticos, que na Amazônia ocorrem como platôs quilométricos, derivados principalmente de rochas sedimentares cretáceas. As bauxitas do sudeste do país ocorrem como depósitos isolados, menores, do tipo topo de morros e encostas de montanhas, derivadas de vários tipos litológicos. O Brasil detém grandes reservas de bauxitas, domina a cadeia produtiva, do minério ao alumínio primário e seus derivados, e ainda desponta com potencial para novas descobertas e/ou ampliação de suas reservas. No entanto, aguarda uma política econômica adequada e seguridade jurídica para maior investimento.

Palavras-chave Bauxitas. Amazônia. Barcarena. Alumínio. Laterítico.

INTRODUÇÃO

Os povos persas já fabricavam vasilhas com argilas ricas em hidróxidos de Alumínio (Al) 6.000 anos A.C. e, 3.000 anos depois, produziam cosméticos a partir de argilas semelhantes. Mas foi apenas em 1821, nas proximidades da vila Les Baux, no sul da França, que P. Berthier descrevia pela primeira vez material geológico formado por hidróxidos de Al, a gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), além de boehmita (b- AlOOH) e diásporo (a- AlOOH), com quantidades menores de minerais de argila e óxi-hidróxidos de Ferro. Esse material ficou conhecido como bauxita em alusão à localidade. Quase concomitantemente se investigava o isolamento do metal alumínio, fato ocorrido em 1815 graças ao físico dinamarquês Hans Christian Oersted, no entanto sob a forma de cloreto. Coube a Hans Saint-Claire Deville isolar finalmente o metal alumínio por via química em 1854, expondo publicamente, em 1855, o primeiro lingote do metal alumínio numa feira em Paris. Vinha então a público o processo de redução eletrolítica da alumina com o uso de criolita (Na_3AlF_6), um mineral até hoje raro, descoberto no Brasil nos anos 1980, na Província Mineral do Pitinga, Amazonas. Este processo ficou conhecido como Hall-Hérould, nomes dos seus descobridores, que trabalhavam independentes.

Iniciava-se assim a indústria global do alumínio, que exigia a produção de energia em larga escala. A produção do primeiro lingote de alumínio no Brasil só veio a ocorrer em 1945, em Ouro Preto, Minas Gerais. Mas o primeiro milhão de toneladas de alumínio no mundo foi produzido, ainda em 1917, pelas principais indústrias situadas na Europa (Alemanha, Áustria e Hungria), Guiana Britânica e Estados Unidos, sendo

que o minério provinha também desses mesmos países. Por ocasião da 2ª Guerra Mundial, a produção e o minério vinham principalmente dos Estados Unidos, bem como de países da Europa (França, Hungria, Grécia, Itália e antiga Iugoslávia), Rússia, Indonésia e Malásia. Atualmente, estes também vêm de Suriname, Guiana, Guiana Francesa e outros países da América do Sul. Nos anos 1950, a Jamaica passou a grande produtor de bauxita e, nos anos 1960, recebeu forte competição de Austrália e Guiné.

No Brasil, a indústria incipiente de alumínio do início do século 20 dependia totalmente de importação do metal. A primeira menção a ocorrência de bauxita no país é de 1928, publicada nos Anais da Escola de Minas de Ouro Preto. Em 1932, Brandt publicava os resultados de suas pesquisas pioneiras realizadas na ilha de Trauíra, na costa do Maranhão, onde prospectava bauxitas, mas se deparou com “bauxitas fosforosas”. Era uma das primeiras tentativas estrangeiras de prospectar bauxitas em território brasileiro na zona tropical, após se reconhecer que as bauxitas eram de origem intempérica tropical e que tinham forte ligação com o intemperismo laterítico. Trauíra, que parecia ser o primeiro depósito de bauxita do país, dissipou-se perante a constatação de que se tratava tão somente de fosfatos de alumínio e nesta época não havia ainda interesse por insumos agrícolas como os fosfatos. As primeiras tentativas de produção de alumínio metálico aconteceram em Ouro Preto (MG) e Alumínio (SP). A quantidade produzida era tão pequena que não atendia às necessidades da indústria. A produção de Al, como dito, somente ocorreu a partir dos anos 1940, durante a 2ª Guerra Mundial, em Ouro Preto, pela Elquisa, posteriormente (1950) comprada pela Alcan,

que, em 2005, mudou o seu nome mundialmente para Novelis. A Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) foi fundada em 1941 e contava com a mina de Poços de Caldas (MG) que, junto a de Ouro Preto, constituíam as primeiras minas do país. Mas a fábrica foi instalada em Sorocaba (SP), que dispunha de maior oferta de energia elétrica e combustível. Nos dias atuais, a CBA é conhecida como Votorantim Metais – CBA, pioneira e principal *player* na produção de alumínio primário. Outra empresa importante que atua na transformação de alumínio é a Laminação de Metais Clemente, instalada em Jandira (SP). Somente a partir de 1983 é que o Brasil deixa de ser apenas importador de metal alumínio e passa a ser produtor e exportador, sendo considerado atualmente o quinto produtor mundial de alumínio primário.

A Alcoa, que chegou ao Brasil ainda no início do século XX, interessou-se pelo mercado brasileiro apenas nos anos 60, ao se tornar detentora dos depósitos de bauxitas de Poços de Caldas. Logo depois, em 1967, a Alcan descobriu os grandes depósitos de bauxitas da Amazônia e criou a companhia Mineração Rio do Norte (MRN) para conduzir os trabalhos de exploração. Nos anos 1970-1980, Alunorte e Albrás; e Alcan, Alcoa, BHP Billiton Metais S/A e Alumar (consórcio Alcoa e BHP Billiton Metais S/A) instalam pela primeira vez na Amazônia grandes refinarias de alumina e de alumínio primário, situadas, respectivamente, em Barcarena (PA) e São Luiz (MA), tendo como matéria-prima as bauxitas de Trombetas, posteriormente as de Paragominas e, mais recentemente, as de Juruti (2009), todas no Pará (Figura 1).

Nos últimos 15 anos, a indústria do alumínio (bauxita, alumina e alumínio primário) do Brasil representa 1,6% das exportações brasileiras, gerando um saldo positivo de US\$ 2,547 bilhões na balança comercial brasileira.



Figura 1 Minas, depósitos e refinarias de alumina e de alumínio no Brasil (Fonte: HAYSTON, 2012)

RESERVAS E PRODUÇÃO DE BAUXITA

Enquanto as reservas mundiais somam 29 bilhões de toneladas (Austrália, Guiné, Brasil, Indonésia e China, principalmente), as do Brasil somam 3,6 bilhões (3ª. posição), concentradas no estado do Pará (2,7 bilhões ou 75%) e Minas Gerais (560 milhões ou 16%). O Brasil, que em 2011 ainda era o 3º maior produtor de bauxita (14,1% produção mundial, equivalente a 31 milhões de toneladas) (Figura 2), passou, em 2013, para o quarto lugar, atrás de China, Austrália e Indonésia (ABAL, 2014). Deste total produzido no Brasil, exportou-se, em 2011, 6,887 milhões de toneladas de bauxitas lavadas (IBRAM, 2014). As principais empresas produtoras são: MRN (44%), NORSK (29%), CBA (17%) e ALCOA (12%); as demais respondem por 2% da produção. A maior parte da produção (ano-base 2012) ocorreu no Pará (85%) e Minas Gerais (14%). Para ressaltar quão incipientes ainda são as necessidades brasileiras por alumínio, enquanto o nosso consumo per capita é de 3,9 kg, nos EUA é de 37 kg.

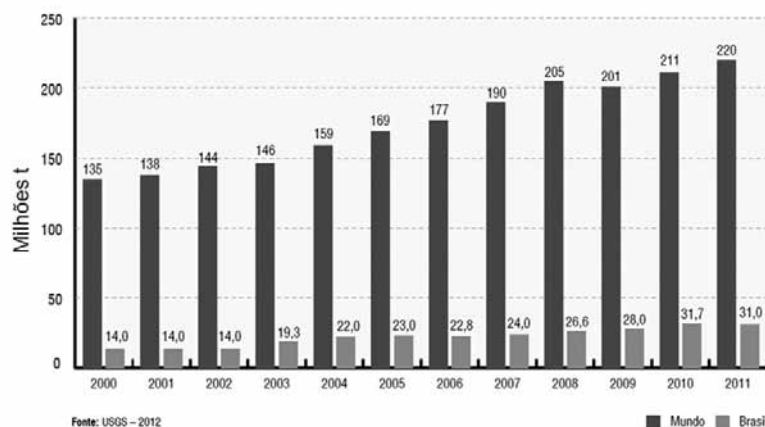


Figura 2 Comparação entre a produção de bauxita no mundo e no Brasil (em milhões de toneladas) (Fonte: IBRAM, 2014)

Tabela 1 Produção, importação, exportação, consumo aparente e preços médios de bauxita, alumina e alumínio no Brasil.

Discriminação		Unidade	2010	2011(r)	2012(p)
Produção	Total Bauxita (1)	103t	29.000	31.768	33.260
	Bauxita Metalúrgica	103t	27.620	30.180	31.598
	Bauxita Não Metalúrgica	103t	1.380	1.588	1.662
	Alumina	103t	9.433	10.182	9.978
	Metal Primário	103t	1.536	1.440	1.436
	Metal Reciclado	103t	252	240	230
Importação	Bauxita	103t 106 US\$-FOB	13,2 7,0	141 9,3	116 2,8
	Alumina	103t 106 US\$-FOB	43 21	10 12	42 21
	Metal Primário, Sucatas, Semiacabados, Outros	103t 106 US\$-FOB	278 1.142	425 1.637	341 1.317
Exportação	Bauxita	103t US\$-FOB	6.789 270	6.887 319	6.861 325
	Alumina	103t 106 US\$-FOB	6.419 1.716	7.105 2.191	7.274 1.915
	Metal Primário, Sucatas, Semiacabados, Outros	103t 106 US\$-FOB	748 1.944	649 1.978	642 1.661
Consumo Aparente (2)	Bauxita	103t	22.224	25.022	26.515
	Alumina	103t	3.057	3.087	2.746
	Metal Primário, Sucatas, Semiacabados, Outros	103t	1.318	1.456	1.365
Preços Médios	Bauxita (3)	US\$/t	26,88	30,21	32,58
	Alumina (4)	US\$/t	267,31	308,43	263,28
	Metal (5)	US\$/t	2.113,59	2.395,34	1.986,51

Fonte: DNPM/DIPLAM; Associação Brasileira de Alumínio (ABAL); MDIC; Albras; Alunorte. (1) Produção de bauxita - base seca; (2) Produção (primário + secundário) + importação - exportação; (3) Preço médio FOB das exportações de bauxita não calcinada (minério de alumínio); (4) Preço médio FOB das exportações de alumina calcinada; (5) Preço médio FOB das exportações de alumínio não ligado em forma bruta (lingote); (r) revisado; (p) dado preliminar.

Segundo a ABAL (2014) a produção nacional de alumina em 2012 foi de 10.320.600 t, assim distribuída: 56% em Barcarena (PA) pela Alunorte, 18% em São Luiz pela Alcoa, 11,8% em São Luiz pela BHP Billiton Metais S/A, 8% em Alumínio (SP) pela Votorantim Metais - CBA, 3,3% em São Luiz com Alcan e 2,9% em Poços de Caldas pela Alcoa. Deste total, 7.274.400 t foram exportadas, sendo o consumo doméstico de apenas 2.924.900 t.

Em termos de alumínio primário, o Brasil é o oitavo maior produtor mundial com 1.436.000 t. em 2012, superado por China, Rússia, Canadá, Estados Unidos, Austrália, Emirados Árabes e Índia. Os principais produtores (refinarias) são: Votorantim Metais S/A – CBA, localizado em Alumínio (SP), com 454.900 t, Albrás, em Barcarena, com 446.700 t, Alumar, em São Luiz, com 402.400 t, Alcoa, em Poços de Caldas, com 85.900 t e Novelis, em Ouro Preto, com 46.500 t.

Com a queda da produção iniciada em 2010, foram produzidos, em 2013, somente 1.304.300 t e a previsão para 2014 é de uma queda de 23 a 30% sobre 2013, com total próximo a 1.000.000 t. Essa queda ocorre em função do “custo Brasil”, representado pela energia onerosa, incertezas políticas e mesmo jurídicas que o país enfrenta. O Brasil passa, assim, da condição de exportador a importador de alumínio primário para suprir as necessidades internas (ABAL, 2014). Em termos de alumínio, o consumo per capita (kg/hab./ano) é de apenas 7,4.

Um fato interessante é demonstrado pela relação Sucata Recuperada/Consumo Doméstico de alumínio em 2011, que no Brasil foi de 35,2%, superior à média mundial, de 29,9%, a qual é liderada pelo Reino Unido com 47,3%. O Brasil também recicla 97,9% das latas de alumínio (Figura 3), superando todos os países desenvolvidos. Infelizmente, este fato positivo de grande

importância para a sustentabilidade não espelha uma política nacional, mas sim de necessidade das classes mais desfavorecidas do país.

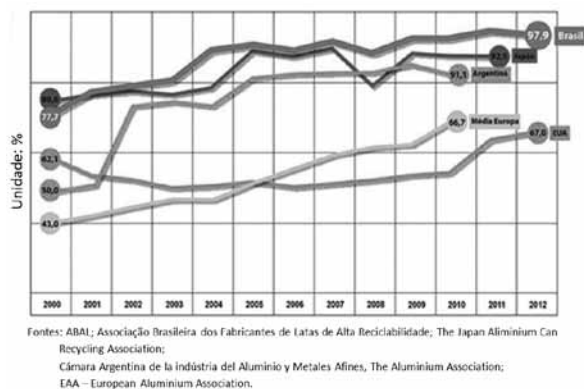


Figura 3 Índice de reciclagem de latas de alumínio (%) (Fonte: ABAL, 2014).

Principais Depósitos de Bauxita no Brasil

Os depósitos de bauxita do Brasil (Figura 1) podem ser classificados por regiões e modo de ocorrência, destacando-se: depósitos tipo platô na Amazônia e depósitos isolados do tipo topo de morros, encostas de montanhas e montanhas do nordeste-sudeste-sul (Bahia, Minas Gerais, Goiás, Espírito Santo, Rio de Janeiro e Santa Catarina).

Bauxitas Tipo Platôs na Amazônia

Na Amazônia, concentradamente no estado do Pará, estão os principais depósitos de bauxita do Brasil e do continente. Estes são classicamente do tipo platôs, de grande extensão e quase sempre capeados por argila amarela a vermelha, conhecida por Argila de Belterra, o que poderia corresponder a espesso pacote de Latossolos. Os principais depósitos, por região, são: Paragominas e Rondon do Pará, no sudeste do Estado do Pará; Almeirim (Monte Dourado, Juruti, Rio Paru e Trombetas), Oriximiná e Faro, no Baixo Amazonas, no oeste do Pará; Carajás, no sul do Pará; Presidente Figueiredo (Pitinga), ao norte do Estado do Amazonas, além de pequenos depósitos também como platôs na região costeira do Pará. As principais minas estão localizadas em Trombetas, Paragominas e Juruti, com perspectivas para abertura de uma quarta mina em Rondon do Pará. Essas três minas são as principais do país e respondem por 85% da produção brasileira de bauxita, que, além de exportadas, alimentam as principais refinarias de alumina e alumínio do Brasil, situadas em Barcarena (PA) e São Luiz (MA).

As bauxitas da Amazônia ocupam o topo de platôs quilométricos, cobertos por floresta tropical, em algumas regiões suprimidas e ocupadas por pastos, reflorestamentos e capoeiras, ou até núcleos urbanos, em altitude variável entre 100 e 600 m. Não são aflorantes, pois estão capeadas, invariavelmente, pela Argila de Belterra, que tem espessura variável, em média entre 1 e 4 m, podendo alcançar até 25 m. A base do corpo mineralizado é, normalmente, constituída por bauxita maciça microcristalina e microporosa, de cor rosa, creme a vermelha. Acima desta tem-se a bauxita nodular criptocristalina, por vezes porcelanada, de cor rosa creme, em que os nódulos centimétricos são envoltos por material argiloso; ou então em que a bauxita maciça converge para crosta brechóide a nodular rica em oxihidróxidos de ferro. Esta, por sua vez, converge para zona esferulítica ferruginosa e bauxita nodular. São sucedidos, então, na parte superior, pela Argila de Belterra, a principal cobertura. As bauxitas são primordialmente constituídas de gibbsita, o principal mineral de alumínio, sendo boehmita acessória ou rara. Ocorrem ainda hematita e goethita, como principais minerais de ferro, e as onipresentes caulinita, argila principal, quartzo e anatásio, sempre abaixo de 4%. São, em geral, bauxitas ricas em alumina aproveitável, com relativo baixo teor em sílica reativa, mas com teores de Fe_2O_3 variáveis, algumas muito ricas em ferro, portanto, com características de bauxitas metalúrgicas. Os depósitos de bauxita refratária são, por outro lado, restritos.

As bauxitas da Amazônia se desenvolveram, principalmente, a partir de rochas sedimentares, como argilitos e arenitos argilosos, bem como arcósios de idade Cretácea das bacias do Parnaíba e do Amazonas. Todas as três minas e o depósito de Rondon apresentam essas relações geológicas. As bauxitas do Rio Paru derivaram de rochas graníticas do Craton, da mesma forma que as do Pitinga, embora de natureza alcalina, bem como de riolitos. Em Carajás, as mesmas derivaram de basaltos e rochas sedimentares proterozoicas. Pequenos depósitos derivaram, também, de rochas metamórficas aluminossilicatas, a exemplo daqueles da região do Gurupi.

A título ilustrativo de um típico depósito de bauxita na Amazônia com mina em operação, descreve-se aqui, de forma sucinta, a mina de bauxita de Juruti, cujos dados estão publicados em Cruz (2011) e Costa et al (2014).

As Bauxitas de Juruti, Baixo Amazonas, Pará

As bauxitas de Juruti se encontram sob a forma de platôs quilométricos, com altitude e variando entre

120 e 150 m. Seu substrato geológico são os arenitos, argilitos e arcósios, flúvio-lacustres da Formação Alter do Chão, de idade Cretácea (CRUZ, 2011; COSTA et al., 2014). O perfil laterito-bauxítico (Figura 4) está representado por horizonte argiloso mosqueado na base, constituído de caulinita, quartzo e hematita e goethita, que grada para bauxita maciça e porosa, cristalina, de cor vermelha a rosa, o corpo de minério de alumínio. Sua espessura média é de 1,5 m, mas que pode alcançar de 3 a 9 m localmente. São comuns feições tubulares indicadoras de atividades de paleoraízes. Constitui-se de gibbsita como mineral dominante, contendo ainda caulinita, hematita, goethita, quartzo e anatásio. O teor médio de Al_2O_3 é de 44,97%, de SiO_2 7,39%, de Fe_2O_3 23,08%, de TiO_2 1,9% e PF 22,6%. No topo da bauxita estabeleceu-se uma crosta ferroaluminosa, dominada por hematita e goethita, além de gibbsita, que grada para horizonte ferruginoso nodular a esferolítico, também rico em hematita, goethita e gibbsita, porém com bastante caulinita. Recobrendo toda esta sequência encontra-se um espesso pacote (até 17 m) de argila amarela ocre rica em caulinita e goethita aluminosa, denominada de Argila de Belterra. Para lavar a bauxita subjacente é necessário retirar essa argila, bem como os horizontes ferruginosos, os quais constituem a principal limitação do minério. Os cálculos de balanço de massa considerando titânio (Ti) como elemento imóvel demonstraram que o perfil laterito-bauxítico de Juruti derivou do intemperismo

in situ dos argilitos e arenitos da Formação Alter do Chão e que a Argila de Belterra mostra forte afinidade com o mesmo (COSTA et al., 2014).

Bauxitas em Depósitos Isolados do Tipo Topo de Morros, Encostas de Montanhas e Montanhas

Classificam-se assim os depósitos do nordeste, sudeste e sul do Brasil (Bahia, Minas Gerais, Goiás, Espírito Santo, São Paulo, Rio de Janeiro e Santa Catarina). Merecem destaque os depósitos de Jequié-Jaguaquara-Ipiaú, na Bahia, as minas de Miraf, de Poços de Caldas, de Itamarati, de Passa Quatro e de Cataguases em Minas Gerais, os depósitos do Espírito Santo e de Lajes, em Santa Catarina. Os depósitos de Santa Catarina e Espírito Santo têm sido explorados esporadicamente, em pequena escala, da mesma forma que corpos menores em São Paulo.

De todos esses depósitos, os mais pujantes em termos de volume são os recém descobertos, pela mineradora Rio Tinto, de Jequié-Jaguaquara-Apiáú, na zona costeira da Bahia, com ca. 500 Mt de minério previamente avaliados. São bauxitas aflorantes (a cobertura é representada apenas por solos e colúvio arenoso de pequena espessura), ao contrário daquelas da Amazônia, e derivadas de granulitos e granulitos charnoquíticos (HAYSTON, 2012). A espessura média do minério é de 4 a 10 m (mínima de 2 m), o teor de alumina aproveitável de 25 – 55%, o de sílica reativa de 1 – 7% (HAYSTON, 2012) e o mineral principal do Al é a gibbsita, associada com quartzo residual. São depósitos com grande perspectiva de se tornarem uma importante atividade econômica no nordeste do Brasil.

As pequenas minas de Miraf (paralisadas temporariamente), Itamarati e Cataguases (Figura 5) derivaram, também, de rochas metamórficas, como xistos e gnaisses, são aflorantes e sub-aflorantes e constituídas de gibbsita e quartzo residual. Por outro lado, as bauxitas de Poços de Caldas, Passa Quatro e Lajes (OLIVEIRA, 1985) derivaram, majoritariamente, de rochas alcalinas (nefelina sienitos, fonolitos, entre outras associadas), e são, principalmente, de natureza refratária. As bauxitas do Espírito do Santo estão estritamente relacionadas a rochas graníticas grosseiras, o que conferiu uma bauxita gibbsítica rica em quartzo de granulação grossa.

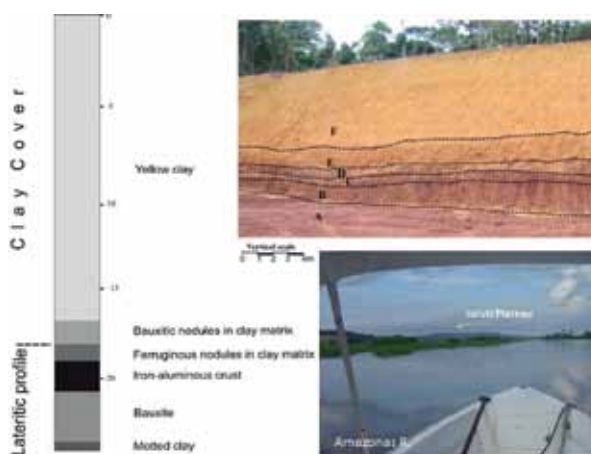


Figura 4 Perfil laterito-bauxítico e sua cobertura na mina de bauxita de Juruti, Pará. (Fonte: COSTA et al. 2014, modificado). A: argilito mosqueado; B: bauxita maciça a colunar; C: crosta ferro-aluminosa (bauxita ferruginosa); D: nódulos ferruginosos em matriz argilosa; E: bauxita nodular em matriz argilosa; F: argila amarela ocre tipo Argila de Belterra (cobertura). A imagem abaixo mostra o relevo em platô próximo à margem esquerda do rio Amazonas.

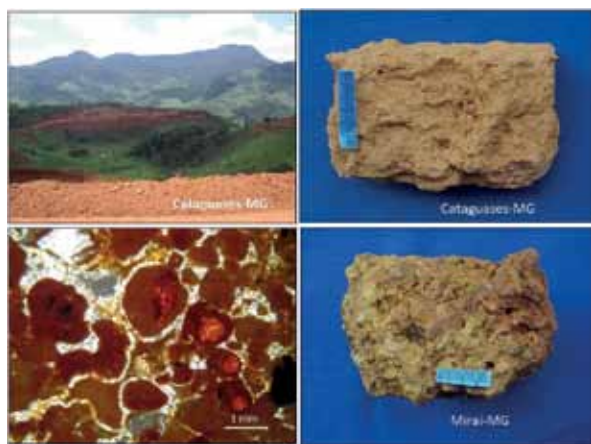


Figura 5 Exposição das bauxitas de Cataguases (MG) em encosta de Montanha; amostra de bauxita de Cataguases; amostra de bauxita ferruginosa de Miraf (MG); e detalhe da bauxita de Miraf sob microscópio nicóis cruzados, em que o plasma de gibbsita, goethita e hematita é segmentado e circundado por gibbsita microcristalina (Fonte: Marcondes Lima da Costa).

Bauxita Tipo Montanha-Platô Isolado em Goiás Barro Alto (GO)

O depósito de bauxita de Barro Alto, em Goiás, é também uma das mais recentes descobertas minerais e surpreende, principalmente, pelo fato de ter sido encontrada em “ambiente aparentemente desfavorável” e ao mesmo tempo de muitas “andanças geológicas”, em região muito bem investigada, ao lado de minas de níquel de grande relevância nacional. O depósito se destaca como uma feição serrana a semi-platô, montanhosa (Figura 6), com superfície ondulada, por vezes formando morros isolados, com mais de 6 km de extensão, tem direção NNE-SSW, e altitude variando de 1200 a 1500 m, alcançando até 3000 m de largura, características estas que o torna proeminente na paisagem regional. O depósito foi delimitado nos anos 2000 e, já em 2013, teve início a lavra. A bauxita é aflorante, portanto livre de cobertura. O teor total de Al_2O_3 é de 52% e Al_2O_3 aproveitável de 49,89%, com baixos teores de sílica (SiO_2) reativa (<11,3%) e de ferro (Fe_2O_3) (< 6,3%) (VESSANI et al., 2014). As reservas totais somam 227.000.000 t. A bauxita de Barro Alto alimenta a fabricação de alumina da Alcoa e da CBA e a produção de insumos industriais de Curimbaba, Saint Gobain, Imerys, Magnesita, Novelis, entre outras. A lavra é a céu aberto, o minério é beneficiado *in loco* e transportado por caminhões até Brasília, de onde segue, por via ferroviária, até a cidade de Alumínio, em São Paulo (VESSANI et al., 2014).

As bauxitas de Barro Alto são de origem intempé-ricas a partir dos anortositos e gabro-anortositos do complexo acamadado de Barro Alto, de idade 0,79 Ga, em uma evolução polifásica sobre a superfície Sul Americana (SANTOS, 2011) e/ou poligenética (OLIVEIRA et al., 2013). O principal mineral é a gibbsita microcristalina e macrocristais (OLIVEIRA et al., 2013), acompanhada por caulinita, hematita e goethita, por vezes boehmita, diásporo, córindon, e traços de anatásio (SANTOS, 2011), como minério compacto, poroso, ou em blocos compactos, com núcleos reliquias da rocha-mãe (Figura 6).



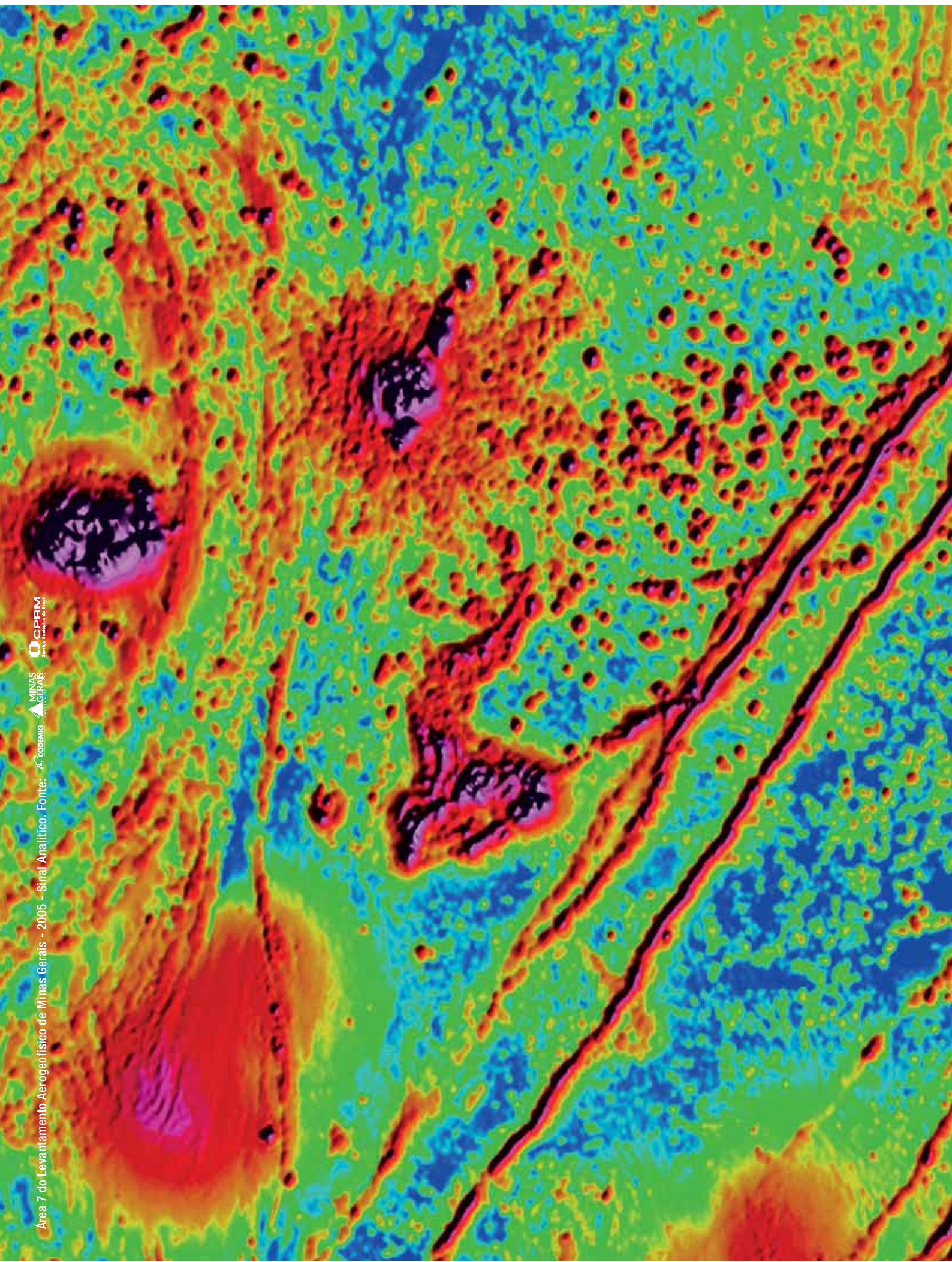
Figura 6 Vista da Serra-Platô de Barro Alto (Serra da Torre) constituído por bauxitas no seu topo e nas encostas; Poço escavado com quase 20 m de bauxita; afloramento de bauxita maciça nas encostas; bloco de bauxita com relicto de anortosito parcialmente caulinizado com níveis de máficos (Fonte: Marcondes Lima da Costa).

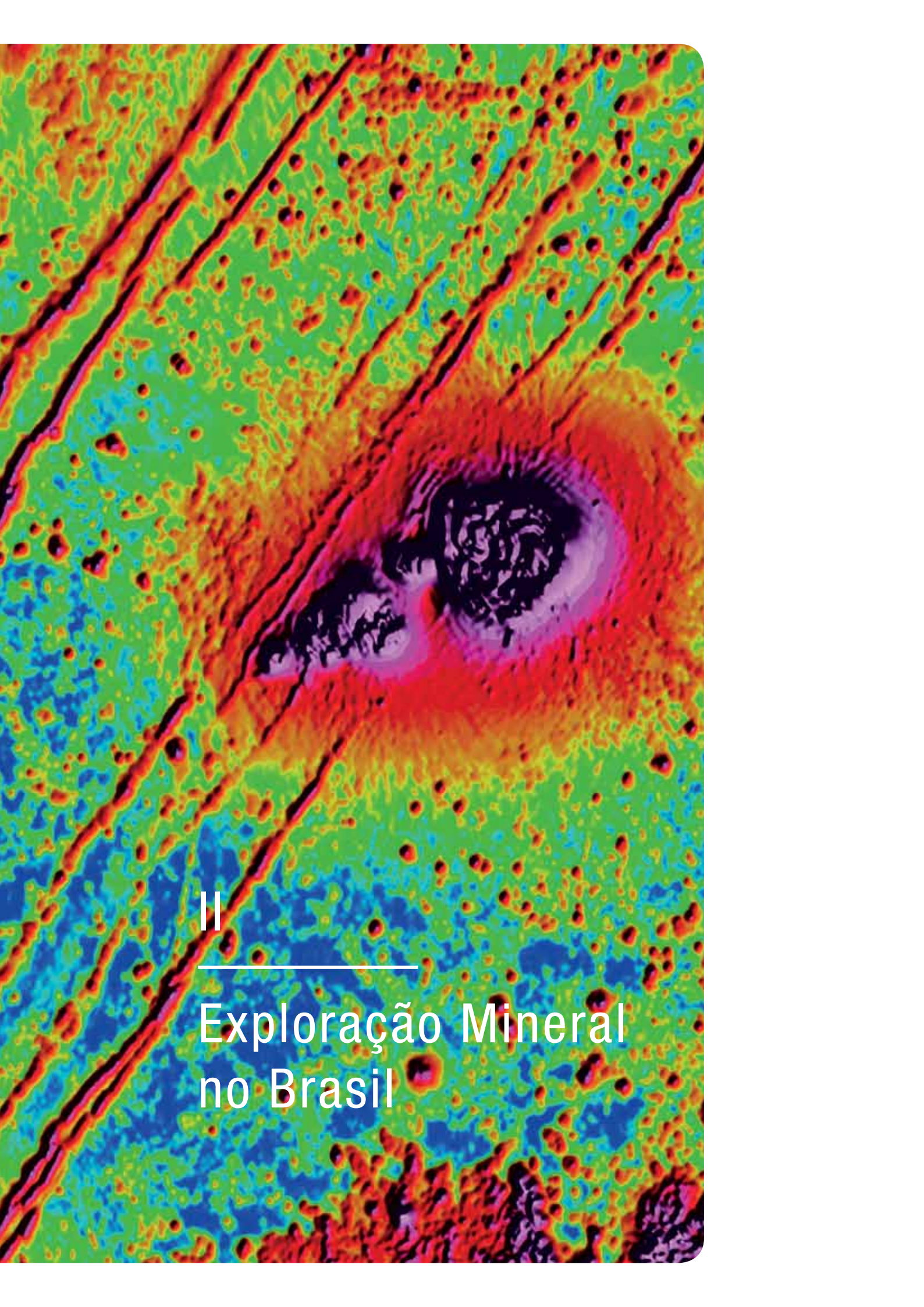
CONCLUSÕES

O Brasil é detentor de grandes reservas de bauxitas e também um grande produtor, não somente do minério primário, mas também (participando de sua verticalização) de alumina e alumínio primário em lingotes e bobinas. A produção de bauxita refratária química é restrita. Grande parte das reservas e das principais minas estão na Amazônia, concentradamente no estado do Pará, mas a produção de alumina e alumínio se divide entre Pará e Maranhão, e a de alumínio entre Pará, Maranhão e São Paulo. Grandes depósitos foram descobertos nos últimos anos em Rondon do Pará, com excelentes perspectivas para produção. Na Bahia, a recente descoberta também abre espaço estratégico para nova fronteira de produção de bauxita, alumina e alumínio. O mercado atual está cauteloso, com exportações oscilantes e tendência de queda para algumas *commodities*, como o alumínio desde 2010, e importação ainda elevada para fosfatos e potássio. As perspectivas futuras para o mercado do alumínio, no entanto, são alvissareiras e o Brasil tem reservas, minas, refinarias e base para crescimento.

REFERÊNCIAS

- ABAL. *Mudanças Climáticas*. Disponível em: <http://www.abal.org.br/sustentabilidade/mudancas-climaticas/>. Acesso em: 24.09.2014 às 14:56h.
- BRANDT, X. Ein neuer Typ von Eisen-tonerphosphat-vorkommen (Maranhão, Nordbrasilien). *Chemie der Erde*, 7: 383-425. 1932.
- COSTA, M. L.; CRUZ, G.S.; FARIA, H. F. A.; PÖLLMANN, H. On the geology, mineralogy and geochemistry of the bauxite-bearing regolith in the lower Amazon basin: Evidence of genetic relationships. *Journal of Geochemical Exploration* 146, 58-74. 2014.
- CRUZ, G. S. *Bauxita, horizonte nodular e cobertura argilosa da região de Paragominas e Juruti, Estado do Pará*. Dissertação de mestrado em geoquímica, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém-PA-Brasil. 2014.
- HAYSTON, P. *A descoberta da província costeira de bauxita na Bahia*. Apresentação em PowePoint, SimexMin, Ouro Preto, 23 de maio de 2012.
- IBRAM. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/>. Acesso em: 24.09.2014 às 15:27h.
- OLIVEIRA, F.S. de; VARAJÃO, A.F.D.C.; VARAJÃO, C.A.C.; BOULANGÉ, B.; SOARES, C.C.V. Mineralogical, micromorphological and geochemical evolution of the facies from the bauxite deposits of Barro Alto, Central Brazil. *Catena*, 105:29-39. 2013.
- OLIVEIRA, F.S. de. *Alteração supergênica e morfogênese tropical no Complexo Máfico-Ultramáfico de Barro Alto – GO*. Tese de Doutorado em Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais, Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais - Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Geologia, Ouro Preto-MG. 2011.
- OLIVEIRA, S.M.B. Gênese da bauxita de Lajes – SC. *Boletim IG-USP, Série Científica*, 16: 46-81. 1985.
- SANTOS, W. M. *Mineralogia e geoquímica da bauxita derivada de anortosito, Barro Alto – GO*. Dissertação de Mestrado em Geologia - Universidade de Brasília (UnB), Instituto de Geociências, Brasília-DF. 2011.
- VESSANI, L.; BAMBIER, L.; WALCACER, M.; ROCHA, L.; GUERRA, G. *A jazida de Barro Alto – GO*. Palestra EDEM/Santo Expedito, SimexMin, Ouro Preto-MG 2014.





II

Exploração Mineral no Brasil

Exploração mineral no Brasil: uso de modelos de depósitos minerais e sistemas minerais

Jorge Silva Bettencourt

Caetano Juliani

Lena Virgínia Soares Monteiro

Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo

RESUMO

O uso histórico dos modelos geológicos de depósitos minerais na exploração mineral no Brasil é avaliado, e faz-se uma análise crítica dos fatores responsáveis pelos sucessos e insucessos decorrentes. A demanda para a descoberta de recursos e de novos depósitos minerais em províncias metalogenéticas conhecidas e para o desenvolvimento de novas províncias exige modelos geológicos e exploratórios robustos, cientificamente embasados. Isto só será possível se houver investigação multidisciplinar e colaboração efetiva entre universidades, órgãos governamentais, companhias mineiras e institutos de pesquisa. O conceito moderno de Sistema Mineral, ainda pouco utilizado na exploração mineral no Brasil é discutido, com ênfase aos processos geodinâmicos associados, responsáveis pela pré-fertilização da região fonte e pelos fatores que contribuem para a geração de depósitos minerais. A aplicação sistemática de geotecnologias e integração de dados via novas técnicas em espaço 3D e 4D é decisória, porém, é imperativo o uso de geologia de base e do conhecimento dos processos geológicos, além de criatividade das equipes de exploração.

Palavras-chave Exploração mineral. Modelos geológicos. Sistemas minerais. Análise crítica.

INTRODUÇÃO

A Exploração Mineral (*Mineral Exploration*) constitui uma sequência de atividades variadas que possibilitam a descoberta de depósitos e recursos minerais que possam ser comercialmente explorados. Compreende a procura de indícios de mineralização e seu estudo, pressupondo avaliação de forma, tamanho, teor e potencial econômico, delineamento do corpo de minério, estimativa de recursos e estudos de pré- aproveitamento econômico, incluindo o planejamento e custos das etapas de instalação e desenvolvimento das minas. A exploração mineral é um processo de avaliação de longo prazo, que depende de fatores geológicos, técnicos, ambientais, sociais, políticos, legislativos e econômicos. É um exercício de criatividade intelectual e científica, que envolve inovação e teste contínuo de ideias geradas, além do desenvolvimento de técnicas analíticas.

Como subsídio para a exploração mineral, visando suprir a demanda sempre crescente de insumos minerais pela sociedade, tem se tornado evidente a necessidade do desenvolvimento de novos modelos exploratórios em províncias minerais já conhecidas, assim como para a descoberta de novas províncias. Nesse contexto, à escala global existe hoje grande interesse e expectativa na aplicação dos conceitos de Sistemas Minerais em modelos exploratórios que possam resultar em casos de sucesso na exploração mineral a custos mais baixos. Isso é devido, principalmente, à pesquisa, desenvolvimento e refinamento dos modelos que integram o conhecimento dos processos que resultam na concentração de metais, fundamentadas no uso

cada vez mais intensivo das tecnologias nos campos de geoquímica, geofísica, geoprocessamento, e desenvolvimento de *softwares* para o tratamento integrado de grande número de dados.

No Brasil, o uso comum de Modelos de Depósitos Minerais não tem fornecido subsídios suficientes para a elaboração de modelos prospectivos em nível mais adequado. Os modelos metalogenéticos e exploratórios correlatos, para boa parte dos depósitos metálicos brasileiros, não estão suficientemente desenvolvidos, de modo a serem utilizados para determinar e selecionar alvos prospectivos potenciais dos recursos metálicos necessários à manutenção do suprimento das demandas do mercado. De fato, os Modelos de Depósitos Minerais apenas terão valor preditivo se incorporarem o conhecimento relativo aos processos mineralizantes atuantes nos Sistemas Minerais que se associam com a formação das províncias Minerais brasileiras ao longo do tempo geológico, em todas as escalas, em um processo contínuo de aquisição de dados, reinterpretações e aprimoramentos dos modelos tectônicos e metalogenéticos.

Por outro lado, a demanda crescente, a disponibilidade de dados geológicos regionais, distritais e de mina, geoquímicos e aerogeofísicos, novos conceitos e novos equipamentos de perfuração têm favorecido novas descobertas nas últimas décadas, assim como a reabertura de antigas operações mineiras. Neste capítulo faz-se uma avaliação do uso histórico dos modelos empíricos e conceituais no Brasil e sobre seu uso na exploração mineral, *vis-à-vis* aos sucessos e insucessos de exploração mineral nas últimas décadas.

EXPLORAÇÃO MINERAL: CONCEITO

A Exploração Mineral constitui o primeiro estágio no processo de suprimento mineral à sociedade, que se desenvolve nas seguintes etapas: 1) Elaboração do programa de exploração (*Region selection, organization, budjeting*), 2) Reconhecimento regional e seleção de alvos (*Regional appraisal, target selection or grassroot exploration*), 3) Exploração detalhada (*Detailed follow-up*), 4) Avaliação de prospecto ou alvo (*Prospect evaluation or target scale surveys*), e 5) Estudo de viabilidade econômica (*Feasibility study and pre-production*). Por outro lado, a exploração mineral pode ser qualificada como *Greenfield* e *Brownfield*, dependendo da taxa, menor ou maior, de trabalhos de exploração efetuados previamente na área a pesquisar (BETTENCOURT et al., 2009; MEE-ME-FINLAND, 2005; DUKE, 2010).

O Papel do Governo e das Instituições Governamentais na Exploração Mineral

O Ministério de Minas e Energia (MME) tem a responsabilidade de formular políticas e planejamento do setor energético e mineral do país. O Serviço Geológico do Brasil subordina-se ao MME, e é o órgão responsável pela Geociência Governamental, que inclui toda guarda e a manutenção de dados geológicos, econômicos e de mercado adquiridos pelo governo ou em parceria com agências governamentais. Essa abrange levantamento e estudo da crosta terrestre, a partir de métodos geológicos, geofísicos e geoquímicos, bem como pela produção de informações necessárias à promoção do uso sustentado de recursos naturais, mais especificamente em mineração, construção, uso da terra, proteção ambiental e conservação da natureza.

De suma importância é o uso do conhecimento científico para alcançar objetivos amplos sobre decisões políticas, relativas a recursos naturais, ambiente, e vários outros tópicos de interesse. A Geociência Governamental e a Geociência Pública, que se refere ao conhecimento geocientífico disponível sem restrições, pois é um bem público, dão suporte aos principais desafios da exploração mineral. Atraem investimentos, permitem à indústria a identificação de áreas com potencial favorável, incrementando a efetividade de exploração, e reduzindo custos e riscos. Tudo isso melhora os retornos ao investimento privado, mas também incrementa recursos governamentais na forma de *royalties* e impostos.

Para o desenvolvimento do setor mineral e para potencializar a descoberta de novos depósitos minerais é também imprescindível uma legislação adequada e estável, que também apoie o investimento de risco

representado pelas empresas *juniors*. Neste contexto, a criação de centros integrados de pesquisa de bens minerais, aos moldes dos *Key Centers* australianos, integrando empresas, universidades e órgãos governamentais, poderia ser de grande valia na descoberta de novos depósitos minerais no Brasil.

Instituições governamentais encarregadas, no passado e no presente, pela Exploração Mineral

A exploração mineral no país iniciou-se no século 16. O período entre 1811-1907 foi marcado pela fundação de diversas instituições governamentais, tais como a Comissão Geológica do Império, que efetuou o primeiro mapa geológico do Brasil, e a Comissão do Mapa Geográfico e Geológico do Estado de São Paulo. O período entre 1907-1934 iniciou-se com a fundação do Serviço de Levantamento Geológico e Mineralógico do Brasil, que produziu um mapa geológico, e criação, em 1934, do Departamento Nacional de Produção Mineral (BERBERT, 1989). Outros órgãos, tais como a Companhia Vale do Rio Doce, PETROBRAS e Comissão Nacional de Energia Nuclear datam do intervalo entre 1934-1970.

A criação do Ministério de Minas e Energia (1960), que absorveu o DNPM, e da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM) em 1969, robusteceu o programa de levantamentos geológicos no país. A exploração mineral é hoje de responsabilidade do Serviço Geológico do Brasil e do DNPM, sob os auspícios do MME, responsável pela formulação de políticas e planejamento dos setores energético e mineral. Atividades correlatas são desenvolvidas pela Petrobrás e demais empresas do setor de petróleo, universidades e institutos de pesquisa, companhias mineiras *majors* e *juniors*, Fundações Estaduais de Ciência e Tecnologia e centros de P, D&I, entre outras.

O papel das empresas da Exploração Mineral

A exploração futura é vital ao sucesso da economia do Brasil ressaltando que a produção mineral participa com 4,2% do PIB e 20% do total das exportações brasileiras, gerando um milhão de empregos diretos, o equivalente a 8% dos empregos da indústria (BRASIL, 2011). As empresas de mineração, principalmente as *majors*, devem ser sempre incentivadas a investir em P, D & I, seja por conta própria, ou em consórcio com outras empresas (indústria mineral, setores de manufatura e serviços) em projetos pré-competitivos e em articulação com Instituições de Ciência e Tecnologia e com fundações estaduais de Ciência e Tecnologia e Fundações Estaduais de Apoio à Pesquisa, para o desenvolvimento de projetos de pesquisa (PLANO NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2030).

As *juniors* têm um papel essencial e importante no setor mineral do Brasil. Essas pequenas empresas surgiram nas décadas de 80 e 90, com destaque à década de 90, e são responsáveis por grande número de descobertas recentes de ouro, ferro, cobre, manganês, fosfato, e outros bens minerais, no Brasil. As mais bem sucedidas são gerenciadas por um corpo misto de profissionais de negócios e de tecnologias, caracterizados pela grande habilidade de identificar e financiar oportunidades, e executar programas exploratórios efetivos (JACOBI, 2004; STEVENS, 2007).

A origem do dinheiro - quem participa da Exploração Mineral

A exploração mineral é praticada por uma gama variada de companhias e indivíduos: prospectores (*prospectors*), Companhias Juniores de Exploração (*juniors*) e Companhias Mineiras, Intermediárias e Sênioras (*majors*). Os recursos alocados provêm de duas fontes principais; 1- financiamento tipo *equity* (*equity financing*) obtido nas bolsas de valores (*stock markets*) sediadas no Canadá, USA, Austrália, Inglaterra e África do Sul, que representa a principal fonte de recursos levantados pelas *juniors*; e, 2- fundos provenientes de operações mineiras (*mine revenue*), que constituem as fontes dominantes das *majors*, embora essas possam usar, também, os fundos das bolsas de valores (STEVENS, 2007).

DEFINIÇÃO DE MODELO DE DEPÓSITO MINERAL E SISTEMA MINERAL

Modelo de Depósito Mineral, conforme a definição geral de Cox e Singer (1986), consiste em um arranjo sistemático de informações, que descrevem os atributos essenciais (propriedades intrínsecas) de uma dada classe de depósitos minerais. O modelo pode ser: (i) **Empírico** (factual, descritivo ou modelo de ocorrência) que, em si, é desenvolvido a partir de características geológicas mensuráveis e mapeáveis, sendo assim baseado em observações factuais e (ii) **Conceitual** (genético, interpretativo, causal ou modelos de processos), que deriva de dados do modelo empírico, para identificar processos envolvidos na gênese do minério, baseado em observações e interpretações. Segundo McCammon (1992), os modelos empíricos permitem ao geólogo o estabelecimento da relação entre tipos de depósitos e ambientes geológicos. Outros tipos de modelos utilizados na indústria mineral são: **modelo de teor e tonelagem, modelo característico, modelo quantitativo de processos, modelo metodológico,**

modelo econômico e modelo de exploração. Depósitos que compartilham uma grande variedade e elevado número de atributos são caracterizados como “tipo” e o modelo representativo desse tipo poderá ser desenvolvido (BERGER; DREW, 2002; BERGER et al., 2009).

Após a publicação clássica de Cox e Singer (1986), que apresenta 87 modelos descritivos e 60 modelos de teor e tonelagem, revisões gerais e aprimoramento dos modelos foram efetuados, bem como a apresentação de novos modelos. Publicação importante que documenta essa evolução até 1992 foi apresentada e comentada por Mosier e Bliss (1992). Dados descritivos, controles geológicos-metalogenéticos consistentes e guias de uso prático em exploração de inúmeros tipos de depósitos que contribuem para o sucesso da exploração mineral foram apresentados por Ho et al. (1990), Bliss (1992), Kirkham et al. (1993), Colvine et al. (1998) e Berger et al. (2009). Complementarmente, o *United States Geological Survey* (USGS) publica todos os anos novas proposições de Modelos de Depósitos Minerais com aplicações em avaliação do potencial mineral (e.g. VERPLANCK et al., 2014; HAYES et al., 2015), assim como o *British Columbia Geological Survey*, com o *Mineral Deposit Profiles*.

O conceito de **Sistema Mineral** aplicado à metalogênese foi originalmente introduzido por Wyborn et al. (1994) e Knox-Robinson e Wyborn (1997), e representa uma abordagem distinta no entendimento da gênese e da exploração dos depósitos minerais. Visa apresentar um quadro conceitual que considere todos os processos geológicos, em todas as escalas, que controlam a formação e preservação dos depósitos minerais. Esse conceito difere daquele de modelo genético por não se ater aos atributos ou processos apenas na escala de depósito, mas em múltiplas escalas, desde a continental (Figura 1), condicionados pelos processos tectônicos que resultam na formação de uma província geológica/geotectônica e em sua evolução. O depósito mineral representa, neste contexto, uma expressão local do amplo sistema mineral que operou em diferentes escalas, focalizando fluxos de energia e massa (JAQUES et al., 2002, FRASER et al., 2007, MCCUAIG et al., 2010).

O uso de inteligência artificial e redes neurais para a análise metalogenética (MCCAMMON 1993) e de geoprocessamentos (KATZ, 1991; BONNHAM-CARTER, 1994) para a definição de disponibilidade e avaliação mineral e, conseqüentemente, para a probabilidade de ocorrência de mineralizações na área analisada tem sido também aplicado na busca de depósitos minerais. Usualmente, os conceitos Sistema Mineral (WYBORN et al., 1994) e Modelo de Depósito Mineral são usados

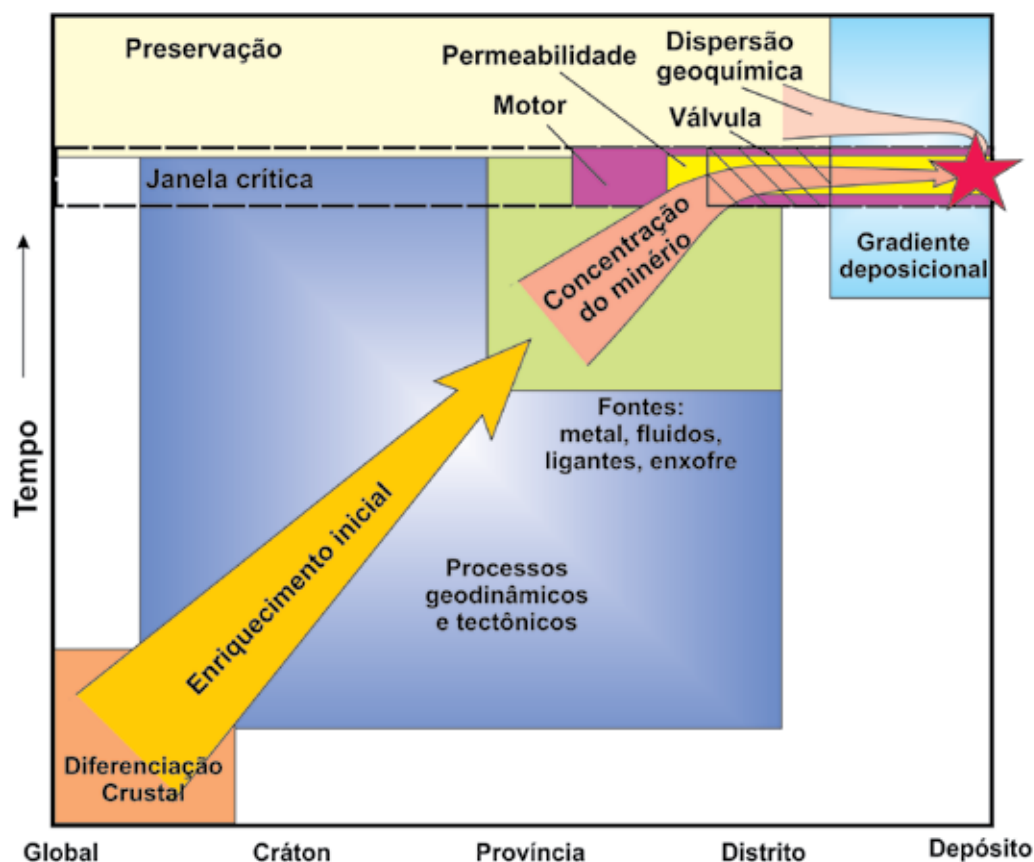


Figura 1 Conceito de Sistema Mineral e sua relação com as escalas temporal e espacial. Processos geodinâmicos concentram *commodities* em uma região fonte na escala regional e de distrito. Falhas e unidades estratigráficas permeáveis canalizam fluidos aos ambientes deposicionais onde gradientes químicos, físicos e térmicos causam deposição do minério. Muitos desses processos deixam pistas ou evidências, como alteração hidrotermal, que podem ser usados para localizar depósitos minerais (Fonte: GEOSCIENCE AUSTRALIA, 2013).

integradamente à análise probabilística para obtenção de mapas de prospectividade, favorabilidade e de potencial mineral em *Geographic Information System* (GIS) (KREUZER et al., 2008).

ATRIBUTOS DE MODELOS DE DEPÓSITOS MINERAIS E SISTEMAS MINERAIS

Listas completas dos parâmetros necessários à elaboração e desenvolvimento de Modelos de Depósitos Minerais são apresentadas em Cox e Singer (1986), Ho et al. (1990) e no *Deposit Modelling Program*, que teve suporte do IUGS e da UNESCO (COX; SINGER, 1986; KIRKHAM et al., 1993). Esse programa popularizou o *approach* norte-americano e, em diversos casos, reformulou completamente alguns conceitos definidos por geocientistas soviéticos (JÉBRAK, 2012). Para fins de exploração mineral, o modelo geológico de

depósito agrega informações específicas sobre: feições geológicas, conteúdo metalífero, mineralogia, fluidos mineralizantes, características de teor e tonelagem, compartimentação geológica e tectônica, tamanho, profundidade de corpos de minério, metalogenia, controles de mineralização, assinaturas geoquímicas e geofísicas, aspectos econômicos e características ambientais. Estas informações são correlacionadas, via inferências de caráter operacional, genéticas e conceituais, com o propósito único de fornecer uma base de conhecimento às atividades de exploração mineral (ADAMS, 1985; COX; SINGER, 1986; MOSIER; BLISS, 1992; HENLEY; BERGER, 1993; KIRKHAM, 1993; BERGER; DREW, 2002; BERGER et al., 2009; HAYES et al., 2015).

De acordo com o conceito de Sistema Mineral, são identificados elementos críticos para a especialização metalogenética de uma região, província, distrito e depósito mineral, a partir de feições geológicas mape-

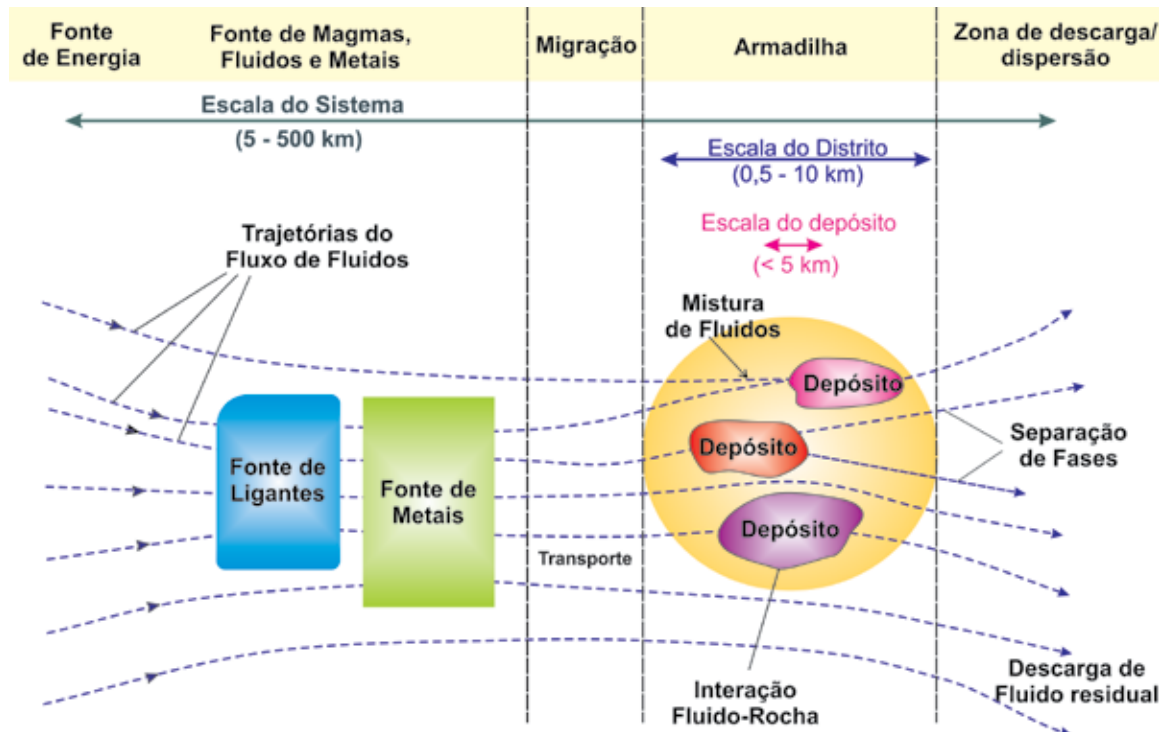


Figura 2 Modelo conceitual de Sistema Mineral e seus atributos críticos (Fonte: KNOX-ROBINSON; WYBORN, 1997).

áveis na escala apropriada para a tomada de decisão na exploração mineral, seja essa global, regional ou local. Os processos responsáveis pela pré-fertilização da região fonte de componentes para o sistema (por exemplo, processos de metassomatismo do manto prévio ao magmatismo) devem ser identificados, assim como: (a) as fontes de fluidos e ligantes, (b) fontes de metais, (c) trajetórias de migração dos fluidos e arquitetura dos canais de circulação de fluidos (zonas de influxo e descarga), (d) gradientes termais, (e) fonte de energia para o transporte de fluidos e metais, (f) mecanismo estrutural de controle do fluxo de fluidos ao sítio deposicional, (g) causas físicas e/ou químicas da precipitação do minério e (h) condições para preservação da concentração metalífera (Figura 2) (KNOX-ROBINSON; WYBORN, 1997; THÉBAUD et al., 2014).

Para que o conceito de Sistema Mineral possa ser efetivamente aplicado em modelos exploratórios é necessário que sejam reconhecidos, portanto: (a) os processos críticos do sistema mineral imprescindíveis à formação do depósito mineral, (b) as formas que o processo crítico pode ocorrer, (c) os reflexos na geologia que evidenciem a ocorrência do processo crítico, (d)

os atributos passíveis de mapeamento que possam detectar as feições geológicas favoráveis (MCCUAIG et al., 2010).

IMPORTÂNCIA DE MODELOS DE DEPÓSITOS MINERAIS E SISTEMAS MINERAIS

Modelos de Depósitos Minerais são importantes para o planejamento da exploração mineral e para o acesso à quantificação de recursos minerais e, se forem bem elaborados, permitem a inferência da existência de certos tipos de depósitos em um determinado ambiente geológico. Adicionalmente, os modelos de teor e tonelagem, permitem a estimativa da viabilidade econômica dos recursos minerais (MOSIER; BLISS, 1992; BERGER et al., 2009). Em particular, esses modelos são utilizados para localização de áreas favoráveis à ocorrência de depósitos minerais e para previsão da quantidade de um determinado bem mineral que pode ocorrer em uma determinada área (avaliação regional, *assessment*). O planejamento da pesquisa mineral leva

em conta os atributos e as condições necessárias à gênese do depósito. Os atributos servem de guias de acesso aos recursos minerais e à exploração mineral nas fases de planejamento e interpretação. Contudo, há que se considerar a maturidade de modelos descritivos e genéticos, pois nunca os modelos são completos. Novas ideias e novas tecnologias podem prover as bases para a compreensão e refino de modelos incompletos.

A função de pesquisa geológica aplicada à exploração é o desenvolvimento e o entendimento dos mecanismos de formação dos depósitos minerais, com vistas à percepção do significado genético das suas características. Em importantes províncias e distritos minerais brasileiros, são reconhecidos depósitos com a mesma especialização metalogenética que, no entanto, apresentam inúmeros atributos distintos. O inventário de tais atributos comumente tem sido utilizado como guia para exploração mineral, mas com relativamente pouco sucesso. Entretanto, com a compreensão dos processos genéticos, os atributos críticos ou efetivamente favoráveis para uma determinada classe de depósitos podem ser identificados (COX; SINGER, 1986). Notadamente, o uso de modelos incompletos ou equivocados, aliado a um nível baixo de conhecimento geológico de determinadas regiões, tem resultado em poucos sucessos na exploração mineral. Contribuem ainda com isso a falta de mapas na escala e com a qualidade necessária, a falta de levantamentos aerogeofísicos em escala adequada e, inclusive, a imprecisão de modelos de evolução geológica, tectônica e de gênese do magmatismo da região que está sendo explorada.

Adicionalmente, a abordagem de Sistema Mineral permite a compreensão dos processos responsáveis pela distinta herança, fertilidade e especialização metalogenética (*endowment*) de crátons, terrenos e distritos, como reflexo de um sistema mineral muito amplo. Distritos minerais com depósitos “gigantes” ou “super-gigantes” revelam usualmente áreas nas quais o sistema não foi apenas fértil, mas altamente focalizado ou concentrado (JAIRETH; HUSTON, 2010). A exploração mineral fundamentada no uso dos Sistemas Minerais permite identificar, em primeira instância, ambientes tectônicos e regiões crustais particularmente favoráveis à concentração metalífera. Como exemplo, a arquitetura litosférica de um cráton, revelada por técnicas isotópicas, pode ser usada para a identificação de regiões prospectivas para localização de depósitos minerais em escala de distrito (MOLE et al., 2015). De modo análogo, o entendimento da tectônica, do metamorfismo e do magmatismo envolvidos na formação de uma região, juntamente com a deter-

minação, por métodos geofísicos, de grandes zonas de descontinuidades crustais podem ser determinantes na descoberta de depósitos minerais, muitas vezes não aflorantes.

A compreensão da evolução temporal e espacial dos Sistemas Minerais torna possível o estabelecimento das relações genéticas entre depósitos de classes distintas que compartilham uma evolução comum, tais como os depósitos de Au epitermais e de Cu-Mo do tipo pórfiro (SILLITOE, 1973, 2010; HEDENQUIST et al., 1998; JULIANI et al., 2005), depósitos de óxido de ferro-cobre-ouro e depósitos de magnetita-apatita (HITZMAN et al., 1992), depósitos de zinco não sulfetados e sulfetados de Vazante e Paracatu (MONTEIRO et al., 1999, 2006, 2007; HITZMAN et al., 2003).

Estudos genéticos também podem permitir a identificação e quantificação de parâmetros que condicionam a formação das maiores reservas minerais de uma determinada classe mineral em uma província ou distrito. Como exemplo, em sistemas minerais hidrotermais, a participação relativa de diferentes tipos de fluidos e de fontes de metais, inferida a partir de estudos isotópicos, pode ser relacionada ao volume e/ou tonelagem dos recursos (HITZMAN; BEATY, 1996; EVERETT; WILKINSON, 2000; FALLICK et al., 2001; SKIRROW et al., 2007).

MODELOS DE TEOR/TONELAGEM DE DEPÓSITOS MINERAIS

Os modelos de teor/tonelagem caracterizam o depósito quanto às suas dimensões e ao conteúdo do elemento de interesse e, a esse respeito, a escola norte-americana junta o componente geológico com o econômico, sempre com objetivos práticos. Esses modelos são de utilidade ao acesso quantitativo de recursos e ao planejamento da exploração mineral e fornecem informações estatísticas de teor/tonelagem de metal ou mineral contido em cada depósito. No primeiro caso, esses modelos têm duas funções: (i) o de auxiliar na classificação dos depósitos em uma região e, por consequência, permitir a configuração dos mesmos e, (ii) fornecer informações acerca do valor potencial de depósitos não descobertos na área sendo acessada, constituindo uma chave para a análise econômica dos tipos de depósitos (COX; SINGER, 1986; SINGER et al., 1993, 1998). Complementarmente, permitem estimar a viabilidade econômica dos recursos minerais (BERGER et al., 2009).

A EXPLORAÇÃO MINERAL NO BRASIL: ANÁLISE CRÍTICA

O final da década de 1960 e, em especial, a década de 1970 representaram o período de maior sucesso na exploração mineral no país. Em 1967, na Província Mineral de Carajás, a *United States Steel* descobriu as notáveis jazidas de ferro de alto teor e nos anos seguintes houve a identificação de anomalias geoquímicas que culminaram na descoberta dos depósitos de cobre e ouro do Salobo, Igarapé Bahia e Pojucá (JACOBI, 2004; VALE, 2004).

Nesse período houve incremento substancial da exploração mineral a partir de ações exploratórias governamentais (DNPM, CPRM, RADAM, PETROBRAS), bem como de companhias mineiras privadas (Shell, Inco, De Beers, Anglo America, dentre dezenas de outras empresas), empenhadas em descobertas de novos depósitos. A Terraservice, que originaria posteriormente a DOCEGEO, foi pioneira da aplicação de métodos exploratórios tecnológicos regionais, incluindo a integração de dados de geologia, de sedimentos de corrente e geofísica aerotransportada, iniciando assim um avançado programa exploratório no Brasil. Apesar disso, não há registro de formulação e aplicação de modelos metalogenéticos completos ou de listagem mínima de atributos dos depósitos buscados e descobertos, indispensáveis à elaboração de modelos genéticos. Presume-se que todos os modelos, tanto genéticos quanto exploratórios, foram definidos via consultoria estrangeira e o *know-how* foi transferido às equipes brasileiras, que constituíram a base futura da Companhia DOCEGEO.

Nas décadas de 1980 e 1990, as empresas *majors* privilegiaram a tecnologia e desprezaram a base de dados geológicos e a criatividade das equipes de geólogos de exploração, resultando em muitos casos em insucessos, mesmo após investimentos de centenas de milhões de dólares. Essa estratégia deveu-se, muitas vezes, à baixa confiabilidade dos mapas geológicos, mesmo os de escalas regionais, o que não permitia inferências seguras baseadas na litologia, estruturas tectônicas, metamorfismo, tipos de rochas magmáticas e idades. Problema esse que continua atual em muitas regiões brasileiras, como a Amazônia, por exemplo. Também não foi bem sucedida a exploração para diamantes, apesar dos expressivos investimentos em exploração pelas companhias De Beers e Rio Tinto Desenvolvimento Minerais. Apesar desses insucessos, nas décadas de 2000 e 2010, uma série de descobertas de depósitos de ouro, ferro, cobre, manganês e fosfato, dentre outros bens minerais, foram feitas por empresas *juniors* (JACOBI, 2004).

Acredita-se que os modelos empíricos e conceituais de depósitos minerais, desenvolvidos pela escola norte-americana, desde a década de 1980, foram usados e aplicados pelas equipes de exploração de companhias mineiras, tanto nacionais quanto internacionais, em operação no Brasil principalmente nas décadas de 1980 e 1990. Contudo, percebe-se que houve, nessa época, um grande número de insucessos, o que permite pressupor o mau uso desses modelos, ou mínima confiabilidade dispensada. O maior sucesso das empresas *juniors* pode ser atribuído à maior disposição ao enfrentamento do risco e, sobretudo, por estas desenvolverem pesquisas com pequenas equipes de geólogos detentores de maior *expertise* nas *commodities* buscadas e de conhecimento mais amplo e completo da geologia dos terrenos onde esses depósitos ocorrem, devido, muitas vezes, às suas experiências em outras regiões e em outros países. Ou seja, essas equipes, mesmo com bases geológicas deficientes, ao efetuarem levantamentos em campo, aplicaram em maior ou menor grau os conceitos de Modelos de Depósitos Minerais e de Sistemas Minerais, obtendo assim maior sucesso relativo na exploração mineral, com menor volume de recursos dispendido.

Antes da década de 1990, pouco progresso foi atingido no país em relação a estudos metalogenéticos dirigidos à modelagem de depósitos minerais, devido à indigência de facilidades laboratoriais e de recursos alocados à pesquisa mineral. A disponibilidade de dados laboratoriais cresceu na década de 2000, devido a investimentos maciços da parte do PDACT, além dos esforços da CAPES e do CNPq para a formação de recursos humanos na Pós-Graduação (MARINI, 2013), o que resultou na instalação e aparelhamento de laboratórios acadêmicos, como também em financiamento de projetos de pesquisa com foco na metalogênese. Isso acelerou a obtenção de informações relativas à geocronologia, à termocronologia, aos isótopos radiogênicos e estáveis, às inclusões fluidas, análises microanalíticas, litogeoquímica, geoquímica de minérios e geoquímica de zonas de alteração hidrotermal. Entretanto, nota-se ainda que os grupos de pesquisa que podem contribuir efetivamente para um maior desenvolvimento desse setor, sobretudo integrando-se efetivamente com a indústria, são ainda muito poucos. Falta a criação de mecanismos efetivos de cooperação entre a academia, a indústria e o Serviço Geológico do Brasil, para que possa haver um salto qualitativo e quantitativo na descoberta de novos depósitos minerais.

Conforme Marini (2013), a comunidade acadêmica não tem fornecido, com algumas exceções, maiores subsídios às empresas na área de exploração e da pro-

dução mineral. Em parte isso se deve às dificuldades em transpor a compreensão científica de modelos genéticos, ou de Sistemas Minerais, para sua aplicação prática na exploração mineral, ou seja, para a proposição de modelos exploratórios efetivos (MCCUAIG et al., 2010). Por outro lado, o país carece de sólidos projetos de cooperação entre as empresas de mineração e a academia que busquem acelerar o desenvolvimento da indústria mineral. Em parte, isso se deve ao fato de que muitas pesquisas feitas nessa área nas universidades não focam a resolução de problemas geológicos específicos da indústria. Consequentemente, importantes áreas em exploração e em exploração para o estudo e avanço no entendimento dos Modelos de Depósitos Minerais e dos Sistemas Minerais não têm, muitas vezes, o acesso liberado ao estudo por pesquisadores que poderiam contribuir para melhoria do entendimento da geologia e da metalogenia. Assim, parece que há uma necessidade urgente do estabelecimento de um novo projeto nacional que envolva todas as partes interessadas no desenvolvimento da indústria mineral no Brasil.

Salvo exceções, não há no Brasil um inventário ou sumário de dados e modelos de depósitos dos principais elementos metálicos estratégicos ou críticos de importância ao parque industrial brasileiro e à comunidade científica em geral. Mesmo sendo evidente a variedade de depósitos metálicos no Brasil e a correlação de seus atributos com os de depósitos adequadamente descritos em outras regiões do mundo, são também claras muitas diferenças nessas comparações. Isso, portanto, exige a elaboração de modelos próprios, que podem diferir ou confirmar boa parte daqueles já bem maduros e consagrados à escala global mais úteis ao refinamento de modelos de exploração mineral aplicáveis no Brasil.

Parte das companhias mineiras que atuam no Brasil, até mais recentemente, não fez uso de modelos e técnicas avançadas de exploração mineral, bem como de novas tecnologias nas suas explorações minerais. Elas se serviram de mapas regionais sofríveis e de dados produzidos por serviços governamentais, também insatisfatórios, o que resultou em maiores riscos associados à exploração e a um número de descobertas relativamente reduzido, quando comparado com terrenos com geologia semelhantes em outras regiões no mundo, quando não em grandes insucessos. Entretanto, deve ser também destacado que outras dificuldades estão presentes na exploração mineral no Brasil, como a extensa cobertura de solo, as densas florestas e as dificuldades de acesso a determinadas áreas, além da falta de levantamentos aerogeofísicos de qualidade.

Ressalva-se a ação exploratória empreendida, nas duas últimas décadas, principalmente pelas companhias mineiras Vale e Votorantim Metais, bem como de companhias de exploração multinacionais, e os programas de mapeamento geológico e levantamentos aerogeofísicos desenvolvidos por órgãos governamentais e estatais (CPRM, CBPM, DNPM e outras). Lamenta-se, contudo, que raramente a comunidade geológica, mineira e acadêmica, tira proveito técnico e científico do grosso de resultados gerados, que ficam muitas vezes indisponíveis aos geocientistas e geólogos que trabalham com a metalogenia e com a exploração mineral. Sem esses dados, sem que as dificuldades anteriormente relatadas sejam superadas, e sem o necessário apoio financeiro, conceitos mais avançados de modelagem genética de depósitos minerais e de Sistemas Minerais não serão facilmente desenvolvidos no Brasil. Desta forma, modelos exploratórios mais adequados e corretos e a aplicação de tecnologias de ponta poderão não ser desenvolvidos em tempo adequado às demandas pelas *commodities* minerais, reduzindo as chances de sucesso na exploração mineral no Brasil.

Para encorajar investimento em exploração mineral e as descobertas de novos depósitos, o país precisa dispor de dados geocientíficos de alta qualidade e de equipes pluridisciplinares competentes. O rápido desenrolar da exploração mineral moderna deve-se mais à qualidade da gestão de dados e ao treinamento geológico, mas isso somente ocorre onde esses dados têm sido obtidos e amplamente divulgados ao longo de muito tempo, possibilitando o desenvolvimento e teste de novas interpretações. A demanda crescente de geólogos experientes não se esmorece e a necessidade de treinamento nunca se mostrou tão imperativa. O que se nota nos dias de hoje é uma capacidade insuficiente das universidades em proverem geólogos de exploração mineral de alta qualidade, assim como a falta de incentivos a essa carreira profissional. Entretanto, há dificuldades adicionais mais fundamentais na formação de geólogos, pois a indústria demanda por profissionais que possam elaborar mapas geológicos de qualidade, factuais e não interpretativos, atualizados em conhecimentos e tecnologias de ponta utilizadas na exploração mineral, com espírito crítico e criativo, e isso também tem faltado no Geólogo formado no Brasil.

A este respeito, e salvo as devidas exceções, pode-se dizer que a ineficiência dos geólogos, *per se*, em descobrir novos depósitos, é devida, pelo menos em parte, ao sistema educacional brasileiro e à falta de *staff* acadêmico experiente em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação na exploração mineral, na geologia econômica e metalogenia. Adicionalmente, deve ser destacada

a inexistência no país de instituições semelhantes à CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*)/*Mineral Exploration*, da Austrália, dedicadas ao desenvolvimento de métodos e estudos para subsidiar as empresas que atuam em prospecção mineral (MARINI, 2016), além de iniciativas como a dos *Key Centers*, também na Austrália, e a falta de estímulo ao empreendedorismo no ensino das Geociências.

O treinamento exige conhecimento pluridisciplinar, envolvendo tópicos das áreas de técnicas básicas geológicas (mapeamento geológicos factuais regionais, de detalhe e de mina), sensoriamento remoto e geologia espectral, prospecção geofísica, geoquímica, modelamento geológico de depósitos, integração 3D de dados, gestão de exploração, protocolos *standard* variados (sondagem, amostragem, etc.) e suporte logístico. Muitos docentes não têm sequer vivência profissional compatível com o setor mineral e os alunos demonstram uma grande dificuldade em integrar conhecimento pluridisciplinar, decorrentes de *curricula* que não mais incentivam a atuação profissional na área dos recursos minerais. Deste modo, esta ação é assumida pelas grandes companhias mineiras e companhias prestadoras de serviços, que promovem o treinamento complementar do geólogo recém-formado.

Por outro lado, em muitos casos, as companhias não permitem acesso da academia aos alvos de pesquisa, depósitos, minas e ao acervo de dados históricos de exploração mineral que facilitem a formação de recursos humanos nas áreas de metalogênese e exploração mineral, perpetuando as dificuldades.

Os mapeamentos geológicos em escala regional, de detalhe e de mina, continuam sendo desprezados na indústria de exploração mineral, e a muitos geólogos novos falta o dom e *skill* de mapear, o que é extremamente necessário à elaboração de interpretações mais sensíveis e de alta qualidade (SRK, 2015). Justifica parcialmente tal dificuldade, o fato de a exploração mineral caminhar a passos largos, não permitindo tempo suficiente para mapeamento, um trabalho moroso, principalmente o de detalhe.

O Brasil, até o momento, não se equipara a outros países líderes, tais como Austrália, Canadá, USA, África do Sul, no que diz respeito à P&D e oferta de serviços na área de exploração e mineração, à escala global. À escala local, sabe-se que boa parte desses serviços é executada por companhias estrangeiras ou via parcerias. Quais são as companhias brasileiras que se dedicam, mundialmente, à promoção do Brasil como referência ou fonte de tecnologias de inovação, equipamentos, produtos e serviços, para as indústrias de exploração mineral, no mundo? Ressalva-se,

contudo, que tem havido algum sucesso no que diz respeito ao imageamento, modelagem 3D e geologia interativa, produção de *softwares*, que é extensivo ao planejamento e produção de minas.

Na Austrália, o conceito de Sistema Mineral foi expandido a partir de 2001, pelo *Predictive Mineral Discovery Cooperative Research Centre* (pmd *CRC), que representou, até 2008, uma parceria de cooperação entre a indústria mineral, a comunidade científica e organismos governamentais com o intuito de reduzir custos da exploração mineral a partir da compreensão dos processos mineralizantes e da evolução de províncias minerais em 4D. Isto é, considerando sua evolução temporal e espacial com forte base em estudos geodinâmicos, litoestruturais e metalogenéticos. As pesquisas buscam transpor barreiras decorrentes dos altos investimentos em exploração mineral com poucos casos de sucesso em décadas anteriores, permitindo maiores descobertas, a menores custos, a partir da compreensão aprofundada da geologia dos terrenos mineralizados, em todas as escalas.

No Brasil, ainda não há parcerias de colaboração abrangentes que permitam avanços significativos em relação à compreensão da evolução geodinâmica e crustal, mesmo das maiores províncias metalogenéticas do país, uma vez que o conhecimento geológico dessas províncias é ainda muito incipiente. A simples adoção de modelos de depósitos minerais também não tem fornecido subsídios para a elaboração de modelos prospectivos. Os modelos de depósitos minerais apenas terão valor preditivo se incorporarem o conhecimento relativo aos processos mineralizantes atuantes, em todas as escalas, nos extensos sistemas minerais que culminaram com a formação das províncias minerais brasileiras, ao longo do tempo geológico.

TENDÊNCIAS E IMPLICAÇÕES FUTURAS

A adoção de conceitos de Sistemas Minerais, mais abrangente, e a transposição da compreensão desses sistemas para modelos exploratórios efetivos é uma tendência mundial ainda não posta em prática no Brasil. Essa abordagem requer investimentos significativos em estudos multidisciplinares, incluindo os geodinâmicos, com foco no reconhecimento da arquitetura litosférica das províncias minerais, estruturas translitosféricas e *footprints* distais em relação a depósitos gigantes. Nenhuma companhia isoladamente poderia avançar na compreensão desses aspectos, que necessitam de colaboração verdadeira entre Indústria, Governo e Academia, e somente essa colaboração poderá integrar

equipes e buscar recursos para o desenvolvimento da indústria mineral brasileira.

A análise metalogenética regional, com base na expressão mapeável de processos geológicos mineralizantes (por exemplo, zonas de alteração hidrotermal e seus vetores, índices geoquímicos e geofísicos úteis à exploração mineral em todas as escalas, uso de geobotânica, etc), é atualmente favorecida pela possibilidade de integração de mapas geológicos regionais a um vasto conjunto de dados geológicos, geoquímicos e geofísicos em espaço tridimensional, com uso de Sistemas de Informação Geográfica. No entanto, um dos maiores desafios que os geólogos de exploração mineral enfrentam hoje é saber como analisar o vasto acervo de dados coletados durante a execução de programas de exploração mineral, nos ambientes *Greenfield* e *Brownfield* (FRASER; DICKSON, 2007). Hoje, o que se configura como uma tendência internacional é a formação de geólogos exploracionistas criativos, que possam propor novas hipóteses para formação de depósitos minerais em províncias metalogenéticas maduras, e que possam gerar ideias sobre a formação de depósitos em províncias com ocorrências e pequenos depósitos que possam resultar na descoberta de depósitos importantes.

A inovação na exploração mineral ainda continua mal documentada porque muitos dos dados básicos são guardados nos arquivos de companhias mineiras e órgãos governamentais (JÉBRAK, 2012). O sucesso na exploração mineral deve-se ao desenvolvimento, nos últimos 15-20 anos, de *softwares* sofisticados com visualização 3D, que possibilitaram a integração total de dados geológicos, geoquímicos e geofísicos em espaço tridimensional, levando à criação de novas oportunidades de explorar as relações entre esses dados técnicos e científicos. Técnicas de análises químicas multielementares com baixo limite de detecção e de baixo custo, como ICP-MS, têm permitido a identificação do zoneamento de associações elementares e suas relações espaciais em relação aos corpos de minério, permitindo a identificação de vetores com eficiência.

Devido à dificuldade crescente relativa à descoberta de depósitos minerais rasos, pressupõe-se ser necessário que a exploração futura alcance 3 a 4 km de profundidade, e países com forte tradição mineira, como a Austrália, já há alguns anos têm desenvolvido programas para descoberta futura de depósitos profundos (AAS, 2012). Por decurso, os métodos sísmicos constituem, hoje, uma ferramenta importante para revelar as estruturas que hospedam depósitos minerais a grande profundidade, para planejamento de mina e exploração (MALEHMIR et al., 2012).

A este respeito, já em muitos países, como África do Sul, Austrália, Canadá, tornou-se prática comum, em depósitos de metais preciosos, carvão, etc, a execução de levantamentos sísmicos 3D, principalmente antes da instalação de novos *shafts* ou do início de novos trabalhos de desenvolvimento (PRETORIOUS et al., 2007; MACDOWEL et al., 2007).

Os *data sets* envolvidos no imageamento e planejamento de mina incluem: sísmica em 3D, gravimetria e magnetometria. Presentemente, os métodos de levantamento e alta resolução em 2D são realizados em áreas mineiras, mas há uma grande tendência em usar os métodos em 3D, especialmente em campos mineiros já bem conhecidos. Nota-se que os métodos sísmicos oferecem imagens de alta resolução de estruturas geológicas que contêm depósitos minerais e, em poucos casos, pode ser usado para a detecção direta de depósitos situados a profundidades > 1 km (MALEHMIR et al., 2012). Boa parte dos levantamentos são acompanhados de medidas petrofísicas feitas em furos de sondagem e no laboratório, para modelar as interpretações sísmicas. Apesar do sucesso do método, as companhias mineiras têm sido relutantes em aceitar a tecnologia.

Em campos mineiros outrora explotados, há uma tendência de retomada das pesquisas, como já praticado no Canadá, Austrália e Europa, com uso sistemático de novas tecnologias, principalmente geofísica integrada a dados geológicos corretos, mas também considerando os Sistemas Minerais e as transformações de seus produtos, como o metamorfismo de rochas hidrotermalizadas, de modo a reduzir os riscos de exploração. Os programas de exploração mineral de sucesso e a custos reduzidos exigem aplicação inteligente das inúmeras ferramentas e técnicas postas à disposição de qualquer equipe, sendo uma das mais importantes o modelamento da interpretação integrada 3D geofísica e geológica, dirigida à definição de alvos profundos. Se, por um lado, um grande conjunto de dados favorece as interpretações, por outro lado, o uso indiscriminado desses dados, sem análises críticas e criativas, podem sempre resultar na confirmação dos modelos já existentes por causa do viés do analista na seleção dos dados relevantes.

Os modelos empíricos foram e continuam a ser usados pelas companhias mineiras brasileiras como uma vantagem estratégica, embora o serendipismo (*serendipity*) tenha tido, sempre, um papel importante para inovação dirigida a alvos de investigação. Em alguns programas exploratórios aplicados em *Greenfields* a maior parte de modelos genéticos não atingiu o nível de maturidade desejado para justificar a necessidade de

uso (JÉBRAK, 2012). Nenhuma técnica revolucionária resultou em sucesso de programas de exploração mineral e, muito pelo contrário, as descobertas são devidas ao uso de técnicas reais e já testadas que evoluíram naturalmente ao lado do desenvolvimento tecnológico e do conhecimento industrial acumulado (HOLLIDAY; COOKE, 2007). Uma revisão dos principais métodos exploratórios usados para descoberta de depósitos auríferos na década de 1980 indicou que o entendimento geológico foi o elemento chave no processo de descoberta em ambientes *Greenfield* e *Brownfield* (SILLITOE; THOMPSON, 2006).

Dessa forma, o uso crescente das geotecnologias permitirá a integração total, cada vez mais eficiente, de dados geológicos, geoquímicos e geofísicos, incluindo novas técnicas, em espaço tridimensional. No entanto, a compreensão de processos geológicos, em todas as escalas, será importante para responder não apenas “como” os depósitos são formados, mas, principalmente, “onde”, permitindo reduzir os custos da pesquisa.

O grande acúmulo de dados e o enorme desenvolvimento das ferramentas de análise não substituem uma geologia de base bem feita, calcada na correta identificação da mineralogia, da litologia e das estruturas e, sobretudo, o conhecimento dos processos geológicos, expressos nos Modelos de Depósitos Minerais e nos Sistemas Minerais, e na criatividade concreta necessária aos geólogos de exploração mineral. Como exemplo notável nesse campo, pode ser citada a descoberta recente dos depósitos de Cu-Au de Cadia (Austrália), cujo processo pode ser visto em Wood (2012a, 2012b, 2014).

REFERÊNCIAS

- AAS - AUSTRALIAN ACADEMY OF SCIENCE. *Searching the deep earth - A vision for exploration geoscience in Australia*. Disponível em: <<http://www.science.org.au/policy/uncover.html>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- ADAMS, S.S. Using geological information to develop exploration strategies for epithermal deposit. In: BERGER, B., BETKE, P.M. (Eds.). *Geology and geochemistry of Epithermal Systems*. Reviews in Economic Geology, v. 2, p. 273-296. 1985.
- BERBERT, C.O. Mineral Exploration in Brazil: Past and Present. In: GARLAND, G.D. (Ed.) *Proceedings of Exploration 87: Third Decennial International Conference on Geophysical and Geochemical Exploration for Minerals and Groundwater*. Ontario Geological Survey, Special Volume 3, Paper 63, p. 782-787. 1989.
- BERGER, B.R.; DREW, L.J. Mineral-Deposit models New Developments. In: ANDREA G. FABBRI, A.G.; GAÁL, G.; MCCAMMON, R.B. (Eds.). *Deposit and Geoenvironmental Models for Resource Exploitation and Environmental Security*, Nato Science Partnership Subseries, v. 80, Amsterdam: Springer Netherlands, p. 121-134. 2002. DOI: 10.1007/978-94-010-0303-2_6.
- BERGER, V.I.; SINGER, D.A.; ORRIS, G.J. *Carbonatites of the world, explored deposits of Nb and REE-database and grade and tonnage models*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1139, 17 p. and database. 2009.
- BETTENCOURT, J.S.; MORESCHI, J. B.; TOLEDO, M.C.M.T. Recursos minerais da terra. In: TEIXEIRA, W. et al. (Org.) *Decifrando a Terra*, 2ª. Ed. – São Paulo: Companhia Editora Nacional. 2009.
- BLISS, J.D. Grade and tonnage model of Chugach-type low-sulfide Au-quartz veins. 1992. BLISS, J.D. (Ed.). *Developments in mineral deposits modelling*. U.S. Geological Survey Bulletin 2004, 168 p.
- BONHAM-CARTER, G.F. *Geographical Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS*. Tarrytown, NY: Pergamon Press, 338 p. 1994.
- BRASIL - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. 2011. *Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM-2030)*. Brasília: MME. 2011.
- COLVINE, A.C. et al. *Archean Lode Gold Deposits in Ontario. Part I: A Depositional Model. Part II: A Genetic Model*. Mines and Mineral Division, Ontario Geological Survey, Miscellaneous Paper v. 139, 135 p. 1998.
- COX, D.P.; SINGER, D.A. (Eds.). *Mineral deposit models*. U.S. Geological Survey Bulletin 1693, 379 p. 1986. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/bul/b1693/>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- DUKE, J.M. *Government geoscience to support mineral exploration: public policy rationale and impact*. Prepared by Prospectors and Developers Association of Canada, 64 p. 2010.
- EVERETT, C.E.; WILKINSON, J.J. What makes an orebody? A comparison of fluid inclusion and sulfur isotope data from prospects and deposits in the Irish Zn-Pb orefield. *Geol. Soc. Am. Abs. Progr.*, v. 32, p. A-282. 2000.
- FALLICK, A.E. et al. Bacteria were responsible for the magnitude of the world-class hydrothermal base metal sulfide orebody at Navan, Ireland. *Economic Geology*, v. 96, p. 885-890. 2001.

- FRASER, G.L. et al. Geodynamic and Metallogenic Evolution of Proterozoic Australia from 1870-1550 Ma: a discussion. *Camberra: Geoscience Australia Record*, v. 16, 76 p. 2007.
- FRASER, S.J.; DICKSON, B.L. A New Method for Data Integration and Integrated Data Interpretation: Self-Organising Maps. In: MILKEREIT, B. (Ed.). *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial Conference on Mineral Exploration*, p. 907-910. Disponível em: <<http://www.dmec.ca/ex07-dvd/E07/pdfs/67.pdf>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- GEOSCIENCE AUSTRALIA. *Mineral Systems of Australia*. Disponível em: <<http://www.ga.gov.au/about/what-we-do/projects/minerals/current/mineral-systems#heading-1>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- HAYES, T.S. et al. Sediment-hosted stratabound copper deposit model. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-M, 2015, 147 p. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3133/sir20105070M>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- HEDENQUIST, J.W.; ARRIBAS, J.R.A.; REYNOLDS T.J. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, v. 93, p. 373-404. 1998.
- HENLEY, R.W.; BERGER, B.R. What is an Exploration Model Anyway? – An analysis of the Cognitive Development and Use of Models in Mineral Exploration. In: KIRKHAM, R.V.; SINCLAIR, W.D.; THORPE, R.I.; DUKE, J.M. (Ed.). *Mineral Deposit Modeling*. Geological Association of Canada Special Paper 40. 1993.
- HITZMAN, M.W.; BEATY, D.W. The Irish Zn-Pb-(Ba) orefield. In: SANGSTER, D.F. (Ed.). *Carbonate-hosted lead-zinc deposits*. Society of Economic Geologists Special Publication 4, p. 112-143. 1996.
- HITZMAN, M.W.; REYNOLDS, N.; SANGSTER, D.F.; ALLEN C.R.; CARMAN C. Classification, Genesis, and Exploration Guides for Non-Sulfide Zinc Deposits. *Economic Geology*, v. 98, n. 4, p. 685-714, 2003. DOI: 10.2113/98.4.685.
- HITZMAN, M.W.; ORESKES, N.; EINAUDI, M.T. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE deposits). *Precambrian Research*, v. 58, p. 241-287, 1992.
- HO, S.E.; GROVES, D.I.; BENNETT, J.M. (Eds.). *Gold deposits of the Archean Yilgarn Block, Western Australia: nature, genesis and exploration guides*. The Department of Geology, The University of Western Australia, Publication n. 20. 1990.
- HOLLIDAY, J.R.; COOKE, D.R. Advances in Geological Models and Exploration Methods for Copper ± Gold Porphyry Deposits. In: MILKEREIT, B. (Ed.). *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial Conference on Mineral Exploration*, p. 791-809, 2007. Disponível em: <<http://www.dmec.ca/ex07-dvd/E07/pdfs/53.pdf>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- JACOBI, P. *O Boom da Exploração Mineral*. Portal do Geólogo. 2004. Disponível em: <<http://www.bamburra.com/O%20Boom%20da%20Exploracao%20Mineral%20-%20revisitado.pdf>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- JAIRETH, S.; HUSTON, D. Metal Endowment of Cratons, Terranes and Districts: Insights from a Quantitative Analysis of Regions with Giant and Super-giant Deposits. *Ore Geology Reviews*, v. 38, p. 288-303. 2010.
- JAQUES, A.L.; JAIRETH, S.; WALSHE, J.L. Mineral systems of Australia: an overview of resources, settings and processes. *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 49, p. 623-660. 2002.
- JÉBRAC, M. *Innovation in mineral exploration: targets, methods and organization since the first globalization period*. Université du Québec à Montréal, Sciences de la Terre et de l'atmosphère and CIRST. p. 77. 2012. Disponível em: <http://uqat.ca/cem/doc/Innovations_mineral_exploration.pdf>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- JULIANI, C.; RYE, R.O.; NUNES, C.M.D.; SNEE, L.W.; CORRÊA-SILVA, R.H.; MONTEIRO, L.V.S.; BETTENCOURT, J.S.; NEUMANN, R.; ALCOVER NETO, A. Paleoproterozoic high-sulfidation mineralization in the Tapajós gold province, Amazonian Craton, Brazil: geology, mineralogy, alunite argon age, and stable-isotope constraints. *Chemical Geology*, v. 215, p. 95-125. 2005.
- KATZ, S.S. Emulating the prospector expert system with a raster gis. *Computers and Geosciences*, v. 17, n. 7, p. 1033-1050. 1991.
- KIRKHAM, R.V.; SINCLAIR, W.D.; THORPE, R.I.; DUQUE, J.M. (Ed.). *Mineral Deposit Modeling*. Geological Association of Canada Special Paper 40, 770 p. 1993.
- KNOX-ROBINSON, C.; WYBORN, L.A.I. Towards a holistic exploration strategy: using geographic information systems as a tool to enhance exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 44, p. 453-463. 1997.
- KREUZER, O.P. et al. Linking Mineral Deposit Models to Quantitative Risk Analysis and Decision-Making in Exploration. *Economic Geology*, v. 103, p. 829-850. 2008.
- MALEHMIR, A. et al. Seismic methods in mineral exploration and mine planning: an overview of past and present case histories and a look into the future. *Geophysics*, v. 77, p. WC173-WC190. 2012.
- MARINI, O. *O Potencial Mineral do Brasil e sua realização – ABC*. Simpósio “Recursos Minerais do Brasil: Problemas e Desafios”. Academia Brasileira de Ciências, p. 1-4. 2013.
- MARINI, O. *Potencial Mineral do Brasil*. In: MELFI, A.J.; MISI, A.; CAMPOS, D.A.; CORDANI, U.G. (Orgs.) *Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências. 420 p. 2016. (Nesse volume).
- MCCAMMOM, R.B. Numerical mineral deposit models. In: BLISS, J.D. (Ed.). *Developments in mineral deposits modelling*. U.S. Geological Survey Bulletin, v. 2004, n. 6-12, p. 64-167. 1992.
- MCCAMMOM, R.B. Prospector II — An expert system for mineral deposit models. In: KIRKHAM, R.V.; SINCLAIR, W.D.; THORPE, R.I.; DUKE, J.M. (Ed.). *Mineral Deposit Modeling*. Geological Association of Canada Special Paper. 1993.
- MCCUAIG, T.C.; BERESFORD, S.; HRONSKY, J. Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system. *Ore Geology Reviews*, v. 38, p. 128-138. 2010.

- MCDOWELL, G.M.; STEWART, R.; MONTEIRO, R.N. In-mine Exploration and Delineation Using an Integrated Approach. In: MILKEREIT, B. (Ed.). *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial Conference on Mineral Exploration*. p. 571-589. 2007. Disponível em: <<http://www.dmec.ca/ex07-dvd/E07/pdfs/40.pdf>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- MOLE, D.R. et al. Crustal evolution, intra-cratonic architecture and the metallogeny of an Archaean craton. Londres: *Geological Society Special Publications*, v. 393, p. 23-80. 2015. doi:10.1144/SP393.8.
- MONTEIRO, L.V.S. et al. Geology, petrography, and mineral chemistry of the Vazante non-sulfide and Ambrósia and Fagundes sulfide-rich carbonate-hosted Zn-(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 28, p. 201-234. 2006.
- MONTEIRO, L.V.S. et al. Nonsulfide and sulfide-rich zinc mineralizations in the Vazante, Ambrósia and Fagundes deposits, MG, Brazil: mass balance and stable isotope constraints on the hydrothermal alterations. *Gondwana Research*, v. 11, n. 3, p. 362-381. 2007.
- MONTEIRO, L.V.S. et al. The Vazante Zinc Mine, MG, Brazil: Constraints on Fluid Evolution and Willemittic Mineralization. *Exploration and Mining Geology*, v. 8, p. 21-42. 1999.
- MOSIER, D.L.; BLISS, J.D. Introduction and overview of mineral deposit modeling. In: BLISS J.D. (Ed.). *Developments in Mineral Deposit Modeling*, U.S. Geol. Surv. Bull., v. 2004, p. 1-5. 1992.
- Ministry of Employment and the Economy (MEE) - Ministry of the Environment (ME) - FINLAND. *Exploration in protected areas, the Salmi homeland and the reindeer managing area*. Ministry of Employment and the Economy, Finlândia, 2005. 73 p. Disponível em: <http://www.tukes.fi/Tiedostot/kaivokset/TEM_Opas_MEKO_en.pdf>. Acesso em 28 de outubro de 2015.
- PRETORIUS, C.C. et al. 3D data integration for exploration and mine planning. In: MILKEREIT, B. (Ed.). *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial Conference on Mineral Exploration*. 2007, p. 601-610. Disponível em: <<http://www.dmec.ca/ex07-dvd/E07/pdfs/42.pdf>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- SILLITOE, R.H. The tops and bottoms of porphyry copper deposits. *Economic Geology*, v. 68, p. 799-815. 1973.
- SILLITOE, R.H. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, v. 105, n. 1, p. 3-41. 2010.
- SILLITOE, R.H.; THOMPSON, J.F.H. Changes in mineral exploration practice: consequences for discovery. In: DÖGGETT, M.D., PARRY, J.R. (Ed.). *Wealth Creation 67 in the Minerals Industry: Integrating Science, Business, and Education*. Society of Economic Geologists, p. 193-220. 2006.
- SINGER, D.A. Revised grade and tonnage model of carbonatite deposits: U.S. Geological Survey Open-File Report, v. 98-235, 7 p. 1998. Disponível em: <<http://pubs.er.usgs.gov/usgspubs/ofr/ofr98235>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- SINGER, D.A.; MOSIER, D.L.; MENZIE, W.D. *Digital Grade and Tonnage Data for 50 Types of Mineral Deposits*. U.S. Geological Survey Open-File Report, v. 93-280, 1993.
- SKIRROW, R.G. et al. Timing of iron oxide Cu-Au-(U) Hydrothermal activity and Nd isotope constraints on metal sources in the Gawler Craton, South Australia. *Economic Geology*, v. 102, p. 1441-1470, 2007.
- SRK. *Fresh perspective: technology trends and solutions for Mineral Exploration*. Geosoft, p. 44. 2015. Disponível em: <www.geosoft.com/resoucer/goto/fresh-perspectives>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- STEVENS, R. Exploration and Mining 101. *Short course at Mineral Exploration Roundup 2007*. Association for Mineral Exploration BC, Canada, p. 130. 2007.
- THÉBAUD, N. et al. *A mineral systems approach to exploration*. Centre for Exploration Targeting Exploration Day. 2014. Disponível em: <<http://www.cet.edu.au/docs/presentations/1330-nicolas-thebaud.pdf?sfvrsn=2>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- VALE, E. *O Boom da Exploração Mineral: revisitado*. Portal do Geólogo. 2004. Disponível em: <<http://www.geologo.com.br/novoboombaexploracao.asp>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- VERPLANCK, P.L. et al. *A deposit model for carbonatite and peralkaline intrusion-related rare earth element deposits*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, v. 2010-5070-J, 58 p. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3133/sir20105070J>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- WOOD, D. *Discovery of the Cadia Deposits, NSW, Australia (Part 1)*. SEG Newsletter, January, n. 88. 2012a.
- WOOD, D. *Discovery of the Cadia Deposits, NSW, Australia (Part 2)*. SEG Newsletter, April, n. 89. 2012b.
- WOOD, D. *Creating Wealth and Avoiding Gambler's Ruin - Newcrest Mining Exploration, 1991-2006*. SEG Newsletter, January, 2014, n. 96.
- WYBORN, L.A.I.; HEINRICH, C.A.; JAQUES, A.L. *Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria*. In: Australasian Institute of Mining and Metallurgy Annual Conference Proceedings, 1994. p. 109-115.

Sensoriamento remoto em exploração mineral no Brasil

Alvaro Penteado Crósta

Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas

Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida

Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo

Waldir Renato Paradella

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Sebastião Milton Pinheiro da Silva

Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes,
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Paulo Roberto Meneses

Instituto de Geociências, Universidade de Brasília

RESUMO

É avaliado o estado atual da tecnologia de sensoriamento remoto para aplicações em exploração mineral, incluindo os principais instrumentos disponíveis e suas características, seguida de uma análise do cenário brasileiro no tocante às instituições de ensino e pesquisa e do setor industrial atuantes nessa área, assim como seus potenciais e limitações. São apresentados alguns estudos de caso envolvendo aplicações do sensoriamento remoto em atividades de exploração e exploração mineral desenvolvidas no Brasil e empregando diferentes técnicas e em distintas condições geológicas, fisiográficas e climáticas. Ao final, são apresentadas as perspectivas futuras quanto ao uso do sensoriamento remoto em exploração mineral no Brasil.

Palavras-chave Sensoriamento remoto. Exploração mineral. Radiação eletromagnética. Geologia espectral. Geologia espectral. Interferometria diferencial. Geobotânica.

INTRODUÇÃO

Desde o surgimento das fotografias aéreas verticais na primeira metade do século 20, o sensoriamento remoto (SR) tem sido uma das técnicas mais utilizadas na busca de acumulações econômicas de recursos minerais, a chamada exploração mineral. Com a notável evolução das tecnologias de aquisição de dados de SR, principalmente nas últimas três décadas, pode-se dispor nos dias atuais de uma variada gama de imagens coletadas por sensores remotos. Esse conjunto de dados de SR vem sendo coletado tanto a partir de plataformas orbitais (satélites), como também de aeronaves dos mais diversos tipos, e vem contribuindo de modo significativo para o sucesso das atividades de exploração mineral.

Nos dias atuais, dados os significativos avanços tecnológicos alcançados, o SR pode ser utilizado não apenas como fonte de informações indiretas na indicação de áreas potenciais para ocorrências dos mais diversos tipos de mineralizações, mas também de informações diretas sobre a composição mineralógica de solos e rochas e/ou de estruturas geológicas associadas a depósitos minerais. Além disso, o SR, a depender do nível de exposição das rochas na área sob análise, pode contribuir diretamente para a compreensão da gênese de jazidas minerais. Finalmente, ele pode também ser utilizado como instrumento de precisão em atividades de monitoramento relacionadas à exploração de jazidas minerais.

Para ser plenamente eficaz enquanto técnica exploratória, o SR deve idealmente ser utilizado em combinação com os levantamentos geológicos de campo, estes sempre indispensáveis, assim como com outras

técnicas exploratórias, tais como os métodos geofísicos e geoquímicos. Ele também pode ser combinado com uma técnica complementar de grande relevância, que é a espectroscopia de reflectância (THOMPSON et al., 1999; BEDELL et al., 2009), por meio da qual é possível estabelecer a composição mineralógica de amostras de rocha de maneira rápida, eficiente e não-destrutiva.

Neste capítulo, são abordados os avanços recentes mais significativos do ponto de vistas das técnicas de SR utilizadas nos dias atuais para exploração mineral, bem como apresentados alguns estudos de caso no Brasil, ilustrando sua aplicação em atividades de exploração e de exploração de recursos minerais de distintos tipos e em diferentes condições fisiográficas e climáticas. O objetivo é mostrar a enorme versatilidade alcançada pelas técnicas de SR, no sentido de orientar estratégias de aplicação das mesmas no desenvolvimento da produção mineral brasileira.

A EVOLUÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO: UM BREVE RETROSPECTO

Do ponto de vista da sua utilização em atividades de exploração mineral, a evolução das técnicas de aquisição de dados utilizadas pelo SR pode ser analisada pelas óticas do incremento progressivo da resolução espacial e espectral. Para uma melhor compreensão desses dois conceitos, pode-se recorrer ao exemplo das fotografias aéreas convencionais, precursoras do SR moderno, que fazem uso de filme fotográfico em geral monocromático (preto-e-branco). Essas fotografias possuem uma grande capacidade de discriminar os objetos de pequenas dimensões, ou seja, têm alta

resolução espacial, mas uma capacidade extremamente limitada de registrar sua interação com a radiação solar, traduzida apenas pela intensidade de energia refletida na região espectral do visível e representada em tons de cinza. Neste caso, nem mesmo as cores dos objetos são registradas, o que confere às fotografias aéreas uma baixa resolução espectral.

Os sensores remotos, tanto aéreos como orbitais, experimentaram notável evolução em ambos os aspectos. No tocante à resolução espacial, sensores orbitais atingem nos dias atuais resolução máxima de cerca de 30 cm, superior em muitos casos à resolução espacial das fotografias aéreas utilizadas nas décadas de 1970 e 1980.

Mas talvez o maior salto tecnológico experimentado no SR tenha sido o da evolução da resolução espectral. A Figura 1 mostra o espectro eletromagnético (EEM) com suas subdivisões tradicionais: as regiões do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR), infravermelho de ondas curtas (SWIR), infravermelho termal (TIR) e microondas. As regiões de menor comprimento de onda, os raios- γ , raios-x e ultravioleta, não podem ser utilizadas no SR da superfície da Terra, devido ao bloqueio da energia nesses comprimentos de onda pela atmosfera. Os maiores comprimentos de onda, relativos às ondas de rádio/TV, são utilizadas apenas para a comunicação entre as plataformas de coleta de dados de SR e as estações terrestres.

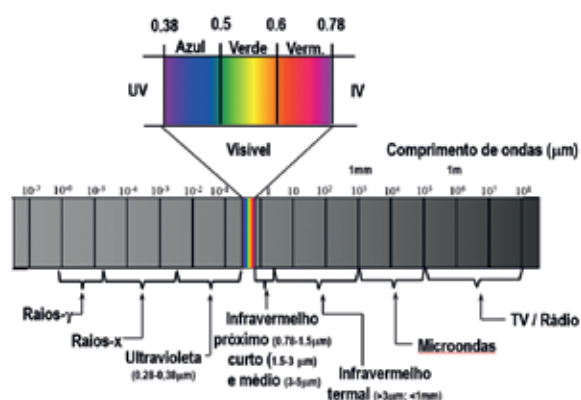


Figura 1 Representação do espectro eletromagnético com as principais regiões utilizadas em SR geológico, em termos de comprimento de onda (em micrometros – μm) (Fonte: Elaborada por Alvaro Penteado Crósta).

Em termos tecnológicos, os primeiros sensores remotos captavam a energia solar refletida pela superfície da Terra em apenas uma única faixa da região do visível do EEM. Esse é o caso, por exemplo, das primeiras câmeras aerofotogramétricas, utilizando ainda os filmes em preto-e-branco. Posteriormente, esses filmes evoluíram para o registro colorido, ainda na região do visível. A etapa seguinte foi a introdução dos filmes sensíveis à radiação infravermelha, estendendo assim a possibilidade de registro de informações da superfície para além da região do visível do EEM, ainda que de forma limitada apenas ao infravermelho próximo.

A partir da década de 1960, a introdução de dispositivos imageadores eletrônicos, utilizando tecnologias de diodos semicondutores, ampliou significativamente a possibilidade de captação de energia para outras regiões do EEM. Isso permitiu o desenvolvimento de novos sensores operando em regiões não apenas do espectro infravermelho não-termal que, juntamente com a região visível, registram a energia solar refletida pelos materiais terrestres, mas também do infravermelho termal, que registram a energia térmica emitida pelos materiais terrestres.

Essa evolução teve um enorme impacto positivo na identificação direta de minerais e rochas e de diversos outros processos que ocorrem na superfície terrestre. Por meio dela, os sensores passaram a operar como instrumentos analíticos, capazes de fornecer informações de grande valor sobre a composição química-molecular dos materiais terrestres, em particular dos minerais e rochas. Além disso, a operação a partir de plataformas orbitais ou aéreas possibilita que os sensores façam esse tipo de análise à distância e cubram grandes áreas da superfície da Terra, fatores que favorecem sobremaneira o seu uso em geologia exploratória, sobretudo em países extensos e com regiões de difícil acesso.

Em uma evolução tecnológica paralela, iniciou-se em meados da década de 1930 o desenvolvimento de sistemas sensores com radares, seguidos na década de 1950 pela introdução da tecnologia de radares de abertura sintética (SAR), em uso até os dias atuais. Os sensores do tipo SAR operam na região das microondas do EEM, que têm comprimento de onda mais longo em relação aos sensores baseados em diodos semicondutores. Dentre as características típicas dos sensores SAR está a possibilidade de obtenção de imagens independentemente de uma fonte externa de energia, uma vez que eles produzem a sua própria energia. Esta é enviada até a superfície na forma de pulsos eletromagnéticos e, após a interação com a superfície, uma parte é retroespalhada e retorna ao sensor, sendo então utilizada para gerar as imagens SAR. Isto per-

mite que os radares imageadores obtenham imagens tanto diurnas como noturnas. Outra característica de grande importância dos sensores SAR é a capacidade de penetração das ondas eletromagnéticas de maior comprimento de onda em nuvens e até na vegetação e nas camadas mais superficiais do solo, algo que não é possível a partir dos sensores imageadores baseados em diodos semicondutores. Tais características conferem aos radares grande flexibilidade de operação em regiões tropicais úmidas, onde a presença de nuvens e de cobertura vegetal é comum.

Do ponto de vista da natureza dos fenômenos registrados nas imagens coletadas por sensores desses dois tipos (diodos semicondutores e SAR), há também uma distinção de grande importância. Enquanto os primeiros registram fenômenos de natureza química-molecular dos materiais presentes na superfície imageada, os sensores SAR registram fenômenos de natureza física, tais como a macro e micro-rugosidade das superfícies, sua estrutura física (tamanho, orientação e distribuição dos elementos físicos presentes na superfície), bem como suas características de condutividade elétrica.

Desse modo, existe uma notável complementaridade entre os fenômenos registrados por esses dois tipos de sensores. Isto leva à conclusão de que a operação conjunta de sensores operando nas regiões do EEM relativas ao visível, infravermelho refletido e infravermelho emitido (termal), combinada com radares operando na região das microondas (SAR), permite a obtenção de um extenso e importante conjunto de informações químico-físicas sobre os fenômenos e materiais presentes na superfície terrestre, dentre os quais as rochas e os minerais de forma direta ou, indiretamente, pela geobotânica, que se utiliza da influência da geologia sobre as coberturas vegetais naturais.

PRINCIPAIS SENSORES PARA USO NA EXPLORAÇÃO MINERAL

Nesta seção é feita uma síntese das principais tecnologias de SR disponíveis para uso na exploração mineral a partir de plataformas orbitais (satélites) e aéreas (aeronaves). Em vista da grande variedade de tecnologias e sensores atualmente disponíveis, foram selecionados apenas aqueles que têm um uso mais voltado para as atividades de exploração e também de exploração mineral. Além disso, os dois tipos de sensores imageadores abordados na seção anterior (diodos semicondutores e SAR) serão tratados em separado, ainda que sua utilização conjunta represen-

te uma situação ideal em vários tipos de aplicações geológicas do SR, conforme mencionado.

Sensores remotos orbitais

Os sensores orbitais que utilizam diodos semicondutores e que têm maior potencial de aplicação em estudos geológicos são os dos satélites da série Landsat, o Terra/ASTER e, mais recentemente, o WorldView-3, todos eles operando nas regiões do EEM referentes ao visível e infravermelho refletido e os dois primeiros também no infravermelho termal.

Já os sensores do tipo SAR operando a bordo de satélites e que têm sido mais extensivamente utilizados em estudos geológicos exploratórios são o Radarsat, o ALOS/PALSAR e o TerraSAR-X.

Uma síntese das principais características desses sensores é apresentada a seguir, com foco em aplicações geológicas e, mais especificamente, na exploração mineral.

Landsat TM/ETM+/OLI

Os satélites Landsat são parte do programa homônimo da NASA (*National Aeronautics & Space Administration*, dos Estados Unidos), iniciado em 1972, sendo o programa mais antigo de SR orbital de recursos naturais. Ao longo dos anos os sensores dos satélites Landsat foram passando por aperfeiçoamentos no sentido de conferir-lhes maior capacidade de discriminação espacial e espectral dos materiais da superfície terrestre. De particular importância para as aplicações geológicas são os sensores *Thematic Mapper* (TM), *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) e o *Operational Land Imager* (OLI), operando a bordo, respectivamente, dos satélites Landsat-4 e 5, Landsat-7 e Landsat-8.

O sensor TM, que iniciou operações em 1982, foi o primeiro a contar com bandas espectrais na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR), na qual um grande número de minerais possui feições de absorção espectral características. De fato, a inclusão de uma segunda banda no SWIR nesse sensor foi uma demanda de um grupo de pesquisadores do *United States Geological Survey* (USGS), pioneiros no desenvolvimento das aplicações do SR na exploração mineral (PODWYSOCKI et al., 1983), com o objetivo específico de mapear minerais portadores do íon hidroxila (O-H^-), comuns em ambientes de alteração hidrotermal.

Com uma resolução espacial de 30 m e sete bandas espectrais distribuídas nas regiões do EEM do visível (3 bandas), infravermelho próximo (1 banda), infravermelho de ondas curtas (2 bandas) e infravermelho termal (1 banda), o sensor TM, juntamente com o seu sucessor, o ETM+, vêm sendo extensivamente utiliza-

dos em projetos de exploração mineral em todo o mundo, com grande êxito (CRÓSTA; SOUZA FILHO, 2009). Isso se deve à sua notável capacidade de identificar e mapear, em escala regional, minerais de interesse na localização de áreas potenciais para vários tipos de mineralização. Dentre elas encontram-se os óxidos e hidróxidos de Fe^{3+} (hematita, goethita e limonita), argilas (caolinita, dickita, montmorilonita), micas (ilita, sericita, muscovita), sulfatos (jarosita, alunita) e carbonatos (calcita e dolomita). Contudo, devido à resolução espectral relativamente reduzida desses dois sensores, o seu uso é restrito à diferenciação de dois tipos básicos de assembleias minerais: óxidos/hidróxidos de Fe^{3+} e o conjunto de argilas/micas/sulfatos/carbonatos, geralmente denominado de forma genérica de “argilas”.

Apesar dessa limitação, o notável sucesso que o uso do Landsat TM alcançou junto à comunidade geológica mundial tem estreita relação com a combinação dessa configuração espectral bastante flexível e abrangendo todas as regiões da radiação refletida do EEM com outras características tais como: resolução espacial adequada, cobertura mundial e acesso fácil aos dados. Em 1999 o TM foi substituído pelo seu sucessor, o ETM+, operando a partir do satélite Landsat-7, que manteve basicamente as mesmas características técnicas, apenas acrescentando uma banda espectral pancromática, cobrindo a região do visível e parte do infravermelho próximo, mas com uma resolução espacial melhorada (15 m), e com melhor resolução espacial na banda termal (60 m contra os 120 m dos antecessores). Esse acréscimo, em termos das aplicações geológicas, possibilitou uma melhoria na caracterização da textura superficial dos terrenos, o que favorece as interpretações de estruturas geológicas em imagens.

Em 2013, com o lançamento do Landsat-8, entrou em operação a nova versão da série TM/ETM+, que passou a contar com a combinação de dois sensores: o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). No sensor OLI, em relação às versões anteriores, foram acrescentadas duas novas bandas espectrais, sendo uma delas situada em comprimento de onda logo abaixo da região correspondente ao comprimento de onda do azul no espectro visível, direcionada para estudos oceânicos e atmosféricos, e a outra no espectro do infravermelho de ondas curtas, para estudos atmosféricos. Portanto, do ponto de vista das aplicações geológicas em geral, e na exploração mineral em particular, o OLI apresenta basicamente a mesma configuração do ETM+, mantendo assim suas características de diferenciação entre áreas com alta concentração de óxidos/hidróxidos de ferro e filossil-

catos. Já o sensor TIRS, que atua em combinação com o OLI, dispõe de duas bandas espectrais com 90 m de resolução espacial onde os sensores TM e ETM+ tinham apenas uma. Além de maior eficiência na detecção da temperatura superficial este sensor pode ainda ser usado na detecção de processos de silicificação.

A literatura registra inúmeros exemplos de aplicações exitosas das imagens do Landsat em projetos de exploração mineral e uma síntese de algumas dessas aplicações encontra-se em Loughlin (1991), Sabine (1999) e Crósta e Souza Filho (2009). No Brasil, onde a geralmente bem desenvolvida cobertura de solos, produto de intemperismo típico de zonas tropicais/sub-tropicais, aliada à presença frequente de cobertura vegetal, dificultam ou até mesmo impossibilitam o estudo direto da resposta espectral dos minerais e rochas a partir de imagens do Landsat TM/ETM+, a obtenção indireta de informações do substrato geológico utilizando a resposta espectral da vegetação pode ser uma alternativa adequada. Essa via, utilizando a geobotânica, foi explorada em projetos de exploração mineral para depósitos auríferos desenvolvidos na região do Tapajós, na Amazônia, por Almeida et al. (2009).

Todo o acervo de imagens do Programa Landsat, que inclui as imagens adquiridas pelos vários sensores que operaram a bordos dos satélites da série entre 1973 e os dias atuais, assim como todas as novas imagens adquiridas pelo Landsat-8/OLI, foram disponibilizadas de maneira aberta a partir de 09/01/2009, sem custo, e podem ser obtidas junto ao USGS por meio dos aplicativos on-line *EarthExplorer* (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) e *Glovis* (<http://glovis.usgs.gov/>).

Terra/ASTER

O satélite Terra, lançado em 1999, inaugurou um novo e promissor período para o SR geológico, graças ao sensor multiespectral *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER). Este sensor, desenvolvido em conjunto pelas agências espaciais dos Estados Unidos e do Japão, foi o primeiro a ser desenvolvido com foco específico em aplicações geológicas, com notável destaque para as atividades de exploração mineral (ABRAMS, 2000).

A configuração espectral do ASTER, notavelmente superior aos sensores da série Landsat, incluiu 14 bandas espectrais, distribuídas entre as regiões do visível e infravermelho próximo (VNIR - 3 bandas), infravermelho de ondas curtas (SWIR - 6 bandas) e infravermelho termal (TIR - 5 bandas). Cada um desses conjuntos de bandas contou com resolução espacial específica, variando de 15 m no VNIR, 30 m no SWIR e 90 m no TIR. Além disso, uma das bandas

do visível (banda 3) foi duplicada e configurada com uma visada fora do nadir e em direção contrária à do deslocamento do satélite, de modo a proporcionar uma diferença de paralaxe e, consequentemente, permitir a obtenção de imagens estereoscópicas e modelos digitais de superfície.

Algumas das bandas espectrais do ASTER, em particular as bandas do SWIR, foram projetadas especificamente para cobrir intervalos de comprimento de onda estratégicos para a identificação de feições espectrais relacionadas a minerais de alteração hidrotermal que, por sua vez, se associam a concentrações de minerais metálicos, notadamente ouro e cobre (CRÓSTA et al., 2003; ROWAN et al., 2003; YAMAGUCHI; NAITO, 2003; CARRINO et al., 2014). Dentre os vários minerais que podem ser identificados utilizando essa capacidade do ASTER estão a hematita/goethita, caolinita, ilita, alunita, pirofilita, calcita, dolomita e quartzo.

O ASTER não teve continuidade e começou a apresentar falhas na aquisição de imagens, principalmente nas bandas do SWIR, a partir de abril de 2007. Contudo, todo o acervo de imagens coletadas durante os oito anos em que o sensor operou normalmente encontra-se disponibilizado de forma aberta, podendo ser utilizados os mesmos aplicativos do USGS já mencionados no caso das imagens Landsat (*EarthExplorer* e *Glovis*). A partir de 1º de abril de 2016, as agências do Japão e dos Estados Unidos responsáveis pelo ASTER anunciaram que os dados desse sensor passariam a ser distribuídos de forma aberta e sem custos.

WorldView-3

A partir do início da década de 2000, e com a entrada de empresas comerciais no campo do SR orbital, começaram a surgir os primeiros sensores de alta resolução espacial. Quase todos foram configurados com dois sistemas imageadores, sendo um deles tipicamente com 4 bandas multiespectrais cobrindo as regiões do visível e infravermelho próximo com uma resolução espacial entre 3 e 1 m, e o segundo composto por uma única banda pancromática, com resolução espacial abaixo de 1 m. O primeiro desses sensores a entrar em operação foi o Ikonos (2000), seguido do QuickBird (2001), WorldView-1 (2007), GeoEye-1 (2008) e WorldView-2 (2009). Este último tem, no sensor multiespectral, bandas com resolução espacial de 1,85 m e, no sensor pancromático, de 0,46 m. A esses sensores vieram se juntar o do Pleiades-1A (2011) e Pleiades-1B (2012), com bandas multiespectrais com 2 m de resolução espacial e pancromática com 0,5 m.

Contudo, esses sensores de alta resolução espacial, embora com enorme capacidade de visualização de objetos na superfície, capacidade esta comparável à

das fotografias aéreas, pouco têm a oferecer do ponto de vista de caracterização de minerais e rochas. O motivo é que suas bandas espectrais não cobrem as regiões do EEM em que muitos minerais apresentam características diagnósticas. Mesmo assim, imagens desses sensores foram e continuam sendo largamente utilizadas em atividades relacionadas principalmente no monitoramento ambiental de áreas de mineração e seus entornos.

Este cenário começou a mudar em agosto de 2014, com o lançamento do *WorldView-3* (WV-3). Com base no sucesso alcançado pelo ASTER, e percebendo a oportunidade de negócios aberta pelo fim das operações daquele sensor, a empresa norte-americana *DigitalGlobe* projetou um sensor de alta resolução espacial, à semelhança dos anteriormente citados, mas com um diferencial voltado especificamente para a indústria de mineração: um conjunto de bandas multiespectrais posicionadas em regiões estrategicamente selecionadas para cobrir feições diagnósticas relacionadas a minerais, a exemplo do ASTER. O resultado foi o WV-3, com oito bandas espectrais distribuídas na região do SWIR, entre 1,195 e 2,365 μm , com resolução espacial de 3,7 m, além de outras 8 bandas nas regiões do visível e infravermelho próximo com resolução espacial de 1,24 m e uma banda pancromática com resolução de 0,31 m.

Por ter entrado em operação há relativamente pouco tempo, ainda não há informações disponíveis sobre o impacto desse novo “super-sensor”, que combina alta resolução espacial e uma resolução espectral especificamente projetada para cobrir as principais feições espectrais diagnósticas de determinados minerais, nas atividades de exploração mineral. Mas um estudo de simulação desenvolvido por Kruse e Perry (2013) mostrou resultados muito significativos e interessantes no mapeamento de minerais de alteração hidrotermal na área de Cuprite, no Estado de Nevada (EUA).

Hyperion

O Hyperion foi o primeiro sensor hiperspectral a operar em nível orbital. Lançado em novembro de 2000 a bordo do satélite *Earth Observing-1* (EO-1), ele operou durante alguns anos adquirindo imagens de várias regiões do planeta em faixas relativamente estreitas, de 7,5 km de largura por 100 km de extensão, por meio de 220 bandas espectrais entre 0,400 e 2,500 μm e com resolução espacial de 30 m.

A grande vantagem de sensores hiperspectrais em relação aos multiespectrais é a sua destacada capacidade de identificar e analisar a composição químico-molecular dos materiais superficiais. Desse modo, a capacidade de identificar com enorme precisão dife-

rentes fases minerais torna esse tipo de sensor uma ferramenta de grande utilidade na exploração mineral, além de várias outras aplicações.

O Hyperion representou uma plataforma de testes para a tecnologia hiperespectral a partir de satélite e foi utilizado, com relativo sucesso, em um grande número de projetos de pesquisa em todo o mundo, inclusive alguns no Brasil.

Por utilizar tecnologias de meados da década de 1990, o Hyperion apresentou alguns problemas técnicos durante sua operação, como por exemplo uma relação sinal/ruído relativamente baixa, que dificultava a análise quantitativa de seus dados com a necessária precisão. Contudo, as tecnologias atualmente disponíveis permitem a superação de boa parte desses problemas, acreditando-se que a nova geração de sensores hiperespectrais atualmente em desenvolvimento para operar a partir de satélites fornecerá melhores resultados. Dentre os sensores desse tipo em desenvolvimento, destacam-se o EnMAP, da Alemanha, e o HysPIRI, dos Estados Unidos, ambos previstos para entrarem em operação entre 2018 e 2020.

Radares Imageadores Orbitais

Os radares imageadores (SAR) vêm sendo utilizados desde a década de 1960 a partir de aviões, e da década de 1970 a partir de satélites. É possível medir a distância sensor/alvo pelo registro do tempo entre a emissão das ondas eletromagnéticas e a recepção do sinal retroespalhado da superfície. Variações na distância medidas em diferentes aquisições permitem a detecção de deslocamentos na superfície, com precisão milimétrica, sendo este o princípio da tecnologia denominada Interferometria Diferencial (DInSAR), de enorme utilização na detecção de atividades sísmicas, de escorregamentos de terra, monitoramentos de obras de geotecnia, exploração de hidrocarbonetos e estabilidade de taludes em mineração (PARADELLA et al., 2012). Assim, pode-se dizer que o uso combinado desses dois tipos de tecnologias de SR, em duas regiões distintas do EEM, fornece informações complementares sobre os materiais e fenômenos presentes na superfície da Terra.

Satélites com sensores SAR mais comuns utilizam comprimento de onda nas bandas X (3 cm), C (5 cm) ou L (23 cm). O primeiro SAR orbital foi o SEASAT em 1978, sendo seguido pelo lançamento do ERS-1 em 1991. Os principais sistemas em uso atualmente são: o alemão TerraSAR-X/TanDEM-X (banda X, dois satélites), o italiano Cosmo-Skymed (banda X, quatro satélites), o europeu Sentinel-1 (banda C, um satélite), o canadense RADARSAT-2 (banda C, um satélite) e o japonês ALOS/PALSAR-2 (banda L, um satélite).

As imagens SAR fornecem boas informações sobre a textura dos terrenos, tendo sido usadas rotineiramente para extrair informações geológicas de interesse à exploração mineral, notadamente no tocante às estruturas geológicas (falhas, fraturas, *fabrics* tectônicas e/ou metamórfico, etc) em áreas tropicais em que a presença de vegetação densa dificulta o uso de outros tipos de sensores (PARADELLA et al., 1997). Um exemplo desse uso convencional de imagens SAR para mapeamento geológico é o Projeto RADAMBRASIL, que produziu, nas décadas de 1970 e 1980, mapas geológicos de todo o território brasileiro baseados na interpretação de mosaicos de radar na banda X.

Contudo, os sistemas orbitais SAR modernos, como os acima citados, possuem características tecnológicas avançadas que permitem outras aplicações mais sofisticadas além da interpretação visual de imagens. A evolução da tecnologia tem consolidado três campos de aplicações bem específicos: a radargrametria, a interferometria e a polarimetria. Os dois primeiros já atingiram um estágio de maturidade, com aplicações operacionais em exploração mineral, seja na geração de modelos digitais de superfície pela radargrametria e interferometria, seja na detecção de deslocamentos do terreno (DInSAR).

Sensores remotos aeroportados

O uso de sensores aeroportados no Brasil é ainda relativamente restrito, em função principalmente dos altos custos envolvidos e à pouca disponibilidade de equipamentos desse tipo no país. Mas existem alguns exemplos e iniciativas que merecem ser citados, envolvendo o uso de tecnologias avançadas de SR a partir de sensores operando a bordo de aeronaves, voltadas para aplicações em exploração mineral e atividades de apoio à mesma.

O sensor hiperespectral ProSpecTIR® VS, da empresa norte-americana SpecTIR, é um dos mais avançados disponíveis em nível mundial, contando com cerca de 350 bandas espectrais que adquirem imagens da superfície no intervalo entre 0,400 e 2,500 μm . Ele apresenta uma ótima relação sinal/ruído e suas imagens permitem análises qualitativas e quantitativas da composição química-molecular dos materiais superficiais, ainda que estes ocorram na forma de misturas no interior de cada pixel da imagem. Suas aplicações potenciais em atividades de exploração mineral no Brasil envolvem não somente a identificação e quantificação da ocorrência de fases minerais em rochas e solos associados a potenciais áreas mineralizadas, mas também análises de anomalias geobotânicas associadas a concentrações minerais no solo e subsolo, entre várias outras aplicações em

geologia e exploração. A comercialização de projetos de aerolevantamentos no Brasil utilizando o ProSpecTIR® VS é feita pela empresa FotoTerra, de São Paulo, que inclui, entre seus clientes, empresas nas áreas de mineração e de hidrocarbonetos.

Outro exemplo de tecnologia avançada de SR por radar disponível no país é o sistema OrbiSAR da empresa BRADAR (Embraer Defesa & Segurança). Trata-se de uma tecnologia única no mundo, originalmente desenvolvida no Brasil pela empresa OrbiSat, que foi posteriormente adquirida pela Embraer. Essa tecnologia se baseia no uso conjunto de dois sistemas SAR, um operando na banda X e o outro na banda P, que permite a geração de mapas com alta precisão altimétrica em áreas de florestas tropicais. Isto ocorre pelo fato da radiação referente à banda X interagir com as copas das árvores enquanto a da banda P, com maior penetração devido ao maior comprimento de onda, interage com a superfície do terreno. A empresa desenvolveu um método pelo qual o sistema SAR da banda X é usado para gerar um modelo digital de superfície por meio da tecnologia DInSAR (interferometria diferencial), que depois é ajustado e transformado em um modelo digital de terreno altamente preciso com o auxílio da banda P. Essa tecnologia tem sido utilizada para gerar mapas topográficos detalhados da região Amazônica e outras regiões brasileiras que não dispõem de cartografia em escala adequada. Não há registros de sua aplicação em geobotânica, mas o potencial é alto: são comuns variações na biomassa e na estrutura de florestas sobre mineralizações e esse método as identifica. Seu uso conjunto com SR óptico em florestas fechadas tem uma notável perspectiva.

USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NO BRASIL

O SR apresentou um extraordinário desenvolvimento nas últimas décadas, facilitado inclusive pelo uso extensivo da internet. Ferramentas simples de acesso a imagens de qualquer ponto do planeta, tais como o *Google Earth*, passaram a ser usadas não apenas por especialistas, mas pelo público em geral, popularizando o uso de imagens orbitais.

Contudo, no Brasil, o uso profissional do SR em Geologia, e em exploração mineral em particular, não vem seguindo no mesmo ritmo essa tendência internacional, apesar de seu excepcional potencial de aplicabilidade em nosso país, em função de suas características de grandes dimensões e da dificuldade de acesso a muitas regiões. Uma comparação entre o uso do SR especificamente em exploração mineral no Brasil e na Austrália, países de características similares

em termos de suas dimensões e respectivos potenciais minerais, evidencia o grande contraste existente entre o estado-da-arte da tecnologia e a suas aplicações em situações operacionais pelas empresas e em órgãos de governo.

Os dois países contam com considerável massa crítica nessa área em suas instituições acadêmicas, e também em alguns órgãos governamentais. Na Austrália, além das universidades, há diversas instituições governamentais que dão apoio científico e tecnológico à indústria mineral, como o CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*) e o *Geoscience Australia*, além de grupos atuantes em diversos de seus serviços geológicos regionais. Além disso, várias empresas do setor mineral australiano mantêm equipes de especialistas nessa área, complementando o trabalho das instituições governamentais. Por último, há na Austrália um setor extremamente ativo de empresas de base tecnológica, que provêm serviços especializados em tecnologias de ponta em SR aplicado à exploração mineral, notadamente na área de SR espectral. Desse modo, constata-se naquele país a existência de um ecossistema científico/tecnológico/industrial de longo prazo muito bem articulado, que vêm atuando com notável êxito, atendendo não apenas ao mercado local, mas também desenvolvendo e exportando tecnologias e serviços para o mundo todo na área de SR aplicado à geologia e à exploração mineral, incluindo hidrocarbonetos.

No Brasil, existem grupos de pesquisa e de formação de profissionais e de pesquisadores ligados a universidades públicas em praticamente todas as regiões do país, além do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), instituição pioneira nessa área e histórica formadora de recursos humanos nos níveis de mestrado e doutorado. Já na esfera de órgãos de governo, a CPRM/Serviço Geológico do Brasil, após várias tentativas mais ou menos exitosas ao longo de vários anos, deixou em 2015 de ter uma Divisão de Sensoriamento Remoto em seu organograma. Mesmo durante o período em que contou com essa Divisão, a CPRM não logrou consolidar uma política nacionalmente articulada de fomento à aplicação de tecnologias de ponta de SR na exploração mineral, a exemplo do que fez com sua Divisão de Geofísica. Salvo iniciativas isoladas, geralmente por parte de indivíduos, não há outra instituição governamental atuando nessa área específica do SR que mereça destaque.

Já no setor da indústria, a atuação da Petrobrás, notadamente por meio do seu Centro de Pesquisas (CENPES), vem se destacando no desenvolvimento de tecnologias de uso do SR por radar na detecção de exsudações de hidrocarbonetos, tanto nas áreas *off-shore*,

como também em bacias terrestres, tendo passado a exportar serviços especializados nessa área para outros países. A Petrobrás tem também utilizado e avaliado tecnologias de SR hiperespectral, a partir de imagens do sensor aeroportado Pro-SpecTIR-VS. A Vale também vem se destacando no que tange à análise de tecnologias avançadas de SR, tanto na área de geologia espectral, por meio de experimentos realizados com o sensor aeroportado Pro-SpecTIR-VS e com o equipamento australiano de *core-logging* Corescan, utilizado para caracterização espectral de testemunhos de sondagem de minério de ferro, como também com experimentos utilizando a interferometria de deformação utilizando radar (DInSAR), aplicada ao monitoramento de deformações em áreas de exploração de minérios de ferro e de manganês em Carajás (ver item seguinte). No que diz respeito à caracterização do minério de ferro (*core-logging*), informações disponíveis dão conta que, apesar dos resultados positivos obtidos na fase de testes, essa tecnologia não deve ser implantada de modo operacional em curto prazo, devido aos cortes nos investimentos por que passa atualmente a Vale. A empresa continua, porém, atuando em experimentos-piloto, em colaboração com instituições acadêmicas.

Além das empresas citadas, há outras do setor mineral que empregam o SR como técnica exploratória de maneira ocasional, geralmente por meio de contratos ou convênios com instituições acadêmicas e/ou empresas de consultoria, mas sem manter equipes especializadas e dedicadas ao tema. Quanto a estas últimas, e diferentemente de outros países de grande potencial mineral, como Austrália e Canadá, há no Brasil pouquíssimas empresas com capacitação tecnológica plena para atuar em consultoria ou prestação de serviços utilizando tecnologias avançadas de SR. Existe, portanto, necessidade em muitos casos de se recorrer a empresas internacionais para essa finalidade.

O sensoriamento remoto com radar na exploração mineral e de hidrocarbonetos

Em função das características fisiográficas intrínsecas da Amazônia, que corresponde a uma parte expressiva do território nacional e é uma importante fronteira para a exploração mineral e de hidrocarbonetos, enfoca-se nesta seção o uso específico do radar.

A maior parte da Amazônia exibe cobertura vegetal densa e relevo controlado por estruturas geológicas e características erosivas do substrato, o que favorece o uso de radar, sensor que maximiza o realce topográfico. Deste modo, o radar tem sido a opção adequada para levantamentos geológicos na Amazônia desde o início da década de 1970, com os levantamentos

aeroportados do RADAMBrasil e, posteriormente, as missões posteriores do SAREX-92 (INPE) e da Intera (Docegeo) em 1992, ambas em parceria com instituições canadenses. Esse impulso inicial no uso de sensores aeroportados foi ampliado com o advento dos sensores SAR orbitais (ERS-1 e 2, JERS-1, RADAR-SAT-1). A grande disponibilidade de imagens com diferentes características (frequência, polarização, etc.), evidenciou a necessidade de capacitação no país, o que levou ao programa GlobeSAR-2 em meados da década de 1990, com a participação do INPE, universidades, empresas e agências governamentais, por meio de cursos de capacitação, treinamentos e pesquisa com imagens RADARSAT-1 e aplicações em mapeamento geológico, pesquisa mineral e petrolífera (PARADELLA et al., 1997).

Posteriormente, por iniciativa da ADIMB (Agência para o Desenvolvimento da Indústria Mineral Brasileira), e com o apoio do PADCT III/MCTI, foi desenvolvido o projeto “Exmin-Amazônia” (Plataforma para o Desenvolvimento Metodológico em Exploração Mineral), no qual foi priorizado o uso conjunto de SR por radar e de aerogeofísica em levantamentos geológicos básicos na Amazônia (ADIMB, 2000).

Esse conjunto de iniciativas propiciou o desenvolvimento de uma grande experiência no país com relação à adaptação de técnicas de fotogeologia (mono e estereoscopia) e de processamento digital de imagens às características das imagens de radar (imagens de amplitude). O foco desses projetos foi nos estudos estruturais, tectônicos também na fusão de dados (SAR-ópticos, aerogeofísica) voltados ao mapeamento geológico e à pesquisa mineral. Neste sentido, merece também menção a experiência adquirida pela Petrobras na análise de dados de radar como suporte à exploração petrolífera nas bacias do rio Amazonas-Solimões, que remonta à década de 1980, com a utilização de mosaicos do RADAMBrasil e interpretações morfoestruturais realizadas na década seguinte empregando mosaicos do JERS-1.

Se analisada de modo generalizado, a tendência dessas aplicações vem dando ênfase à extração qualitativa da informação, restrita a imagens da amplitude do sinal retroespalhado. Todavia, imagens SAR representando a polarização e a fase são também atributos importantes de informação dos alvos geológicos, que requerem para sua utilização a compreensão dos mecanismos complexos de interação micro-ondas/alvo e sistemas mais avançados de radar (interferométricos, polarimétricos). A disponibilidade deste tipo de imagens marca a fase atual de desenvolvimento tecnológico, com o emprego crescente de abordagens quantitativas.

No contexto de incorporação de radar no segmento industrial duas abordagens merecem destaque. Na Petrobras, deve ser mencionado o uso operacional de diferentes sistemas comerciais (RADARSAT-2, TerraSAR-X, Cosmo-Skymed, etc.) na detecção de exsudações de hidrocarbonetos na superfície do mar para suporte à exploração petrolífera de águas profundas e no monitoramento ambiental de áreas oceânicas e costeiras na detecção de diferentes tipos de poluição marinha ligados à exploração petrolífera (BENTZ et al., 2005). No caso da Vale S.A., resultados encorajadores foram recentemente obtidos com a interferometria de deformação (DInSAR) aplicada ao monitoramento de deformações em taludes de cava, pilhas de estéril, barragens de rejeitos e demais estruturas que compõem o complexo minerador das minas a céu aberto de ferro e de manganês de Carajás. As vantagens da DInSAR sobre técnicas de monitoramento de campo (prismas, radar de campo) são que as medidas obtidas são de elevada acurácia (escalas milimétricas de deslocamentos), cobrindo uma grande área (visão sinóptica), com grande densidade de amostragem e sem necessidade de instrumentação de campo. A Vale cogita atualmente a incorporação dessa tecnologia como ferramenta preditiva no monitoramento contínuo de suas áreas de operação no país (VASCONCELOS, 2015).

Estudos de caso no Brasil

São apresentados a seguir quatro estudos de caso desenvolvidos no Brasil, cada um deles enfocando uma aplicação distinta de técnicas de SR em atividades de exploração e de exploração de recursos minerais. Na seleção desses casos, foi considerada também a diversidade em termos das condições fisiográficas e climáticas das áreas onde foram desenvolvidos.

Geobotânica por Fenologia em Sequência do Evento Ígneo Paleoproterozoico Uatumã, Pará¹

De acordo com Fernandes et al. (2011 e referências aos trabalhos do grupo de Caetano Juliani aí citadas), na região de São Félix do Xingu (PA) há rochas vulcânicas, subvulcânicas e plutônicas associadas ao evento ígneo Uatumã, do paleoproterozoico. Às rochas vulcânicas da formação basal Sobreiro (1,88Ga) seguem-se as da formação Santa Rosa (1,87 Ga), que compreende uma complexa variedade de rochas vulcânicas, subvulcânicas e plutônicas, incluindo fluxos de lava e diques de riolito, ignimbritos, tufos e brechas, diques e stocks de pórfiros graníticos e granitoides equigranulares.

Foi aí aplicada a menos usual das formas de geobotânica por SR, aquela que considera a variabilidade fenológica associada à geologia. Ainda que rara na literatura, a geobotânica fenológica foi indiretamente citada no século XVI por Georgius Agrícola, considerado o pai da Geologia enquanto ciência, que afirmou haver presença de senescência precoce e rebrota tardia da vegetação sobre depósitos minerais. A fenologia da vegetação é o estudo do ciclo da vida das plantas, que é influenciada pelas variações climáticas sazonais e por características físicas e biológicas do ambiente. A fenologia da superfície terrestre (*Land Surface Phenology* – LSP) é definida como o padrão sazonal de variação espectral em superfícies vegetadas observado a partir de dados multitemporais de SR.

O método utilizado pode ser entendido conceitualmente como uma fusão do método sistêmico (ALMEIDA et al., 2009 e referências aí citadas) com a LSP clássica. Enquanto esta última utiliza séries temporais de imagens com índices de vegetação, o método sistêmico procura abordar a cobertura vegetal como um sistema realçando a resposta espectral de compostos foliares, os quais tem interdependência. O método aqui utilizado considera a variação espectral das coberturas vegetais no visível (pigmentos foliares), infravermelho próximo (área foliar, estrutura do dossel) e infravermelho ondas curtas (água foliar e compostos bioquímicos) em dois momentos climáticos.

No caso específico deste capítulo foram utilizadas imagens Landsat/TM (órbita 225, ponto 065) de 09/5/1987 e de 15/7/1984, com a área de pesquisa imediatamente a oeste da cidade de São Félix do Xingu, sul do Estado do Pará. Estas duas imagens conciliavam a ausência de nuvens com período em que a floresta local estava preservada e em momentos fenológicos distintos. Foi aplicada análise por principais componentes (APC) (matriz de correlação) nos pares de datas das bandas TM2, 3, 4, 5 e 7. A informação não redundante é concentrada na PC2, que assim informará da variação espectral essencialmente associada ao dossel florestal. Para concentrar e hierarquizar a informação da variabilidade espectral uma nova APC foi aplicada sobre as cinco PCs2, seguindo-se uma filtragem passabaixas de grandes dimensões para realçar tendências.

A imagem final (Figura 2) evidencia uma notável variabilidade fenológica e sua comparação com o mapa geológico (Figura 2) tem excelente correlação com as unidades vulcânicas das formações Sobreiro (orogênica e cálcio-alcalina) e Santa Rosa (alcalina do tipo A) e com suas variações faciológicas. Essas unidades apresentam zonas de alterações hidrotermais com indícios de mineralizações distintas, destacando-se

1 Estudo de caso desenvolvido por Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida (Instituto de Geociências – USP)

as epitermais *high-* e *low-sulfidation* com Au, Ag e metais de base na Formação Sobreiro e epitermais *low-sulfidation* de metais preciosos na Formação Santa Rosa, o que demonstra grande potencial desta técnica na seleção de unidades em trabalhos de exploração mineral. A técnica permitiu ainda a identificação de stocks subvulcânicos de pórfiros o tipo A, aos quais podem se associar mineralizações de estanho, bem como de ouro do tipo *intrusion-related gold systems*. Considerando o potencial mineral destas formações indica-se haver grande potencial de aplicabilidade do método em fases iniciais de programas de exploração mineral em regiões recobertas por florestas tropicais.

Monitoramento de Estabilidade das Minas de Ferro de Carajás com Imagens do Satélite TerraSAR-X por meio da Interferometria Diferencial (DInSAR)²

A Província Mineral de Carajás/PA engloba as maiores reservas do planeta em minério de ferro, com exploração realizada através de minas a céu aberto. Atualmente, as atividades da mineradora Vale S.A. em Carajás

- 2 Estudo de caso desenvolvido por Waldir R. Paradella^a, José C. Mura^a, Fabio F. Gama^a, Athos R. Santos^a, Guilherme G. Silva^a, Mauricio Galo^b, Paulo O. Camargo^b, Arnaldo Q. Silva^c (^a Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, ^b Faculdade de Ciência e Tecnologia - UNESP, ^c Instituto de Geociências - UFPA).

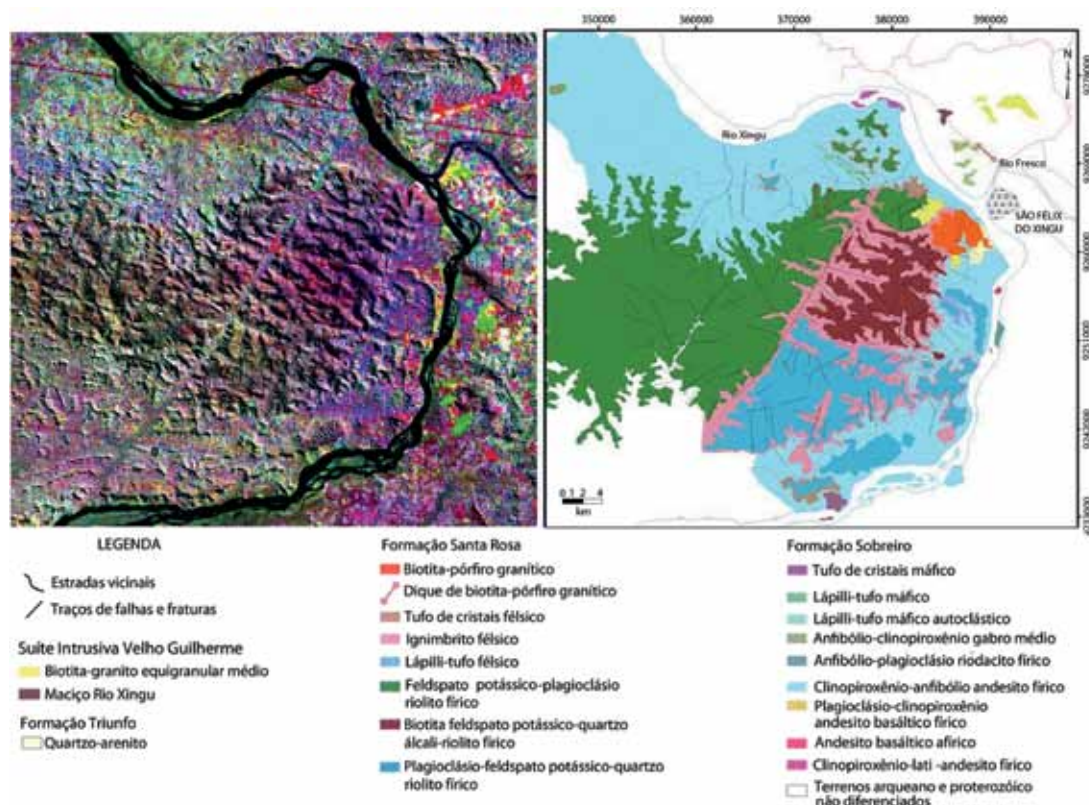


Figura 2 PCs 435 em RGB de imagem TM Landsat composta (processamento descrito no texto) e mapa geológico das formações Sobreiro e Santa Rosa (evento ígneo Uatumã do Paleoproterozoico) na região de São Félix do Araguaia (Fonte: Elaborada por Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida, a partir de figuras de Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida - esquerda; FERNANDES et al., 2011 - direita).

estão concentradas nos depósitos de N4 (minas N4E e N4W) e N5 (minas N5W e N5E). Instabilidades podem ser esperadas na região devido às escavações profundas realizadas em produtos rochosos de baixa qualidade geomecânica, ao uso de explosivos e intensa precipitação. É importante notar que pequenos movimentos em taludes podem ser precursores de rupturas maiores. Assim, dispor de informações sobre estabilidade de taludes é um item importante na indústria de mineração por obrigações legais (normas reguladoras de lavra), de segurança (vidas e equipamentos), planejamento de produção, etc.

Dois abordagens da Interferometria Diferencial com imagens SAR (DInSAR) têm sido recentemente utilizadas na estimativa precisa do deslocamento de superfície em mineração: a PSI (*persistent scatterer interferometry*), que utiliza a informação da fase interferométrica de pontos (pixels) com propriedades de espalhamento, que variam pouco com o tempo e geometria de visada, e a DTS (DInSAR *Time-Series*), que explora a informação de fase de imagens complexas de radar, adquiridas em diferentes épocas (pares interferométricos), com amostragem em área. A PSI fornece uma melhor acurácia deformacional que a DTS. A DTS permite, todavia, detectar deformações com taxas mais elevadas, mas ao custo de uma menor resolução espacial.

Através de um conjunto de 33 imagens StriMap do satélite TerraSAR-X (TSX), as duas soluções técnicas foram testadas em Carajás, em um projeto de pesquisa com apoio da Vale S.A. e FAPESP (proc. FAPESP 2010/51267-9). Resultados valiosos foram obtidos na descrição de deslocamentos com uso das duas abordagens (MURA et al., 2014; PARADELLA et al., 2015) e exemplificados na Figura 3.

Espera-se que a tecnologia de interferometria diferencial SAR possa ser inserida como uma alternativa inovadora e complementar aos métodos operacionais de medições geotécnicas de campo (uso de estação total/prismas refletivos e radar de campo), na detecção e monitoramento de deslocamentos que possam resultar em instabilidades das áreas de atuação da Mineradora.

Detecção de Minérios de Fosfatos em Imagens do Sensor ASTER³

O Brasil possui cerca de 80% das suas jazidas fosfáticas provenientes de rochas de origem ígnea, com presença acentuada de rochas carbonatíticas de baixo teor em

P₂O₅. As reservas dos depósitos ígneos somados aos de origem sedimentar atendem apenas 40% da demanda brasileira por fertilizantes fosfáticos. O complexo de Catalão I, um domo intrusivo alcalino localizado na fronteira do Estado de Goiás com o Triângulo Mineiro, formado por rochas piroxeníticas cortadas por numerosos veios e *plugs* carbonatíticos e foscoritos apatíticos, acumula um reserva lavrável de 196.10⁶ toneladas com teor médio de 8,5% P₂O₅. No interior da intrusão afloram rochas, principalmente dos tipos carbonatítica dolomítica, flogopitito com foscoritos, foscorito com monazita e foscorito carbonatíticos, que encerram as mineralizações mais importantes. Estas rochas foram o foco da presente pesquisa, tendo como perspectiva uma avaliação do uso das imagens do sensor ASTER para a detecção de minérios fosfáticos.

O trabalho consistiu em estabelecer uma relação entre os espectros de reflectância de campo e de bibliotecas espectrais de minerais, com as imagens ASTER dos módulos do visível-infravermelho próximo (3 bandas), infravermelho de ondas curtas (6 bandas) e do termal (5 bandas), recorrendo-se à técnica computacional SFF (*Spectral Feature Fitting*) de classificação espectral de imagens.

Os resultados da classificação das imagens ASTER (Figura 4) mostraram alta concordância das áreas classificadas nas imagens com as áreas de mineralizações, além de indicar a presença de várias outras áreas potenciais. Com base nas associações minerais obtidas por difratometria de raios-X em 15 amostras coletadas em campo e seus respectivos espectros de reflectância, os seguintes resultados foram obtidos com os três módulos das imagens ASTER. Com as imagens do módulo do visível-infravermelho (0,52–0,86µm) foram classificadas áreas com a presença de monazita, que é um mineral com fosfato associado em sua composição a terras raras (Sm, Nd). Uma amostra de foscorito alterado coletada em campo mostrou em difratograma de raios-X a presença de quartzo+goethita+monazita, com exibição de um espectro com forte absorção em 0,81µm (banda 3N ASTER), devida às transições eletrônicas de íons trivalente de elementos de terras raras. Na faixa do infravermelho de ondas curtas os espectros das amostras coletadas distinguiram quatro grupos minerais: grupo 1 foscorito apatítico dolomítico com absorções em 1,434µm, 1,908µm, 2,0µm, 2,32µm e 2,38µm; grupo 2 foscorito hidroxiapatítico impuro com absorções em 1,434µm, 1,935µm, 2,225µm e 2,440µm; grupo 3 foscorito flogopitítico dolomítico com absorções em 1,292µm, 1,394µm, 1,915µm, e 2,325µm; grupo 4 foscorito carbonatítico com absorções em 1,384µm, 1,862µm, 1,928µm, 2,136µm,

3 Estudo de caso desenvolvido por Paulo Roberto Meneses e Gustavo Macedo de Mello Baptista (Instituto de Geociências – Universidade de Brasília).

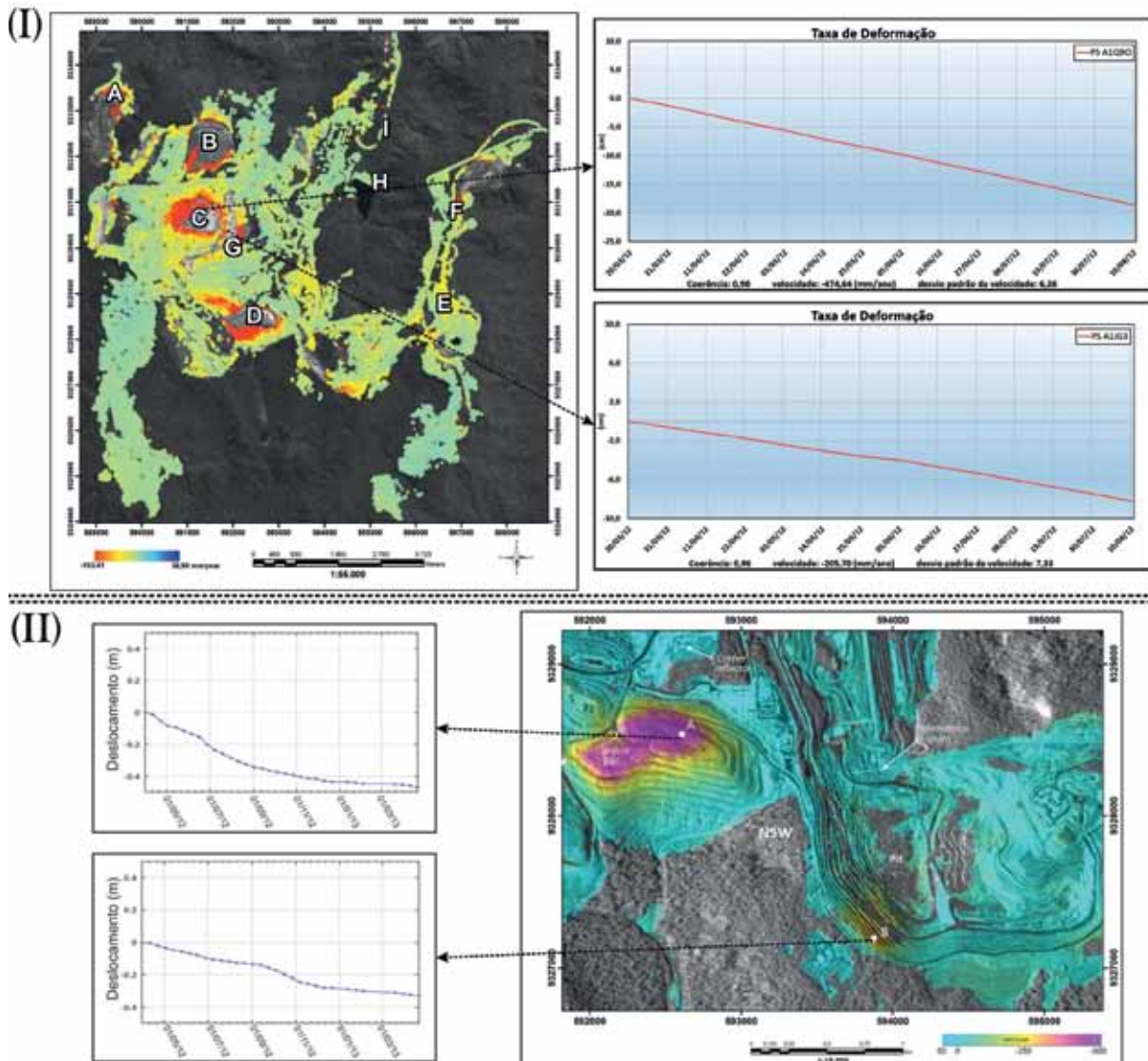


Figura 3 (I) Distribuição espacial de pontos de medidas obtidos pela abordagem PSI (modelagem SqueeSAR™) para as minas de ferro do Complexo de Serra Norte usando 14 imagens TSX (23/Março-10/Agosto, 2012), visualizada pela taxa de velocidade de deformação (mm/ano). Foram identificados 123.955 pontos, com densidade média de 800 pontos/km². As cores na barra de deformação são indicativas de sentido de movimentação: vermelho = afastamento do SAR ao longo de sua linha de visada (provavelmente subsidência), azul = aproximação do SAR (provavelmente alcantamento). A maior parte do complexo mineral não apresentou deslocamentos durante o período monitorado (regiões verde-azuladas). Áreas com deformação (regiões amarelo-avermelhadas) foram detectadas para pilhas de material estéril (letras A, B, C, D e F) e taludes de corte (G). Exemplos de perfis de deformação/tempo para recalque em pilha (superior) e talude de corte (inferior); (II) Resultados da abordagem DST (software Gamma RS) para a mina de N5W e a pilha de estéril (PDE) SIV, mostrando velocidades de deformação (mm/ano) com uso de 33 imagens TSX (período de 20/Março, 2012 a 20/Abril, 2013). Os perfis de deformação/tempo correspondem a pontos amostrados de deformações em taludes de aterro da PDE (superior) e de talude de cava (inferior) (Fonte: Elaborada por Waldir Renato Paradelia, José C. Mura, Fabio F. Gama, Athos R. Santos, Guilherme G. Silva, Mauricio Galo, Paulo O. Camargo e Arnaldo Q. Silva).

2,264µm, 2,32µm, e 2,456µm. As classificações com as imagens ASTER do módulo infravermelho de ondas curtas (1,60µm-2,430µm) mostraram, para esses quatro grupos minerais, alta semelhança das áreas classificadas na região da mina, além de indicarem a presença coincidente de dois outros alvos fora dos limites da mesma. Com as imagens ASTER do módulo termal (8,125µm – 11,95µm) recorreu-se ao espectro da apatita da biblioteca espectral da Arizona State University, tomado com *endmember* para a classificação SFF, e que tem no comprimento de onda de 9,1 µm a feição de emissividade diagnóstica da apatita. Notou-se uma proximidade bem grande das áreas classificadas com aquelas obtidas pelas imagens do infravermelho de ondas curtas.

O conjunto dos resultados obtidos indica que as imagens ASTER dos módulos do infravermelho de ondas curtas e do termal mostram boas possibilidades para a detecção de áreas fosfáticas de origem ígneas. Estudos similares usando as imagens ASTER para a detecção de ocorrência de fosfatos de origem sedimentar mostraram, na região das minas de Campos Belo (GO), uma excelente perspectiva para as imagens do módulo termal, em comparação imagens da faixa óptica.

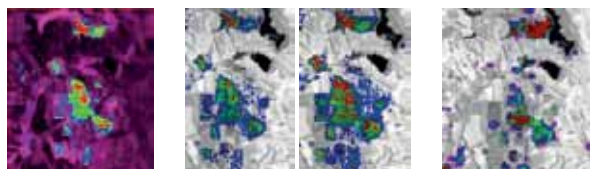


Figura 4A Vis.-infrav. próximo
Figura 4B e C Infravermelho de ondas curtas
Figura 4C Termal

Figura 4 Da esquerda para a direita classificação espectral SFF das imagens ASTER dos minerais monazita; flogopita-dolomita-hidroxiapatita; Apatita-dolomita; apatita (Fonte: Elaborada por Paulo R. Meneses e Gustavo Macedo de M. Baptista).

Caracterização Espectro-mineralógica e Mapeamento de Pegmatitos Graníticos da PPB⁴

A Província Pegmatítica da Borborema – PPB (SCORZA, 1944) é uma das mais importantes e extensas províncias dessa natureza do país. No nordeste brasileiro, destaca-se como uma região favorável ao desenvolvimento de aplicações de SR, considerando a fisiografia regional de clima semi-árido, solos pouco espessos, vegetação escassa, precipitação pluviométrica mal distribuída e longos períodos de estiagem, favorecendo a exposição superficial de muitos pegmatitos. Na PPB estão cadas-

trados centenas de pegmatitos homogêneos (simples, usualmente estéreis) e heterogêneos (JOHNSTON JR., 1945), estes últimos, via de regra, produtores de minerais de Ta-Nb, Sn, Be, Li (Da SILVA et al., 1995; BEURLIN et al., 2014), de minerais industriais e gemas raras, como a Turmalina Paraíba (ROSSMAN et al., 1991), além de variadas fases de minerais raros e exóticos (BEURLIN et al., 2003, 2004).

A mineralogia relativa à cristalização primária, de alteração metassomática-hidrotermal e supergênica, é bastante diversificada e está relacionada com processos de caulinitização, sericitização, turmalinização, lepidolitização, entre outros, incluindo minerais silicatos, sulfetos, carbonatos, óxidos e fosfatos (Da SILVA; DANTAS, 1984; SCHUCKMANN; GOPINATH, 1989). Muitos destes mineirais são portadores de feições de absorção espectral diagnósticas na região do espectro eletromagnético que se estende de 400 nm a 2500 nm.

O pressuposto da pesquisa foi de que a espectroscopia de reflectância e de imageamento podem contribuir para o conhecimento de pegmatitos, a partir da caracterização de ocorrências, natureza das associações mineralógicas e seus relacionamentos (SILVA, 2009). A área de pesquisa está limitada pelas coordenadas 06° 45' 00" e 07° 15' 00" de latitude sul e 36° 20' 00" e 36° 50' 00" de longitude oeste, na região limítrofe dos Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. A área abriga a maioria dos pegmatitos hospedados em muscovita-quartzitos da Formação Equador, do Grupo Seridó, na faixa de dobramentos Seridó - FSe (JARDIM DE SÁ, 1994).

A caracterização mineralógica foi realizada com o espectrorradiômetro portátil *FieldSpec Full Resolution Pro*, da *Analytical Spectral Devices*. Na análise e interpretação das curvas de reflectância espectral foram empregados os aplicativos *The Spectral Geologist/TSG-4 PRO* (CSIRO, 2008), o *SIMIS FS 1.6* (MACKIN, 2002) e o programa *Environment for Visualizing Images* – ENVI (RSI 2008), além do apoio da difração de raios X, petrografia e MEV-EDS, para definir as associações, estabelecer zoneamentos internos e o mapeamento com dados hiperespectrais EO1/Hyperion (SILVA, 2009). Na correção dos dados Hyperion foram utilizados os aplicativos *MMTG A-List* (CSIRO, 2002) e *FLAASH/ENVI* (RSI, 2008).

Com base nas feições diagnósticas de absorção espectral foi caracterizada um suíte de minerais e mistura minerais, compreendendo caulinita e halloysita (1395 nm e 1413 nm devido à presença de OH⁻ e H₂O; 2158 nm e 2201 nm devido à ligação AL-OH), muscovita e illita/sericita (1400 nm e 1900 nm, devido à presença de H₂O e OH⁻; 2180 nm e 2228 nm, 2340 nm e 2430 nm devido

4 Estudo de caso desenvolvido por Sebastião Milton Pinheiro da Silva (Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN).

à ligação Al-OH), paragonita (2180 nm, 2193-2195 nm devido à substituição de K por Na na muscovita, 2340 e 2430 nm devido à ligação AL-OH), clorita/cookeita (1400 nm, 2200 nm, 2167 nm e 2208 nm devido à presença de OH⁻ e AL-OH), lepidolita (1400 nm, 1900 nm devido à ligação OH⁻ e H₂O; 2200 nm, 2350 nm, 2437 nm devido à ligação Al-OH; feições menores em 1330 nm, 2030 nm e 2140 nm, devido ao ion OH⁻) e turmalinas (2200 nm, 2300 nm e 2240-2250 nm devido à ligação B-OH). Os resultados da caracterização espectro-mineralógica possibilitaram estabelecer o zoneamento interno e o mapeamento de zonas de alteração hidrotermal de pegmatito.

mineral, e considerando a capacitação existente em várias instituições acadêmicas e de pesquisa nacionais, o cenário futuro é positivo. Como indicadores disso podem ser citadas a participação, na produção científica internacional, tanto em termos de periódicos como em anais de eventos científicos, de um número expressivo de trabalhos envolvendo aplicações de sucesso, assim como o bom nível de uso do SR em atividades operacionais de exploração por algumas empresas nacionais de grande porte.

Contudo, há ainda obstáculos a serem vencidos em pelo menos duas frentes. O primeiro deles diz respeito à relativa carência de técnicas voltadas à minimização

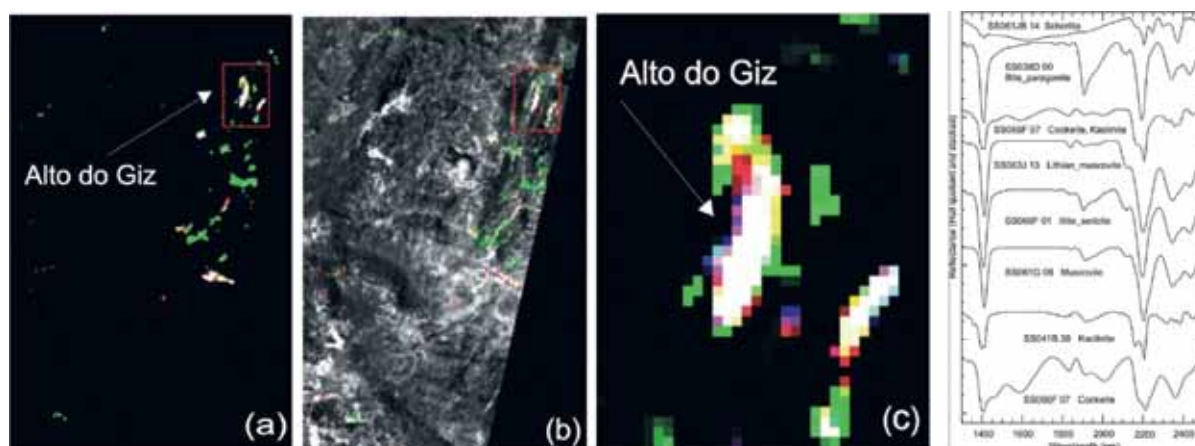


Figura 5 (a) Mapeamento de pegmatitos e muscovita-quartzitos da Formação Equador; (b) Sobreposição do mapeamento com a banda 0,559 μm do sensor Hyperion, (c) Detalhe do zoneamento mineralógico do pegmatito Alto do Giz, mediante a composição colorida Caolinita (R) - Muscovita (G) - Paragonita (B), e (d) Espectros de reflectância de minerais de pegmatitos da PPB no intervalo de feições de absorção espectral diagnósticas de 1,4 μm a 2,5 μm (Fonte: Elaborada por Sebastião Milton Pinheiro da Silva).

Apesar da baixa relação sinal ruído e da resolução espacial reduzida dos dados EO1/Hyperion, frente à dimensão reduzida de muitos pegmatitos, foi possível mapear a distribuição espacial de minerais como muscovita, caolinita e paragonita no pegmatito do Alto do Giz (Figura 5), denotando o alto potencial da espectroscopia de reflectância e de imageamento para estudos de pegmatitos na PPB.

PERSPECTIVAS FUTURAS DO USO DO SENSORIAMENTO REMOTO EM EXPLORAÇÃO MINERAL

Dado o longo histórico do desenvolvimento de pesquisas e aplicações no Brasil de SR em exploração

das dificuldades impostas ao uso do SR pelas condições típicas de regiões tropicais, como a Amazônia, que representa uma fronteira exploratória da maior importância. Nesse sentido, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas enfocando a extração de informações de interesse exploratório em condições de densas coberturas vegetais e espessas coberturas de manto intempérico, quer seja a partir apenas de imagens de SR, ou das mesmas em combinação com outros tipos de dados exploratórios, como por exemplo geofísicos e geoquímicos. O segundo obstáculo é a disseminação relativamente reduzida das técnicas de SR em muitas empresas do setor mineral, geralmente pela ausência de profissionais adequadamente treinados no uso dessas técnicas. Atualmente, o setor acadêmico tem plenas condições de formar profissionais com

esse perfil, mas talvez haja dificuldade por parte das empresas em incorporá-los aos seus setores de exploração, a exemplo do que já é feito com os geofísicos. Ainda com relação a este ponto, é necessário ter no país empresas especializadas em prestar trabalhos de consultoria/assessoria no emprego de técnicas avançadas de SR na exploração mineral, a exemplo do que ocorre em países com condições geológicas e potencial mineral semelhantes ao do Brasil, como é o caso da Austrália e do Canadá.

A evolução tecnológica do SR exploratório também aponta para algumas tendências futuras. No campo da geologia espectral, devem surgir nos próximos anos um ou mais sensores do tipo hiperespectral, operando a partir de satélites e, portanto, gerando imagens com cobertura global. Embora as tecnologias já sejam disponíveis, os elevados investimentos necessários não permitiram ainda que um projeto dessa natureza pudesse tornar-se operacional. Há previsões para o lançamento de sensores desse tipo para o período 2018-2020. Até lá, o uso de SR hiperespectral na exploração mineral terá de ser suprido por sensores aeroportados, como já vem acontecendo no Brasil com o ProSpecTIR VS.

Há, entretanto, uma forte tendência no uso crescente de sensores operando a partir de veículos aéreos não-tripulados (VANTs) que, pelo menor porte e baixo custo de operação, tendem a tornar mais econômicos os levantamentos de SR a partir de aeronaves. Para poderem ser empregados a partir de VANTs, sensores remotos necessitam passar por processos de miniaturização, algo que já vem ocorrendo. Observa-se que isso diz respeito a sensores que baseados em diodos semi-condutores, operando nas faixas do EEM que vão do visível até as várias sub-regiões do infravermelho, e incluem sensores de alta resolução espectral (hiperespectrais). Quanto aos sensores de radar, em função dos elevados peso e volume, além da dimensão física da antena SAR, não há ainda expectativa que venham operar a partir de VANTs no futuro próximo.

REFERÊNCIAS

- ABRAMS, M. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's EOS-AM1 platform. *International Journal of Remote Sensing*, Oxford, v. 21, p. 847–861, 2000.
- ADIMB. *Projeto Exmin-Amazônia* (Desenvolvimento Metodológico em Exploração Mineral para a Amazônia). Brasília: Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira, 40 p. 2000.
- ALMEIDA, T.I.R.; SOUZA FILHO, C.R.; JULIANI, C.; BRANCO, F.C. Application of Remote Sensing to Geobotany to Detect Hydrothermal Alteration Facies in Epithermal High Sulfidation Gold Deposits in the Amazon Region. In: BEDELL, R.; CRÓSTA, A.P.; GRUNSKY, E. (Eds.). *Remote Sensing and Spectral Geology - Reviews in Economic Geology*. Littleton, CO, USA: Society of Economic Geologists (SEG), v. 16, p. 135–142. 2009.
- ASD. FieldSpec FR. *Analytical Spectral Devices: User Guide*, Boulder, 98 p. 1994.
- BEDELL, R.; CRÓSTA, A.P.; GRUNSKY, E. (Eds.). *Remote Sensing and Spectral Geology - Reviews in Economic Geology*. Littleton, CO, USA: Society of Economic Geologists (SEG), v. 16, 266 p. 2009.
- BENTZ M. C.; POLITANO A.T.; GENOVEZ P. et al. Monitoramento Ambiental de Áreas Costeiras e Oceânicas com Múltiplos Sensores Orbitais. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, v. 57, n. 1, p. 43–47, 2005.
- BEURLIN, H.; THOMAS R.; BARRETO, S. B.; DA SILVA, M.R.R. Nova ocorrência de ferrowodginita em associação com cassiterita, strüverita e tapiolita na Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil. *Estudos Geológicos*, Recife, v. 13, n. 1, p. 13–35, 2003.
- BEURLIN, H.; CASTRO, C.; THOMAS, R.; DA SILVA, M. R. R.; PRADO-BORGES L. E. Strüverite and Scandium bearing titanite ixiolite from the Canoas Pegmatite (Acari – Rio Grande do Norte) in the Borborema Pegmatitic Province, NE-Brazil. *Estudos Geológicos*, Recife, v.14, n. 1, p. 20–31, 2004.
- BEURLIN, H.; THOMAS, R.; DA SILVA, M. R. R.; MÜLLER, A.; RHEDE, D.; SOARES, D. R. Perspectives for Li- and Ta- Mineralization in the Borborema Pegmatite Province, NE-Brazil: a review. *Journal of South American Earth Sciences*, Amsterdam, v. 56, p. 110–127, 2014.
- CARRINO, T.A.; CRÓSTA, A.P.; TOLEDO, C.L.B.; SILVA, A.M.; SILVA, J.L. Geology and Hydrothermal Alteration of the Chapi Chiara Prospect and Nearby Targets, Southern Peru, Using ASTER Data and Reflectance Spectroscopy. *Economic Geology*, Littleton, CO, USA, v. 110, p. 73–90, 2014.
- CRÓSTA, A.P.; DUCART, D.E.; SOUZA FILHO, C.R.; AZEVEDO, F.; BRODIE, C. Mineral Exploration for Epithermal Gold in Northern Patagônia, Argentina: From Regional- to Deposit-Scale Prospecting Using Landsat TM and Terra ASTER. In: BEDELL, R.; CRÓSTA, A.P.; GRUNSKY, E. (Eds.). *Remote Sensing and Spectral Geology - Reviews in Economic Geology*. Littleton, CO, USA: Society of Economic Geologists (SEG), v. 16, p. 97–108. 2009.
- CRÓSTA, A.P.; SOUZA FILHO, C.R. Mineral Exploration with Landsat Thematic Mapper (TM) / Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+): a Review of the Fundamentals, Characteristics, Data Processing and Case Studies. In: BEDELL, R.; CRÓSTA, A.P.; GRUNSKY, E. (Eds.). *Remote Sensing and Spectral Geology - Reviews in Economic Geology*. Littleton, CO, USA: Society of Economic Geologists (SEG), v. 16, p. 59–82. 2009.
- CSIRO. *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*. TSG Professional 5.0: Industry Standard Spectral Analysis Software for Geoscientists. Sydney, Australia: CSIRO, Division of Exploration and Mining, 2008.
- CRÓSTA, A. P.; SOUZA FILHO, C.R.; AZEVEDO, F.; BRODIE, C. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, Oxford, v. 24, p. 4233–4240. 2003.
- DA SILVA, M. R. R.; DANTAS, J. R. A. A Província Pegmatítica da Borborema - Seridó nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. In: *Principais depósitos minerais do Nordeste Oriental*. DNPM, Série Geologia, n. 24. Seção Geologia Econômica, n. 4. Brasília, p. 235–304. 1984.
- DA SILVA, M. R. R.; HÖLL, R.; BEURLIN, H. Borborema Pegmatitic Province: geological and geochemical characteristics. *Journal of South American Earth Sciences*, Amsterdam, v. 8, p. 355–364, 1995.
- FERNANDES, C. M. D.; JULIANI, C.; MONTEIRO, L. V. S.; LAGLER, B.; ECHEVERRI-MISAS, C. M. High-K calc-alkaline to A-type fissure-controlled volcano-plutonism of the São Félix do Xingu region, Amazonian craton, Brazil: Exclusively crustal sources or only mixed Nd model ages? *Journal of South American Earth Sciences*, Amsterdam, v. 32, p. 351–368, 2011.
- PODWYSOCKI, M.H.; SEGAL, D.B.; ABRAMS, M.J. Use of multispectral scanner images for assessment of hydrothermal alteration in the Marysvale, Utah, mining area. Reston: United States Department of the Interior, *Geological Survey Open-file report*, p. 82–675. 1983.
- JARDIM de SÁ, E. F. J. A Faixa Seridó (Província Borborema NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileiro/Pan-Africana. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 803 p. 1994.
- JOHNSTON Jr., W. D. Os pegmatitos berilo-tantalíferos da Paraíba e Rio Grande do Norte, no Nordeste do Brasil. *Rio de Janeiro: DNPM-DFPM*, 85 p. Boletim 72. 1945.
- KRUSE, F.A.; PERRY, S.L. Mineral mapping using simulated WorldView-3 shortwave infrared imagery. *Remote Sensing*, Basel, v. 5, n. 6, p. 2688–2703, 2013.
- LOUGHLIN, W. Principal component analysis in alteration mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Bethesda, v. 57, n. 9, p. 1163–1170, 1991.
- MACKIN, S. SIMIS. FeatureSearch 1.6. *Spectrometer Independent Mineral Identification Software—user manual and tutorial*. England: SIMIS Solutions S.L., 90 p. 2002.
- MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; GALO, M.; CAMARGO, P. O.; SILVA, A. Q.; SILVA, G. G. Monitoring of Surface Deformation in Open Pit Mine Using DInSAR Time-Series: A Case Study in the N5W

- Iron Mine (Carajás, Brazil) using TerraSAR-X data. In: *SPIE RS*, 2014, Amsterdam. Proceedings. Bellingham: SPIE, 2014. v. 9243, p. 924311-1: 924311-12.
- PARADELLA, W. R.; KRUG T.; LANDRY R.; PIETSCH R. W. GlobeSAR-2: o Programa de Avaliação de Dados RADARSAT nas Geociências, *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 403-406, 1997.
- PARADELLA, W. R.; VENEZIANI, P.; BIGNELLI, P. A.; PIETSCH, R. W.; TOUTIN T. Airborne and spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) integration with Landsat TM and gamma ray spectrometry for geological mapping in a tropical rainforest environment, the Carajas Mineral Province, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, Oxford, v. 18, p. 1483-1501, 1997.
- PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. E.; SANTOS, A. R. Radar interferometry in surface deformation detection with orbital data. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, v. 64, p. 797-811, 2012.
- PARADELLA, W. R.; FERRETTI, A.; MURA, J. C.; COLOMBO, D.; GAMA, F. E.; TAMBURINI, A.; SANTOS, A. R.; NOVALI, F.; GALO, M.; CAMARGO, P. O.; SILVA, A. Q.; SILVA, G. G.; SILVA A.; GOMES, L. L. Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon region) using an integrated SAR analysis. *Engineering Geology*, Amsterdam, v. 193, p. 61-78, 2015.
- PODWYSOCKI, M.H.; SEGAL, D.B.; ABRAMS, M.J. 1983. Use of multispectral scanner images for assessment of hydrothermal alteration in the Marysvale, Utah, mining area. Reston: United States Department of the Interior, *Geological Survey Open-file report*, p. 82-675. 1983.
- ROSSMAN, G.R.; FRITSCH, E.; SHIGLEY, J.E. Origin of color in cuprian elbaite from São José da Batalha, Paraíba Brazil. *American Mineralogist*, Chantilly, v. 76, p. 1479-1484, 1991.
- ROWAN, L.C.; HOOK, S.J.; ABRAMS, M.J.; MARS, J.C. Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system. *Economic Geology*, Littleton, v. 98, p. 1019-1027, 2003.
- RSI. *Environment for Visualizing Images* – ENVI, Version 4.5. The Remote Sensing Platform of Choice. ITT Industries, Inc. 2008.
- SABINE, C. Remote sensing strategies for mineral exploration. In: RENCZ, A. N. (Ed.) *Manual of Remote Sensing*, 3rd ed. Hoboken: John Wiley Inc., v. 3, p. 375-447. 1999.
- SCORZA, E. P. *Província Pegmatítica da Borborema: Nordeste do Brasil*. Rio de Janeiro: DNPM, DGM, 58 p. (Boletim 112). 1944.
- SILVA, S. M. P da. Espectroscopia de imageamento e gamaespectrometria aérea e terrestre de pegmatitos e granitos da porção sul da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), Nordeste do Brasil. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas, 173 p. 2009.
- SCHUCKMANN, W. K.; GOPINATH, T. R. Modelo de ocorrência e gênese de caulim primário nos pegmatitos de Junco de Seridó, Paraíba. In: Simpósio de Geologia do Nordeste. 1989, Fortaleza. *Anais*. Fortaleza: SBG, v. 13, p. 52-54. 1989.
- THOMPSON, A.J.B.; HAUFF, P.L.; ROBITAILLE, A.J. Alteration mapping in exploration: Application of Short-Wave Infrared (SWIR) spectroscopy. *SEG Newsletter*, Littleton, CO, USA, n. 39, Oct./1999.
- VASCONCELLOS, Y. Medidas Espaciais. *Revista Pesquisa FAPESP*, São Paulo. v. Janeiro/2015, n. 227, p. 54-57.
- YAMAGUCHI, Y.; NAITO, C. Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands. *International Journal of Remote Sensing*, Oxford, v. 24, p. 4311-4323, 2003.

Prospecção geofísica no Brasil

Renato Cordani

Reconsult Geofísica

RESUMO

A prospecção mineral tem na geofísica uma de suas mais eficientes ferramentas. As interpretações dos dados geofísicos são complementares às obtidas no mapeamento geológico e na amostragem geoquímica, mas com a vantagem de detectarem inclusive depósitos não aflorantes. Os métodos geofísicos usados na prospecção mineral foram estabelecidos há décadas. A diferença para o que se usava no passado é a resolução, hoje muito maior, e o fato de que a interpretação atualmente é feita em modelos no ambiente tridimensional. Os produtos finais de interpretação e modelamento não são mais dados em unidades de campo, e sim em unidades da propriedade física envolvida. Esse tipo de interpretação focado no modelo de propriedade física e não no campo medido, ao mesmo tempo que permite, solicita integração com dados de sondagem e medidas físicas dos testemunhos e perfilagens nos furos, de forma que os dados e modelos sejam integrados na interpretação dentro do ambiente tridimensional. O mundo é tridimensional, e a geofísica na prospecção mineral tem que seguir esse caminho.

Palavras-chave Interpretação Tridimensional. Modelos de Propriedades Físicas. Integração no Ambiente 3D. Geofísica de Prospecção.

A PROSPECÇÃO GEOFÍSICA NO BRASIL

A prospecção mineral tem na geofísica uma de suas mais eficientes ferramentas. A geofísica é a ciência capaz de mapear o subsolo através de sensores distribuídos na superfície ou aerotransportados. No caso da prospecção mineral, as interpretações dos dados geofísicos coletados são complementares às obtidas no mapeamento geológico e na amostragem geoquímica. Com relação a estas, no entanto, tem a vantagem de detectar inclusive depósitos não aflorantes, ou seja, mesmo que não haja qualquer indício de depósito em superfície, a geofísica é capaz de detectá-lo e auxiliar nas sondagens que levarão à descoberta e ao desenvolvimento.

As metodologias geofísicas usadas na prospecção mineral são praticamente as mesmas da década de 1980. A diferença para o que se usava no passado é a resolução, hoje muito maior, e o fato de que a interpretação atualmente é feita a partir dos modelos em ambiente 3D. Os produtos finais de interpretação e modelamento não são mais dados em unidades de campo, e sim em unidades da propriedade física envolvida.

Longe se vão os tempos em que o geofísico selecionava as anomalias circulando-as à caneta em um mapa impresso, anotava as coordenadas e entregava uma lista de alvos ao geólogo. Com a melhora da resolução dos dados e com o avanço computacional (*software* e

hardware), os modelos (inversões) tornaram-se menos ambíguos, e isso viabilizou a sua larga utilização nos trabalhos de prospecção mineral. Exemplificando, atualmente não se fala mais em “anomalia gravimétrica de 0,8 mGal”, mas sim em “corpo modelado de 400m de diâmetro com contraste de densidade de 0,2 g/cm³”. Passamos do campo à propriedade física.

Esse tipo de interpretação focado no modelo de propriedade física e não no campo medido, ao mesmo tempo que permite, solicita integração com dados de sondagem e medidas físicas dos testemunhos e perfisagens nos furos, de forma que os dados e modelos sejam integrados na interpretação dentro do ambiente tridimensional. Nessa nova forma de aplicar os métodos geofísicos na prospecção mineral, o mapeamento geológico de superfície perde importância para as medidas de propriedades físicas, geologia de furo e interpretações tridimensionais.

A Figura 1 mostra a aplicação de inversão magnética 3D no depósito Furnas – Carajás – Brasil. A Figura 2 apresenta modelos de densidade construídos com vínculos sobre a mina de Níquel sulfeto Perseverance, Western Australia. A Figura 3 mostra o modelo magnético e gravimétrico integrados sobre o complexo alcalino de Catalão – Goiás – Brasil, e a Figura 4 apresenta o modelo eletromagnético 3D do depósito do Cristalino – Carajás – Brasil.

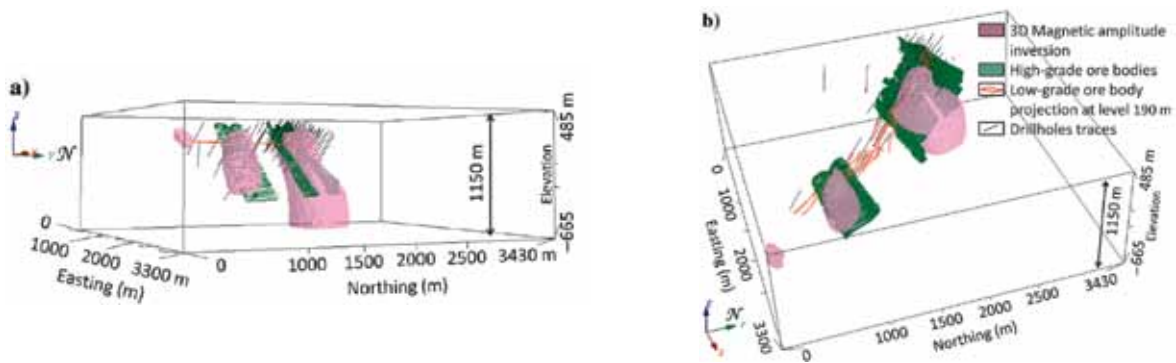


Figura 1 Correlação tridimensional entre os modelos de susceptibilidade obtidos (rosa) e o modelo geológico 3D da zona de mineralização de alto teor (verde) no depósito de Furnas – Carajás – Pará – Brasil (Fonte: LEÃO-SANTOS et al., 2015).

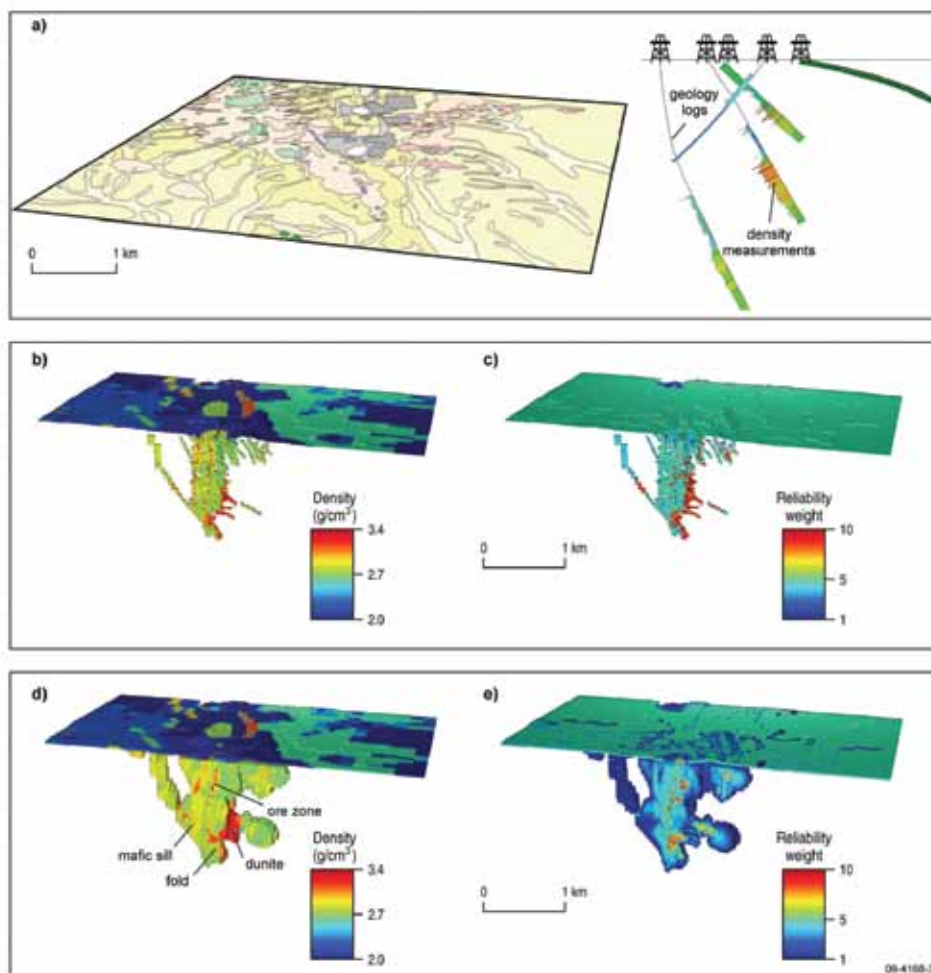


Figura 2 As rochas observadas e as medidas de densidade são (a) convertidas em vínculos, incluindo um modelo inicial de densidades (b) e uma indicação da confiabilidade daquele modelo (c) baseado no tipo dos dados e na distribuição das amostras. Os vínculos podem então ser extrapolados baseados na orientação estrutural conhecida da área para obter modelos melhorados de densidade (d) e confiabilidade (e) (Fonte: WILLIAMS et al., 2009).

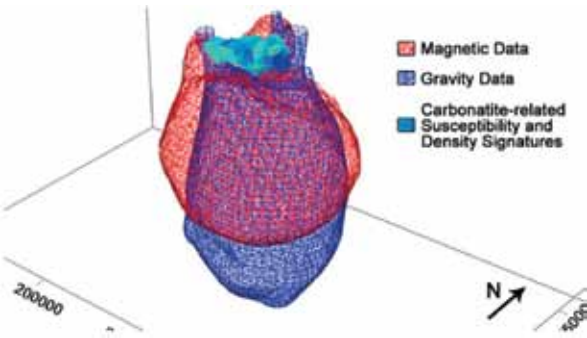


Figura 3 Visualização tridimensional perspectiva da comparação entre o modelo de densidades (azul) e o modelo magnético (vermelho) do complexo alcalino de Catalão. O topo sólido é interpretado como o modelo do carbonatito (Fonte: MANTOVANI et al., 2015).

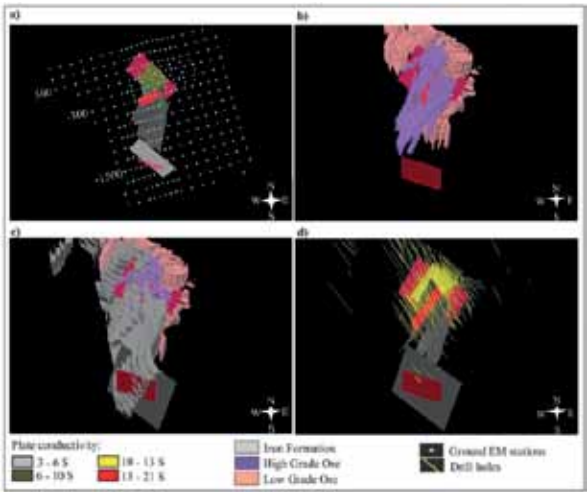


Figura 4 (a) Localização das medidas de EM terrestre e as placas EM modeladas; (b) detalhe das placas de EM invertido mais condutivas junto com o modelo geológico dos minérios de alto e baixo teor; (c) placas EM com o minério de alto e baixo teor e as formações ferríferas; (d) placas EM invertidas e os furos existentes no projeto (Fonte: Melo et al., 2014)

O mundo é tridimensional, e a geofísica na prospecção mineral tem que seguir esse caminho. A Tabela 1 resume os principais métodos, as unidades de medida e a propriedade física envolvida.

Tabela 1 Métodos geofísicos mais utilizados na prospecção mineral, propriedades físicas envolvidas e aplicações.

Método	Medida	Propriedade física	Aplicações principais
Magnetometria	Campo Magnético	Susceptibilidade e Remanescente	Mapeamento, IOCG, Pórfiros, BIFs, Complexos Alcalinos, Kimberlitos, Ni (sulfeto e laterítico), VMS
Gravimetria	Aceleração da Gravidade	Densidade	Mapeamento, IOCG, Pórfiros, Hematita, Carbonatitos, kimberlitos, Ni sulfeto, VMS
Polarização Induzida (IP)	Decaimento do Potencial	Cargabilidade	Sulfetos disseminados, Grafita, Alteração Hidrotermal, VMS, Manganês
Eletrorresistividade	Diferença de Potencial	Resistividade	Mapeamento, Silicificação, Ouro, Ferro
Eletromagnetismo	dB/dt e Bfield	Condutividade	Ni sulfeto, VMS, IOCG
Gamaespectrometria	Contagens	Radioatividade	Alteração Hidrotermal, Urânio, Complexos Alcalinos

(Fonte: Elaborada pelo autor)

COBERTURA AEROGEOFÍSICA DO TERRITÓRIO BRASILEIRO

O governo brasileiro, através da CPRM e de parcerias com órgãos estaduais (CODEMIG-MG, SIG-GO e CBPM-BA), executou, nos últimos 15 anos, a cobertura aerogeofísica em alta resolução¹ de grande parte da porção do território nacional que não é coberta por Bacias Sedimentares, nos métodos magnetometria e gamaespectrometria. A Figura 5 mostra os levantamentos executados pelos órgãos federais e estaduais.

A interpretação desses dados é uma etapa inicial e muito importante para a descoberta de províncias e depósitos minerais, reduzindo muito a área de trabalho, priorizando as áreas com mais potencial e, portanto, pulando etapas e economizando dinheiro. As interpretações levam à seleção de alvos, que devem ser detalhados com novos levantamentos geofísicos (com maior detalhe de informação ou execução de outros métodos), geoquímica e mapeamento geológico.

1 cobertura em alta resolução significa espaçamento entre linhas de no máximo 500 m, altitude de voo de 100 m, amostragem mag de 10Hz e gama de 1Hz.

EMPRESAS DE GEOFÍSICA NO ATUAL STATUS DA PROSPECÇÃO MINERAL NO BRASIL

O cenário de incerteza no Marco Regulatório (já abordado nos itens anteriores) afetou fortemente também a atividade de prospecção e consequentemente o mercado de serviços de geofísica para prospecção mineral. As poucas empresas que atuam na área sofrem com a total ausência de projetos *greenfield* (áreas novas, com geologia pouco ou nada conhecida) e a escassez de projetos *brownfield* (localizados dentro de províncias conhecidas).

O término do projeto da CPRM de voar todo o cristalino brasileiro (veja o mapa da Figura 5) causou a desativação de quase todas as aeronaves de aerogeofísica que atuavam no Brasil, levando as empresas de aerolevantamentos geofísicos a prestarem serviços no exterior ou entrarem em compasso de espera, com muitas demissões.

Os geofísicos que se formam nos oito cursos de graduação em geofísica do país encontram em 2015 muitas dificuldades de emprego no setor de prospecção mineral, motivo pelo qual muitas vezes acabam se engajando em outras áreas e dificilmente voltam. É

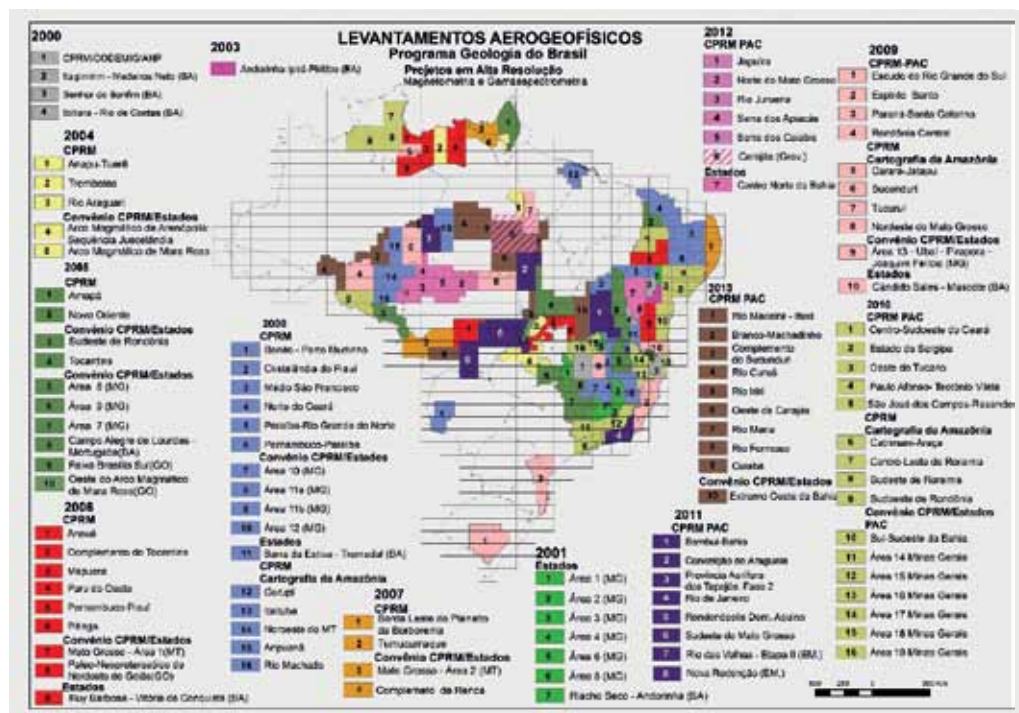


Figura 5 Levantamentos Aerogeofísicos de Alta Resolução disponíveis no Brasil através de órgãos federais e estaduais (Fonte: COSTA et al., 2011).

necessário um esforço para que não seja formada mais uma geração perdida na cadeia profissional de serviços de geofísica voltada para a prospecção mineral.

CENÁRIOS FUTUROS DO USO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS NA PROSPECÇÃO MINERAL

Com a exaustão das descobertas de depósitos aflorantes, o mercado mineral tem que ser abastecido por depósitos que se encontram em profundidades cada vez maiores. Esse fato adicionado às exigências mundiais com relação à preservação do meio ambiente e o menor impacto ambiental possível na prospecção tornam as metodologias geofísicas cada vez mais fundamentais na prospecção mineral.

O entendimento das propriedades físicas do depósito bem como das encaixantes, a escolha do método geofísico mais adequado, a aquisição de dados de qualidade e uma interpretação focada nas propriedades físicas em ambiente 3D, de preferência vinculadas a sondagens diretas e dados de amostragem geoquímica em superfície, tornam-se imperativos em uma prospecção mineral do Séc. XXI.

REFERÊNCIAS

- COSTA, C.M.; DE SORDI, D.; AZEVEDO, M.L.V.; MUNIS, M.B.; BEZERRA, J.R.L.; RUGENSKI, A.; ALVES, R.A.; VIEIRA, V.A.; SILVEIRA, R.L.; ALMEIDA, S.H. *Projeto Aeromag Brasil*, Edição Especial - CPRM & ANP. Escala: 1:6.000.000. Brasília. 2011.
- LEÃO-SANTOS, M.; LI, Y.; MORAES, R. Application of 3D magnetic amplitude inversion to iron oxide-copper-gold deposits at low magnetic latitudes: A case study from Carajás Mineral Province, Brazil. *Geophysics*, v. 80, B13-B22. 2015.
- MANTOVANI, M.S.M.; LOURO, V.H.A.; RIBEIRO, V.B.; REQUEJO, H.S.; SANTOS, R.P.Z. Geophysical analysis of Catalão I alkaline-carbonatite complex in Goiás, Brazil. *Geophysical Prospecting*. European Association of Geoscientists & Engineers, v. 64, p. 216–227. 2016.
- MELO, A.T.; VON HUELSEN, M.G.; TRAVAGLIA-FILHO, U.J.; FUCK, R.A. Comparison Between 1D Electromagnetic Modeling Programs: A Case History For Cristalino Iron Oxide Copper Gold Deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 32, n. 3, p. 1-11. 2014.
- WILLIAMS, N.; OLDENBURG, D.; LELIÈVRE, P. Inversion of geophysical data produces predictive 3D models. *AusGeo News*, n. 96. 2009. Disponível em: <<http://www.ga.gov.au/ausgeonews/ausgeonews200912/surface.jsp>>. Acesso em 01 de junho de 2016.

Prospecção geoquímica no Brasil

Otávio Augusto Boni Licht

Serviço Geológico do Paraná - MINEROPAR

Rômulo Simões Angélica

Universidade Federal do Pará

RESUMO

As técnicas de prospecção geoquímica têm sido amplamente aplicadas em diversos ambientes fisiográficos e climáticos do planeta e têm demonstrado eficiência na detecção de depósitos e jazidas minerais de portes variados. Nas últimas três décadas, o aprimoramento das técnicas analíticas multielementares aumentou a capacidade de investigação e as chances de sucesso, isto é, a localização de depósitos minerais e jazidas. Atualmente os dados produzidos por levantamentos geoquímicos encontram múltiplos usos que alcançam inclusive a saúde das populações e os diagnósticos ambientais. Neste trabalho, são apresentadas algumas propostas, como a padronização de levantamentos geoquímicos regionais executados por organizações governamentais e empresas privadas, a necessidade de adequação curricular dos cursos de graduação em geologia dando maior ênfase à disciplina de prospecção geoquímica, além da implementação de um grande programa de pesquisa em cursos de pós-graduação, voltado ao desenvolvimento e ao aprimoramento metodológico visando aumentar a eficiência e a profundidade de investigação das técnicas de prospecção geoquímica.

Palavras-chave Prospecção geoquímica. Exploração mineral. Depósitos minerais.

INTRODUÇÃO

Os levantamentos geoquímicos aplicados à localização de depósitos e jazidas minerais se baseiam nos seguintes princípios: (1) existem concentrações anômalas de elementos químicos hospedados nas rochas, conhecidos como depósitos minerais, alguns dos quais podem apresentar interesse econômico, quando passam a ser denominados de jazidas; (2) os depósitos minerais são formados por associações de elementos químicos com comportamentos afins; (3) a abundância dos elementos químicos nos depósitos minerais varia daqueles medidos em % (porcento), ppm (partes por milhão) e até em ppb (partes por bilhão); (4) quando os depósitos minerais são submetidos à ação do intemperismo, os elementos químicos que os constituem se dispersam na forma de halos cada vez mais amplos e teores decrescentes; (5) praticamente todos os materiais naturais, geológicos ou biológicos, expostos aos halos de dispersão, se enriquecem nos elementos químicos que os constituem; (6) a coleta e a análise química de sedimentos fluviais, solo, água, poeira, ar, e mesmo amostras de organismos vivos, são capazes de indicar a proximidade dos depósitos minerais.

Por tratar-se de tema muito amplo, o conteúdo deste capítulo se restringirá às técnicas e métodos de prospecção geoquímica de depósitos minerais metálicos e não metálicos, não sendo abordadas as aplicações na prospecção de óleo e gás.

HISTÓRICO

Durante a Idade Média, Giovanni di Castro (início do séc. XV-1470), Vanocchio Biringuccio (1480-1539) e Georg Bauer conhecido como Georgius Agricola (1494-1555), já identificaram as alterações morfológicas sofridas pelos vegetais ao serem expostos a teores elevados de metais nas proximidades de depósitos e jazidas minerais. Esta base do conhecimento empírico da prospecção geoquímica está preservada em *De La Pirotechnia* (BIRINGUCCIO, 1540) e em *De Re Metallica* (AGRICOLA, 1556). Desde a Renascença até o início do século XX, muitos cientistas pesquisaram as associações dos elementos químicos em depósitos minerais e tentaram estabelecer as leis que regem essas relações. Entre eles, salientam-se Mihail Lomonosov (1711-1765), Johann Döbereiner (1782-1849), Jöns Berzelius (1779-1848), Christian Schönbein (1799-1868), Karl Bischof (1792-1870), Justus Roth (1818-1892) e Dimitri Mendeleev (1834-1907). No entanto, foi nos primórdios do século XX que Viktor Goldschmidt (1853-1933) e Aleksander Fersman (1883-1945) estabeleceram os fundamentos da distribuição e concentração dos elementos nos materiais naturais, geológicos, hídricos e biológicos e estabeleceram as bases científicas da prospecção geoquímica (LICHT; BRANCO, 2007).

No período compreendido entre as décadas de 1920 a 1940, muitos levantamentos geoquímicos foram realizados com a finalidade de prospecção mineral. Inicialmente na União Soviética, onde as bases e con-

ceitos da técnica foram estabelecidos e logo depois nos países nórdicos, os levantamentos geoquímicos foram realizados com o objetivo de localizar jazimentos de metais como Cu, Pb, Zn, Sn, W e Au. Nesse período, em função das técnicas laboratoriais serem ainda primitivas como a via úmida, os levantamentos geoquímicos eram concebidos para localizar depósitos minerais com base na resposta de poucos ou apenas um elemento químico.

Em 1932, no Instituto Central de Ciências e Investigações Geológicas e Prospectivas da URSS foi proposto e testado com sucesso o método iônico para a prospecção de depósitos de sulfetos metálicos.

Esses procedimentos foram testados no laboratório e no campo e agora estão começando a ser reconhecidos pela indústria. Métodos desenvolvidos para alguns problemas específicos, diferindo apenas na escolha dos indicadores, estão adquirindo designações específicas. No presente momento eles podem ser considerados numa única categoria conhecida como métodos geoquímicos (SERGEEV, 1941).

As designações específicas acima referidas descreviam o elemento analisado ou a finalidade do levantamento geoquímico, por exemplo, cuprométricos, estanométricos e borométricos. Muitos levantamentos geoquímicos foram realizados com a técnica de espectrografia de emissão óptica que apesar de multielementares, tinham baixa sensibilidade na determinação do teor de muitos elementos.

A partir da década de 1970, surgiram técnicas analíticas instrumentais capazes de medir os teores de vários elementos químicos, como a espectrofotometria de absorção atômica. A fração granulométrica < 80 mesh (< 0,177 mm) consagrou-se como a mais adequada para a maioria das situações e os ataques químicos mais adotados passaram a ser o ácido nítrico (HNO_3) concentrado e a quente ou a aqua regia, uma mistura de ácido clorídrico e nítrico ($\text{HCl} + \text{HNO}_3$) na proporção de 3:1. Com isso, os levantamentos geoquímicos passaram a dispor de resultados multielementares confiáveis, o que propiciou a aplicação de técnicas de interpretação mais sofisticadas e com maior resolução, como as técnicas de estatística multivariada.

No início da década de 1970, o *Bureau des Recherches Géologiques et Minières* (BRGM) realizou os primeiros levantamentos geoquímicos regionais multiteios amostrais e multielementares que ficaram conhecidos como Inventário Mineiro do Maciço Armoricano e do Maciço Central Francês. Esses levantamentos foram baseados na análise geoquímica de sedimentos aluvionares e na identificação e quantificação visual de

minerais em concentrados de bateia. Esse trabalho foi provocado por dois motivos. O primeiro foi a escassez das matérias primas minerais como fosfato, zinco e bauxita que colocou em risco toda base industrial dos países europeus. O segundo foi a certeza de que um levantamento geoquímico regional multielementar poderia contribuir de maneira decisiva para o encaminhamento da solução desse grave problema econômico. Depois, o BRGM ampliou a área de abrangência do inventário e outros países como Finlândia, Suécia, Grã-Bretanha, Canadá, Costa Rica e China iniciaram seus levantamentos de reconhecimento geoquímico regional e multielementar. São desta época, também, livros textos clássicos sobre métodos e técnicas de Prospecção Geoquímica, como os de Levinson (1974) e Rose; Hawkes; Webb (1979), que contêm exemplos dos levantamentos geoquímicos e estudos de caso principalmente na Europa, América do Norte e África.

Foi também nesse período que o desenvolvimento e a evolução dos sistemas computacionais possibilitou o tratamento estatístico de grandes bancos de dados e a produção automatizada de mapas geoquímicos.

O primeiro levantamento geoquímico do Brasil foi realizado por Geraldo Conrado Melcher no início da década de 1950. Esse levantamento patrocinado pelo Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) foi baseado na amostragem de solos em malha regular, e cobriu uma ampla área de rochas metacarbonáticas com mineralizações de Pb-Zn no vale do rio Ribeira (SP e PR). Foi precedido por estudos geoquímicos orientativos que visaram definir e otimizar a metodologia de campo e laboratório, com a coleta de mais de 2.000 amostras. O Relatório da Diretoria do DNPM que compreende o período 1955, 1956 e 1957, relata que no decorrer do levantamento sistemático no vale do Ribeira, foram coletadas mais de 50.000 amostras de solo analisadas para Pb pela técnica colorimétrica da ditizona. A interpretação dos mapas e perfis geoquímicos indicou a continuidade de diversos depósitos minerais como as minas de Furnas e do Rocha e os prospectos Três Barras e Serra (MELCHER, 1956).

Depois desse passo inicial bem sucedido, inúmeros levantamentos geoquímicos regionais, de semi-detalle e de detalhe foram realizados no Brasil, todos eles voltados para a prospecção mineral, especialmente de depósitos de Cu, Pb, Zn, Ni, Au e U, por organizações governamentais federais como o Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) (Figura 1), a Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM), hoje Serviço Geológico do Brasil (SGB) (Figura 1), a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), as Empresas Nucleares Brasileiras S.A. (NUCLEBRÁS),

a Petrobrás Mineração (PETROMISA), organizações estaduais como o Programa de Desenvolvimento de Recursos Minerais – Pró-Minério do IPT-São Paulo (Figura 2), a Minerais do Paraná, atual Serviço Geológico do Paraná (MINEROPAR) (Figura 3), a Metais de Goiás (METAGO) (Figura 4), a Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM) (Figura 5), e a Metais de Minas Gerais (METAMIG) bem como diversas empresas

privadas. Centenas de milhares de amostras de sedimentos fluviais e solos foram coletadas em todo o país (Tabela 1), mas em virtude das técnicas analíticas de capacidade limitada que estavam disponíveis à época, poucos elementos eram determinados e com altos limites inferiores de detecção. Com isso, a capacidade de investigação dos dados era reduzida.

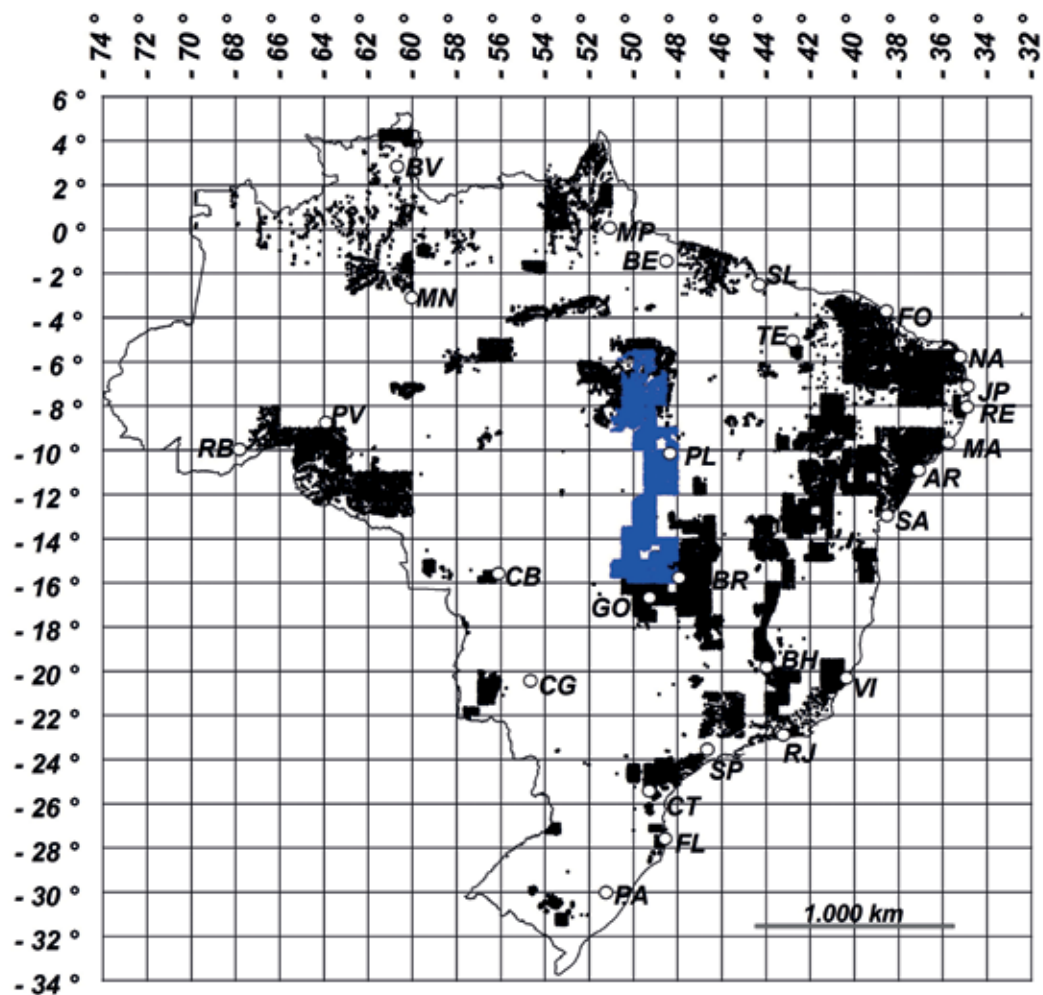


Figura 1 Localização das amostras de sedimentos fluviais (triângulos pretos) coletadas pelos projetos de prospecção geoquímica realizados no Brasil pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM), atual Serviço Geológico do Brasil e das amostras de sedimentos fluviais (triângulos azuis) coletadas na década de 1970 pelo Projeto Geofísica Brasil-Canadá (PGBC), convênio entre o Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM) do Ministério das Minas e Energia e a Agência Canadense para o Desenvolvimento Internacional (CIDA), que cobriu 375.000 km² nos Estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Pará e Maranhão, incluindo a Província Mineral de Carajás (Fonte: SGB-CPRM, 2005; Eric Santos Araújo, com. pes., 2015).

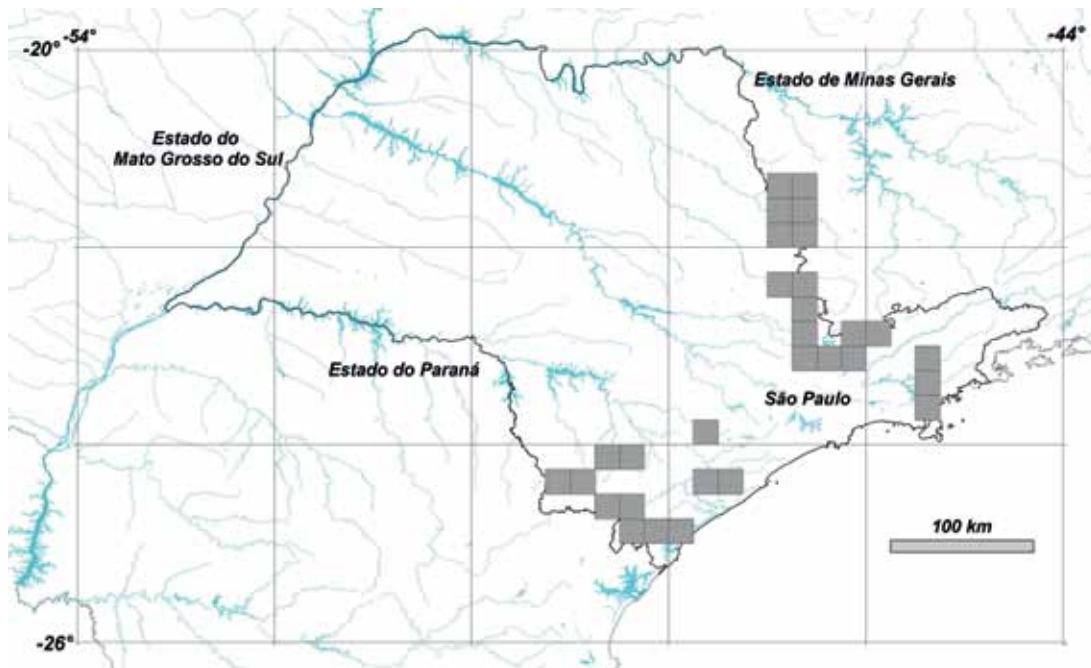


Figura 2 Localização das 30 cartas 1:50.000 nas quais o Programa ProMinério, IPT-SP (quadriculas cinza) realizou prospecção geoquímica, com a coleta de aproximadamente 16.000 amostras de sedimentos fluviais (Fonte: Duílio Rondinelli, com. pes., 2015).



Figura 3 Localização das 9.597 amostras de sedimentos fluviais coletadas pelos projetos de prospecção geoquímica realizados pelo Serviço Geológico do Paraná - MINEROPAR (pontos azuis) (Fonte: MINEROPAR, 2015).

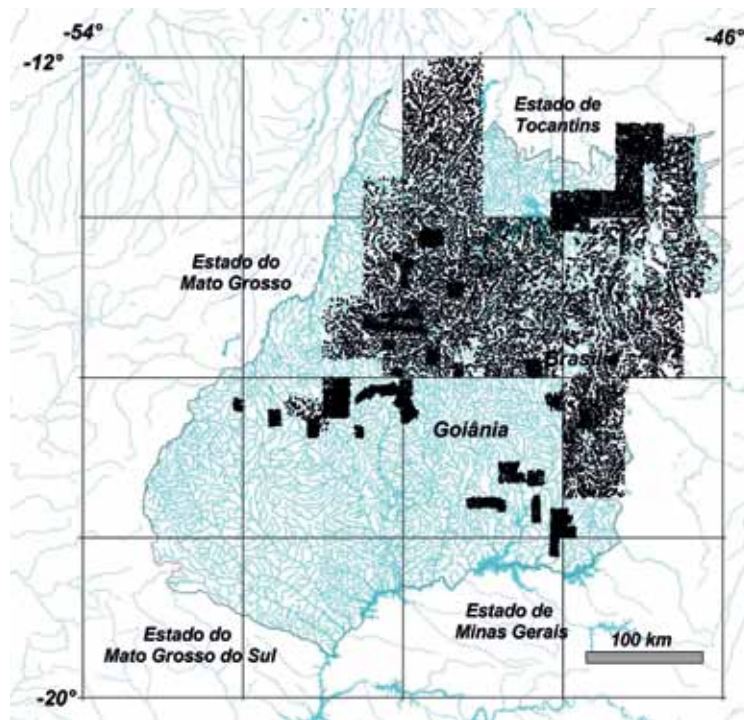


Figura 4 Localização das 30.375 amostras de sedimentos fluviais coletadas pelos projetos de prospecção geoquímica realizados pela Metais de Goiás - METAGO (pontos pretos). Estão incluídas as amostras do Projeto Bambuí realizado pela CPRM e que foram reanalisadas pela METAGO (Fonte: Luiz Fernando Magalhães, com. pes., 2015).

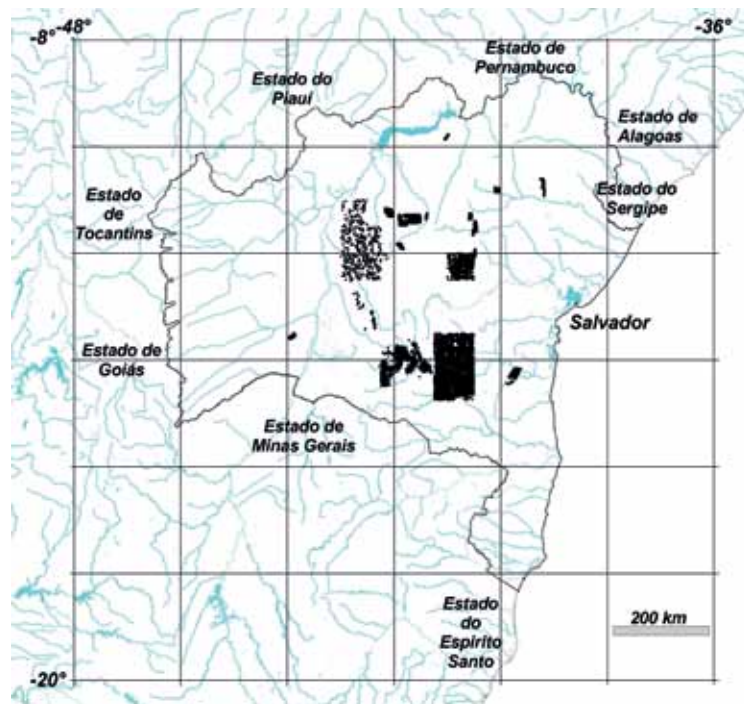


Figura 5 Localização das 13.758 amostras de sedimentos fluviais, 83.894 amostras de solo e 541 de concentrados de bateia coletadas pelos projetos de prospecção geoquímica realizados pela Companhia Baiana de Pesquisa Mineral - CBPM (CBPM, 2015).

Tabela 1 Estimativa mínima das quantidades de amostras coletadas por diversas organizações estatais desde 1970.

	Sedimentos fluviais	Concentrados de bateia	Solo
DNPM	11.281	(*)	50.000
CPRM	≈ 115.000	(*)	(*)
MINEROPAR (PR)	9.597	2.940	14.732
METAGO (GO)	30.375(1)	(*)	(*)
CBPM (BA)	13.758	541	83.894
ProMinério IPT (SP)	≈ 16.000	(*)	(*)

Nota: (1) Inclui amostras do Projeto Bambuí executado pela CPRM e que foram reanalisadas pela METAGO; (*) dados não disponíveis. (Fonte: Elaborada pelos autores, a partir de informações de SGB-CPRM, 2005; MELCHER, 1956; Eric Santos Araújo, com. pes., 2015; Duílio Rondinelli, com. pes., 2015; MINEROPAR, 2015; Luiz Fernando Magalhães, com. pes., 2008; CBPM, 2015).

Mesmo com essas limitações, diversos casos de sucesso de prospecção geoquímica são conhecidos no Brasil, salientando-se a descoberta de depósitos econômicos de Cu-Ni associados a rochas ultramáficas em GO, depósitos de Au no Greenstone Belt do Rio Itapicuru, BA, jazidas de cromita associadas aos depósitos de Campo Formoso, BA, jazidas de ferro-titânio de Campo Alegre de Lourdes, BA, e a jazida de Pb-Zn da Fazenda Santa Maria na região das Minas do Camaquã, RS. Também foram destacadas largas faixas ou cinturões com grande potencial exploratório como é o caso do fosfato do Grupo Bambuí, que se estende pela Bahia, Minas Gerais, Goiás e Tocantins. Na Província de Carajás (PA), após a descoberta dos gigantes depósitos de ferro nos anos 60, a Companhia Vale do Rio Doce, através da sua subsidiária DOCEGEO, desenvolveu prospecção geoquímica sistemática na grande região que ficou sob a sua jurisdição, o que levou nas décadas seguintes a descoberta de importantes depósitos minerais, tornados em minas, especialmente de Cu e Au, como Salobo, Igarapé Bahia, Sossego, Alemão, Águas Claras, dentre outros.

ESTADO DA ARTE

Mesmo com esses inúmeros exemplos de sucesso nos mais diversos ambientes e regiões do planeta, os depósitos minerais aflorantes estão se tornando escassos. Por isso, regiões inóspitas em altas cordilheiras ou cobertas por floresta tropical estão sendo intensamente exploradas. Isso significa que em novos levantamentos geoquímicos realizados em regiões que já foram pesquisadas com métodos limitados, será necessário adotar técnicas de prospecção geoquímica que tenham maior sensibilidade e que sejam capazes de amplificar a capacidade de discriminação e a profundidade de investigação.

A partir do final do século XX, o advento de técnicas analíticas de custo relativamente baixo e com capacidade de detectar simultaneamente dezenas de elementos químicos em teores tão baixos quanto uma parte por bilhão (ppb), como a espectrometria de plasma induzido - ICP, resultou em bases de dados analíticos produzidas por levantamentos geoquímicos tão completas que sua aplicação ampliou-se muito além dos propósitos da prospecção mineral, para diversas áreas do conhecimento como saúde humana, fertilidade agrícola e diagnósticos ambientais. Começaram a ser testadas e adotadas rotineiramente frações granulométricas menores como <150 mesh (<0,105 mm) ou <200 mesh (<0,074 mm), com a adoção de ataques químicos muito vigorosos como o multiácido ou tetrácido, uma combinação de ácido clorídrico, nítrico, perclórico e fluorídrico ($\text{HCl} + \text{HNO}_3 + \text{HClO}_4 + \text{HF}$) o que aumentou drasticamente os contrastes entre áreas estéreis e mineralizadas.

É frequente que na associação de elementos químicos que constituem os depósitos minerais estejam presentes alguns voláteis como S, Sb, As, Te e Hg. Emanações gasosas desses elementos ou de seus compostos, que são geradas no corpo do depósito mineral, tenderão a migrar pelas fraturas ou pela permo-porosidade do maciço rochoso hospedeiro para zonas de menor pressão, escapando assim para a atmosfera. Dessa maneira, gases retidos no solo ou no ar sobre os depósitos minerais, mostrarão teores aumentados desses elementos ou compostos.

Equipamentos portáteis e de extrema sensibilidade para a detecção e medição dessas emanações já estão disponíveis e são capazes de detectar teores, como, por exemplo, de 1 ppb Hg. Em paralelo, equipamentos portáteis de técnicas analíticas multielementares e de grande sensibilidade como o espectrômetro de ablação por laser - LAS e de fluorescência de raios X - XRF já fazem parte desse conjunto instrumental a ser aplicado em trabalhos de campo.

Por não estar previsto no Código de Minas vigente no Brasil, os resultados de levantamentos geoquímicos realizados por empresas privadas e organizações públicas, em áreas com autorizações de pesquisa concedidas pela União, não são tornados públicos e permanecem como propriedade exclusiva das instituições responsáveis e assim, mantidos sob sigilo. São poucos os casos de liberação ampla e gratuita de bases de dados geoquímicos, salientando-se os casos do Serviço Geológico do Brasil (SGB) e do Serviço Geológico do Paraná (MINEROPAR). Se com os resultados analíticos há essa dificuldade, com as amostras coletadas o caso é ainda mais grave, pois é comum que elas sejam descartadas após a análise, o que inviabiliza a reanálise com técnicas modernas e de maior sensibilidade. Na década de 1980, o Programa PróMinério IPT-SP, realizou levantamento geoquímico em 30 cartas 1:50.000 (Figura 2). Nesse projeto, foram coletadas aproximadamente 15.000 amostras de sedimentos fluviais, que foram analisadas para 30 elementos por espectrografia de emissão óptica. Não existe uma base de dados digital

com os resultados analíticos nem mesmo as amostras foram preservadas para análise com técnicas modernas de maior sensibilidade.

Mesmo com a organização, arquivamento e disponibilização pública de resultados nas bases de dados do SGB e da MINEROPAR, o Brasil permanecia sem levantamentos geoquímicos multielementares e multimeios amostrais que cobrissem sistemática e meteticulosamente o seu território. As exceções eram os levantamentos geoquímicos regionais do Estado do Paraná (Figuras 6 e 7) e de parte da Região Nordeste que seguiram estritamente os padrões estabelecidos pelo Projeto IGCP 259 - *International Geochemical Mapping* e IGCP 360 - *Global Geochemical Baselines* patrocinados pela International Union of Geological Sciences (IUGS), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), International Association of Geochemistry and Cosmochemistry (IAGC), Association of Exploration Geochemists (AEG), International Atomic Energy Agency (IAEA) e The Royal Society (DARNLEY et al., 1995).

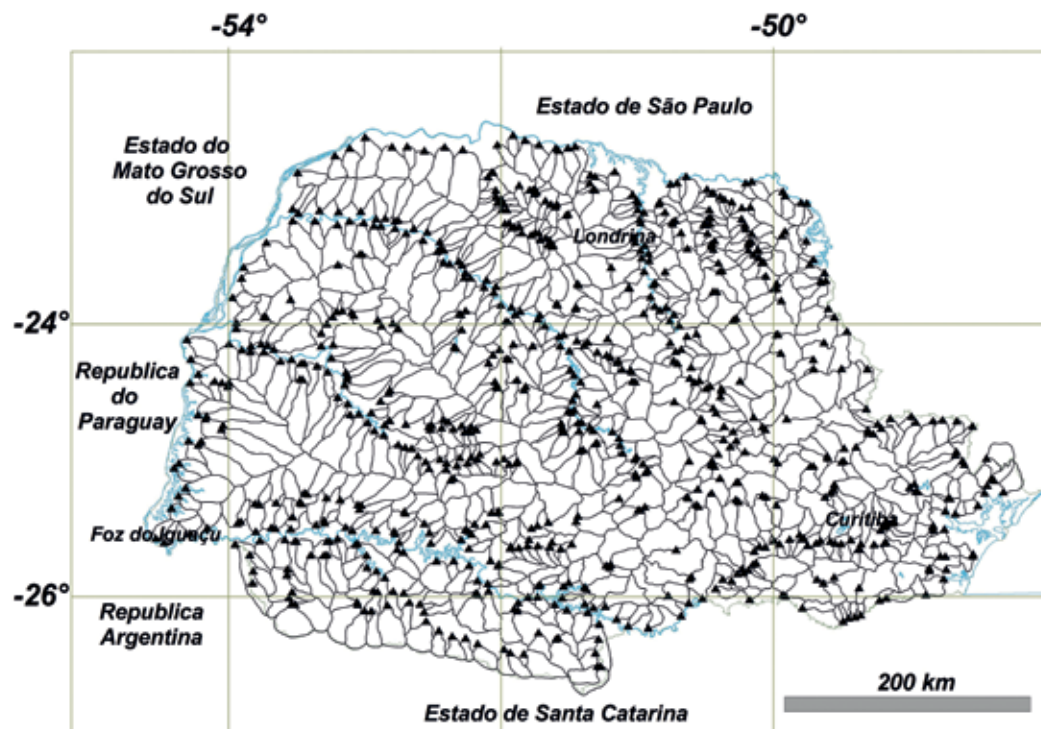


Figura 6 Localização das bacias de captação com área aproximada de 220 km² e respectivas amostras de sedimentos e águas fluviais coletadas pelo Levantamento Geoquímico de Baixa Densidade do Estado do Paraná realizados pelo Serviço Geológico do Paraná MINEROPAR (Fonte: MINEROPAR, 2001a).

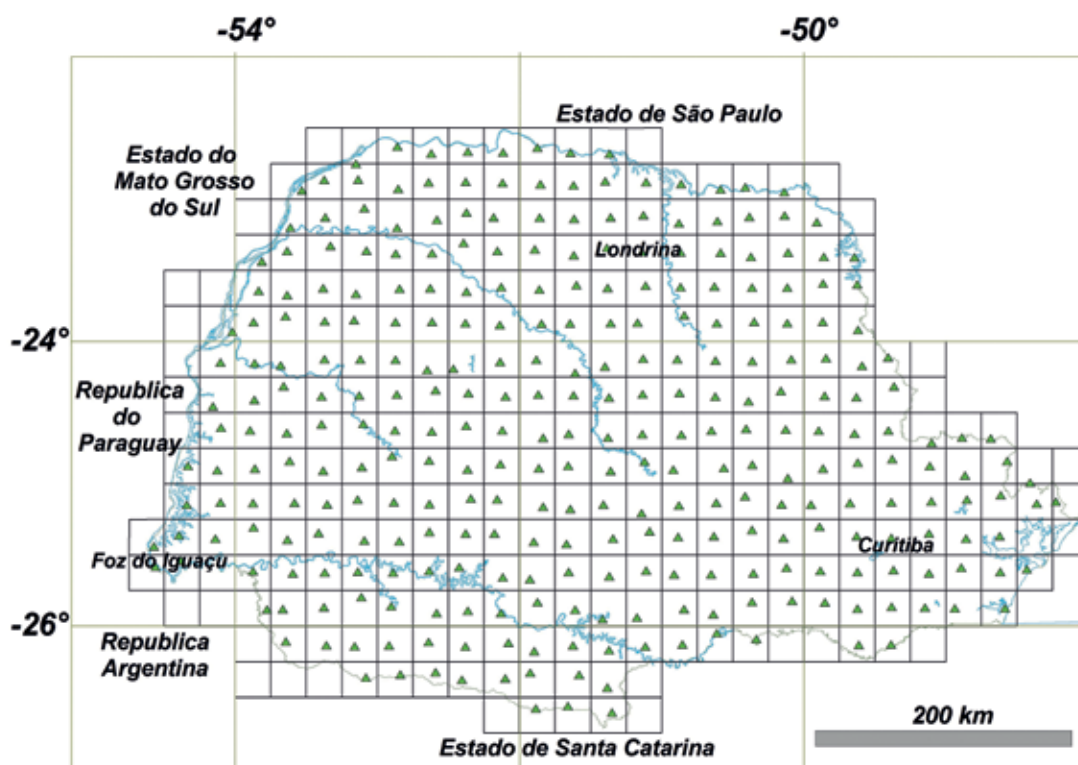


Figura 7 Localização cartas 1:50.000 em cujo centro aproximado foram coletadas as 307 amostras de solo – horizonte B do Levantamento Geoquímico de Solos – horizonte B do Estado do Paraná realizado pelo Serviço Geológico do Paraná - MINEROPAR (Fonte: MINEROPAR, 2005).

Um dos principais objetivos de levantamentos geoquímicos sistemáticos em grandes regiões com baixa densidade de amostras coletadas por unidade de superfície (amostra/km²), é a delimitação de províncias geoquímicas ou de associações metálicas de grandes dimensões (Figura 8). Só dessa maneira poderão ser estabelecidas as bases de comparação dos gradientes e das variações de fundo geoquímico de baixa frequência e grande amplitude de escala regional, facilitando a delimitação de províncias geoquímicas. As variações locais de alta frequência e de pequena amplitude, que caracterizam depósitos minerais, praticamente não são detectadas por esses levantamentos de larga escala. Nesse sentido, é importante considerar que um levantamento que abrange o território de um país, ou levantamento geoquímico nacional, precede o levantamento regional, que por sua vez precede o levantamento de detalhe, obedecendo à sequência natural dos projetos de exploração mineral.

O conceito moderno de exploração mineral exige que dados geoquímicos sejam interpretados em conjunto com os produzidos por técnicas geofísicas terrestres ou aéreas, imagens de sensores remotos instalados em aviões ou satélites, e mapeamentos geológicos realizados em intensos trabalhos de campo, cada qual com técnicas e abordagens diversas, que produzem respostas específicas. Com a interpretação integrada desses resultados, será possível caracterizar faixas com potencial exploratório.

É um equívoco estratégico pensar que a geoquímica deva ser aplicada apenas em áreas selecionadas por técnicas geofísicas, de sensoriamento remoto ou em modelos geológicos ou metalogenéticos. Nunca é demais lembrar que os processos mineralizadores são, antes de tudo, eventos geoquímicos e por este motivo, a prospecção geoquímica é a única técnica exploratória capaz não só de fornecer resultados diretos da presença do elemento de interesse como também dar a indicação vetorial da localização do depósito mineral.

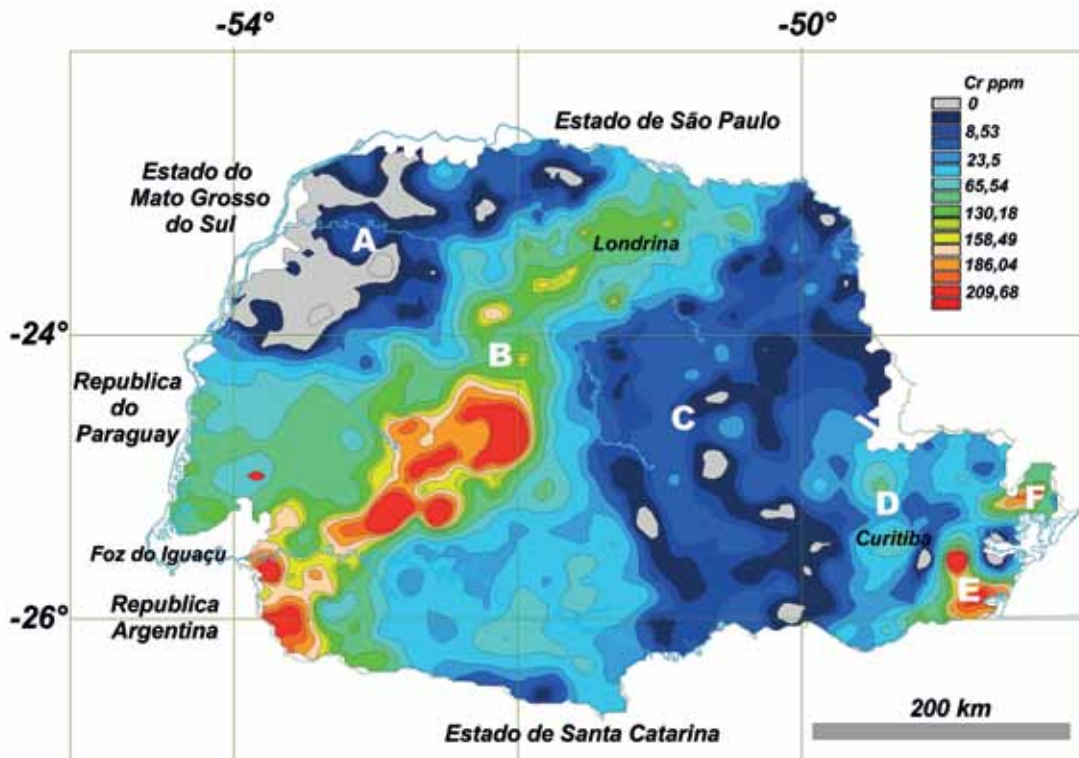


Figura 8 Mapa de distribuição do Cr (ppm) em 696 amostras de sedimentos fluviais ativos coletadas em bacias de captação com área aproximada de 220 km². A zonalidade da distribuição do cromo reflete o fundo geológico: (A) arenitos dos grupos Caiuá e Bauru, (B) vulcânicas básicas e ácidas do Grupo Serra Geral, (C) sequência sedimentar paleozoica da Bacia do Paraná, (D) Escudo Paranaense, (E) rochas ultrabásicas do Complexo de Piên, (F) complexo ultrabásico de Serra Negra. Levantamento Geoquímico de Baixa Densidade do Estado do Paraná realizado pelo Serviço Geológico do Paraná MINEROPAR (Fonte: MINEROPAR, 2001a).

A FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS

Além dos resultados indiscutíveis que decorrem dos levantamentos geoquímicos na organização e sistematização das atividades de conhecimento e planejamento da ocupação de um território, eles têm um grande papel na formação e na capacitação de recursos humanos, já que exigem grande quantidade de profissionais de nível médio e superior para o planejamento, coleta de amostras, análises químicas, tratamento de dados, interpretação de resultados e o detalhamento de áreas consideradas como anomalias positivas e com potencial de conter depósitos minerais.

Na grade curricular dos 25 cursos de graduação de geologia de universidades públicas e privadas, apenas duas indicam a disciplina de Prospecção Geoquímica como obrigatória. Em outros três cursos ela consta como eletiva ou optativa, e nos restantes ela está englobada nas disciplinas genéricas Prospecção

Geral, Prospecção e Exploração Mineral, Prospecção e Pesquisa Mineral ou Métodos de Prospecção. Dessa forma, os egressos da maioria dos cursos de graduação em geologia não tiveram aulas práticas de campo sobre as técnicas de coleta e os cuidados com o posicionamento e a contaminação de amostras, nem um conhecimento aprofundado sobre a amplitude de aplicações dos resultados e das técnicas de prospecção geoquímica. Da mesma forma, e dando sequência a esse papel secundário relegado pela academia à prospecção geoquímica, são raras as pesquisas de mestrado e doutorado direcionadas ao desenvolvimento metodológico e ao tratamento, integração e cartografia de dados geoquímicos com finalidades exploratórias.

Nada disso se compara ao esforço na formação de recursos humanos que foi empreendido a partir de 1969/1970 no Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, com a criação do Departamento de Geoquímica e, em 1973, com a criação do Curso de

Pós Graduação em Geoquímica em nível de Mestrado, que foi imediatamente contratado pelo PLANFAP do Ministério das Minas e Energia e pela Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais (CPRM), para a formação do primeiro grupo de geoquímicos de exploração do Brasil (MATTOSE, 2009). Nesse período, nomes famosos da geoquímica mundial estiveram presentes como instrutores, como: Konrad B. Krauskopf, P.M.D Bradshaw, William K. Fletcher, Alastair J. Sinclair, Graham Closs, dentre outros. Na escassa literatura nacional, merecem destaque os livros de prospecção geoquímica de Licht (1998) e Licht, Mello e Silva (2007).

AS MÚLTIPLAS APLICAÇÕES E USOS DOS DADOS DE PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA

Tudo que existe no interior ou na superfície da Terra – mineral, animal, vegetal ou resíduo – é composto por um ou pela combinação de vários elementos químicos. Tudo que cresce naturalmente ou que é produzido pela ação do homem depende da disponibilidade dos elementos necessários. A existência, qualidade e permanência da vida dependem da disponibilidade de elementos químicos nas proporções e combinações corretas. Em virtude dos processos naturais e das atividades humanas que modificam continuamente a composição química do ambiente, é importante determinar a abundância e a distribuição espacial atuais dos elementos na superfície da Terra de uma maneira muito mais sistemática das que já foram realizadas (DARNLEY et al., 1995).

Esta citação, que abre o relatório do *IGCP Project 259 - A global geochemical database for environmental and resource management*, reflete o espírito que norteia não só a concepção e execução dos levantamentos geoquímicos multielementares em escala nacional, continental e global, mas principalmente o conceito de sua aplicação nos mais diversos setores do conhecimento.

A solidez e a estabilidade dos padrões geoquímicos delineados por levantamentos geoquímicos regionais já foram exaustivamente demonstrados por Smith e Reinmann (2008), Garret et al. (2008), Cicchella et al. (2013) e Birke et al. (2015). Da mesma maneira, é inquestionável a redução de custos promovidos por levantamentos geoquímicos regionais de baixa densidade nos trabalhos de campo e de laboratório.

No que diz respeito a estabelecimento de níveis de referência para diagnósticos e monitoramento ambiental, foi demonstrado que levantamentos geoquímicos de baixa densidade amostral com apenas 1% das amostras coletadas por levantamentos de alta

densidade – semi-detálhe ou detalhe, produzem os mesmos valores de fundo geoquímico ou *background*, e os mesmos padrões de distribuição dos elementos (BIRKE et al., 2008).

Levantamentos geoquímicos já foram realizados em países e regiões do mundo com territórios vastos como a República Popular da China e o conjunto dos países da Comunidade Européia, mas também em países com áreas reduzidas como a Costa Rica e o Uruguai. Em todos eles, os resultados geoquímicos mostraram seu enorme valor na identificação de áreas com potencial para o suprimento de matérias primas minerais, na delimitação de áreas de risco à saúde humana, no estabelecimento da aptidão dos solos para a produção de alimentos, e na localização, diagnóstico e caracterização de áreas submetidas a impactos ambientais. É assim, um instrumento de grande capacidade para dar o suporte necessário a estudos de zoneamento ecológico, social e econômico, por órgãos de planejamento e gestão governamental assim como pela indústria.

Assim, se antes as técnicas de prospecção geoquímica eram exclusivamente dedicadas à localização de depósitos minerais, atualmente encontram aplicação em uma grande quantidade de áreas do conhecimento, não só voltado à geologia, mas também à saúde humana e animal, produção agrícola, diagnóstico e monitoramento ambiental (LICHT, 2001).

Até 2004, todas as iniciativas e propostas de um levantamento sistemático do Brasil nos moldes propostos pelo Projeto IGCP 259/360 fracassaram, devido ao conceito equivocado que ainda predomina em grande parte da comunidade geológica que o uso dos dados geoquímicos é exclusivo para a exploração mineral. No entanto, o SGB, consciente da importância e das múltiplas aplicações dos resultados gerados por levantamentos geoquímicos sistemáticos, não só da exploração mineral, mas também das ciências médicas e ambientais, decidiu iniciar uma cobertura sistemática do território brasileiro seguindo os protocolos do Projeto IGCP-259/360 com o Projeto de Geoquímica de Baixa Densidade do Brasil (CUNHA, 2010). O estágio atual desse levantamento é apresentado nas Figuras 9 e 10. Em paralelo e com finalidades exclusivas de exploração mineral, o SGB vem realizando levantamento geoquímico multielementar que cobre sistematicamente áreas de escudo de grande parte do país.

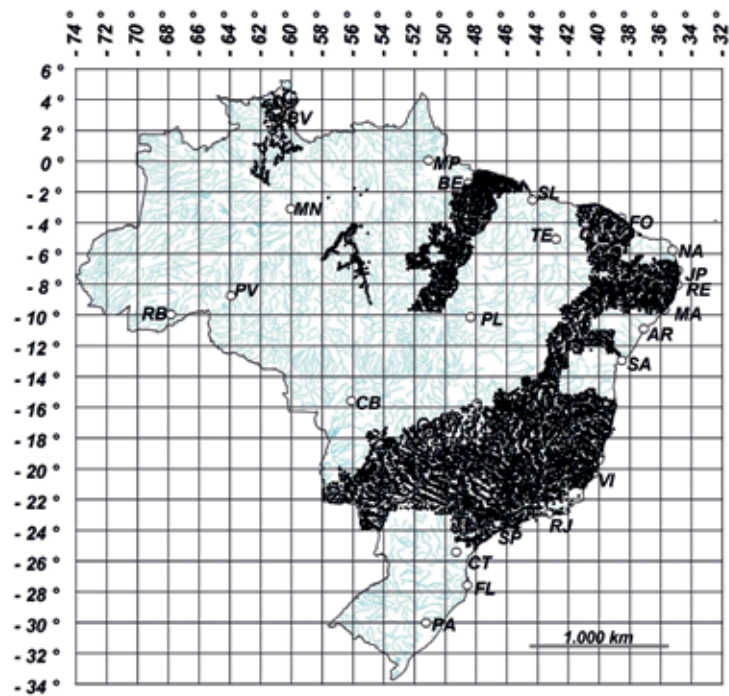


Figura 9 Localização das 17.724 amostras de águas e sedimentos fluviais já coletadas pelo Projeto de Geoquímica de Baixa Densidade do Brasil, em execução pelo Serviço Geológico do Brasil (Fonte: SGB-CPRM, 2015).

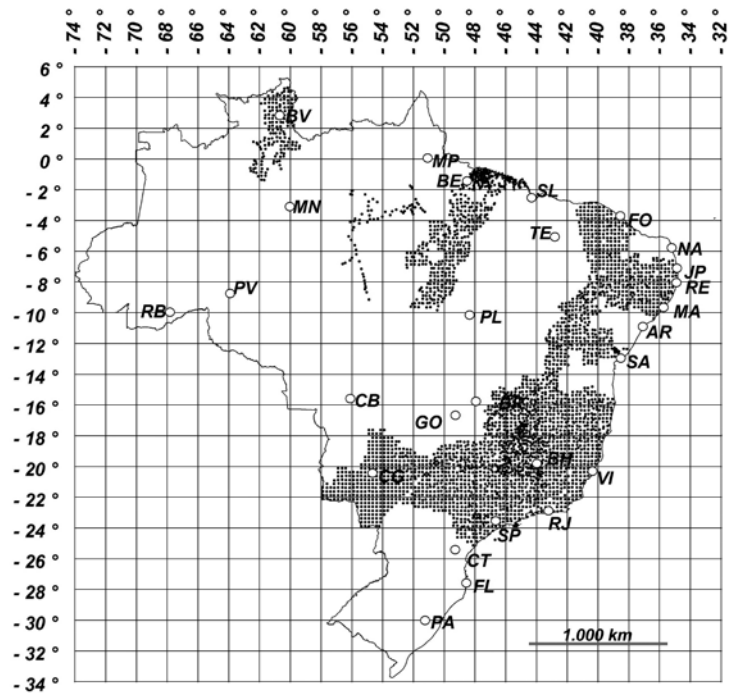


Figura 10 Localização das 4.558 amostras de solo já coletadas pelo Projeto de Geoquímica de Baixa Densidade do Brasil, em execução pelo Serviço Geológico do Brasil (Fonte: SGB-CPRM, 2015).

CONHECIMENTO GEOLÓGICO

Em países dominados por climas tropicais e sub-tropicais, que se caracterizam por densas coberturas vegetais e espessas coberturas inconsolidadas, cuja combinação resulta na escassez de afloramentos, é necessário dispor de técnicas que possam auxiliar os trabalhos de mapeamento geológico, dando indicações das associações de elementos químicos que caracterizam as litologias. Nesse sentido, levantamentos geoquímicos cobrindo grandes áreas e com a análise multielementar de alta sensibilidade são de grande auxílio no mapeamento geológico (MINEROPAR, 2001).

EXPLORAÇÃO MINERAL

Sob a ótica da exploração mineral, é importante considerar que todos os processos mineralizadores são geoquímicos e assim, relegar a exploração geoquímica ao papel secundário de verificação de anomalias geofísicas é um contra senso.

Com grandes bacias de captação e largo espaçamento entre as amostras, um levantamento geoquímico de abrangência nacional não tem a pretensão de descobrir depósitos minerais, exceto nos casos especiais dos de classe mundial. O objetivo de um levantamento nessa escala é estabelecer grandes domínios ou províncias geoquímicas que sirvam de referência para a indústria mineira direcionar seus projetos, interesse e atuação. O direcionamento dos investimentos para as faixas com maior potencial exploratório implica numa grande redução do tempo necessário para a geração de alvos e a descoberta de depósitos minerais. Na etapa seguinte, que compreende levantamentos de maior detalhe é que serão reconhecidas as flutuações de teor, ou contrastes, de grande intensidade que estão associados a depósitos minerais e jazidas de interesse econômico.

DIAGNÓSTICO E GESTÃO AMBIENTAL

Sob o ponto de vista ambiental é urgente que sejam estabelecidas as variações regionais dos conteúdos dos elementos químicos e de compostos orgânicos como BETEX e PAH, em diversos meios amostrais, visto que as autoridades já estão definindo limites legais para a fiscalização da contaminação dos solos e das águas. Pesquisas que orientam e dão suporte a esses marcos legais não podem ser realizados em áreas reduzidas ou arbitrariamente selecionadas ou examinando apenas

parte do problema. É um princípio básico da geoquímica que a concentração natural dos elementos varia segundo o meio amostrado como águas, solos, e sedimentos fluviais. Por exemplo, o horizonte superficial do solo não é o mais adequado para estabelecer valores orientadores, pois pode sofrer contaminação não só da atividade humana próxima, mas de eventos geológicos como plumas vulcânicas, ou climáticos como tempestades de poeira, que ocorreram a milhares de quilômetros. Adicionalmente, a depender da fração analisada de cada um desses meios amostrais e da técnica analítica, haverá também grandes variações de teor. Autoridades governamentais não têm conhecimento dessas variações naturais tão significantes, as quais devem ser consideradas na definição dos limites de ação. Existem inclusive limites de ação que são estabelecidos abaixo das concentrações naturais dos elementos (MINEROPAR, 2001b; LICHT et al., 2006)

As concentrações urbanas e atividades industriais produzem grandes quantidades de resíduos de composição química variada, e que podem permanecer como um estoque geoquímico ambiental por grande período de tempo, degradando-se lentamente e liberando cargas tóxicas que vão produzir severos impactos na saúde da população. Os dados de prospecção geoquímica podem ser utilizados para uma primeira avaliação desses impactos, direcionando pesquisas de maior detalhe que considerem a especiação química e a biodisponibilidade (MIRLEAN et al., 2008; GRIPP, 2012).

A elaboração de atlas geoquímicos e a caracterização de paisagens geoquímicas são temas de importância e que têm merecido interesse crescente da comunidade brasileira, como o Atlas Geoquímico do Estado do Paraná (MINEROPAR, 2001) o Atlas Geoquímico da Folha Curitiba (MINEROPAR, 2001), e o Atlas geoquímico do Vale do Ribeira: geoquímica dos sedimentos ativos de corrente (LOPES JR., 2007).

SAÚDE HUMANA E ANIMAL

São inúmeros os casos de aplicação dos dados produzidos por levantamentos geoquímicos na delimitação de áreas de agravo à saúde e as relações de causa-efeito entre o quimismo ambiental e a saúde humana e animal como a arseniose em Bangladesh, a fluorose dentária e óssea na China, Argentina e Paraná, o kwashiorkor em humanos na Jamaica e a hipocuprose associada à molibdenose no gado, na Escócia (SELINUS et al., 2005).

No Brasil, diversas áreas têm sido pesquisadas com técnicas geoquímicas para caracterizar o risco à saúde humana (CUNHA et al., 1999, 2005; FIGUEIREDO et

al., 2007; SAKUMA et al., 2010; CUNHA et al., 2013 a, b; VIGLIO et al., 2013). Dentre essas, salienta-se a área fluoranômala do Norte Pioneiro, PR, com cerca de 20.000 km², na qual a população infantil em idade escolar, em especial nas áreas rurais, está submetida aos riscos da fluorose dentária por águas subterrâneas enriquecidas em fluoretos. Esse caso é exemplar pois os levantamentos epidemiológicos foram realizados seguindo as orientações e nas áreas anômalas caracterizadas por levantamentos hidrogeoquímicos (LICHT et al., 1996; MORITA et al., 1998; CARDOSO et al., 2001).

A atividade agrícola libera grandes quantidades de resíduos que permanecem nos solos ou são transportados para a rede fluvial. A lenta degradação desses produtos como fertilizantes fosfatados ricos em urânio, pesticidas clorados e bromados pode produzir alterações geoquímicas ambientais, representando sérios riscos para a população. Dados produzidos por levantamentos geoquímicos, em especial hidrogeoquímicos, associados a dados epidemiológicos são instrumentos úteis para caracterizar correlações entre geoquímica e moléstias como é o caso do Cl e Br identificados como indicadores do risco para câncer de fígado e pâncreas no norte do Paraná (LICHT, 2001).

É necessário enfatizar que para que os dados produzidos por levantamentos geoquímicos sejam adequados e aplicáveis às investigações sanitárias e epidemiológicas, no planejamento do levantamento é exigida a participação de profissionais da saúde. Além disso, as técnicas analíticas aplicáveis à saúde são diferentes das exigidas pela indústria mineira, já que devem ser capazes de identificar e quantificar a fração e a espécie química presente na amostra passível de absorção pela cadeia alimentar, especialmente no homem e nos animais de criação.

Cenário futuro

Um levantamento geoquímico regional multielementar é um trabalho tipicamente governamental, por se tratar do conhecimento básico do território e por ter as mais diversas e abrangentes aplicações que vão desde o auxílio a cartografia geológica em regiões com escassez de afloramentos ou densa cobertura vegetal, até a exploração de bens minerais, passando pelos diagnósticos ambientais, a fertilidade do solo e a geologia médica.

Para atender ao planejamento estratégico e tático da indústria mineral, às finalidades e necessidades de suporte aos diagnósticos ambientais, ao planejamento das ações de saúde dentre outros, é necessário que haja uma drástica mudança do Código de Minas, e dos conceitos da propriedade dos dados e amostras

produzidos pelos órgãos de governo e empresas privadas. Essas novas diretrizes legais, que já existem em outros países, favoreceriam a sistematização, organização e uso dos dados produzidos por levantamentos geoquímicos no Brasil e podem ser sintetizados nas seguintes diretrizes:

1. Os levantamentos geoquímicos regionais devem ser padronizados em termos metodológicos e seguir, com as adaptações necessárias, os conceitos e padrões estabelecidos pelos Projetos IGCP 259 - *International Geochemical Mapping* e IGCP 360 - *Global Geochemical Baselines* bem como respeitar as experiências acumuladas pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM) e pelo Serviço Geológico do Paraná (MINEROPAR);
2. Os levantamentos geoquímicos regionais devem contar com rígido controle de qualidade que contemple todas as fases de execução, desde o planejamento de atividades de campo até a divulgação dos resultados;
3. Os levantamentos geoquímicos regionais devem ser abrangentes de forma a contemplar a maioria dos elementos maiores, menores, traço e ultra-traço e idealmente, a maior quantidade possível de espécies químicas (cátions e ânions) e compostos sintéticos como pesticidas e hidrocarbonetos;
4. Após a análise, as amostras devem ser conservadas em instalações adequadas, não só prevendo a retomada no futuro com procedimentos analíticos mais sensíveis, mas também para servir como amostras de referência a outras pesquisas, refletindo as condições da época do levantamento;
5. Cabe às organizações estatais e empresas privadas organizar os resultados dos levantamentos, incluindo o posicionamento e tipo de amostras e os resultados analíticos, em banco de dados que permita a portabilidade e transferência;
6. Resguardado um período de sigilo compatível com os prazos legais das concessões de pesquisa, cópias dos bancos de dados seriam repassadas ao Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) que promoveria o acesso amplo, gratuito e aberto na internet para incentivar seu uso e a disseminação de tecnologia de pesquisa aplicada nas mais diversas áreas do conhecimento. O momento da liberação dos resultados de cada parcela do banco de dados deve ser amplamente divulgado na imprensa nacional de forma a evitar informações privilegiadas.

Em vista da enorme quantidade de aplicações dos resultados gerados por levantamentos geoquímicos, é fundamental que haja uma adequação curricular dos cursos de graduação em geologia, que favoreça não só a compreensão dessa enorme gama de usos, mas também amplie o mercado de trabalho dos futuros geólogos. Existe um grande campo de pesquisas que interessa tanto ao ambiente acadêmico quanto às organizações governamentais e empresas de exploração mineral como, por exemplo, a reanálise de amostras coletadas em projetos de prospecção geoquímica por organizações governamentais e empresas privadas e estudos geoquímicos orientativos.

Os bancos de dados produzidos por levantamentos realizados em décadas passadas têm uma capacidade de investigação muito restrita, seja pela pequena quantidade de elementos analisados, seja pelos altos limites inferiores de detecção das técnicas analíticas adotadas na época. A recuperação de arquivos de amostras desses antigos levantamentos geoquímicos para reanálise com uma combinação de técnicas modernas de determinação multielementar e de grande sensibilidade, como fluorescência de raios X para óxidos maiores,

espectrometria de plasma induzidos ICP-OS e ICP-MS para elementos menores, traço e ultra-traço, eletrodo de íon específico para flúor e análise por fusão para metais preciosos como Au, Pt e Pd, ampliará a sua capacidade de investigação com a geração de bancos de dados geoquímicos padronizados e homogêneos e multielementares. Além do mais, essa reanálise implicaria numa enorme economia de recursos financeiros já que um forte componente dos custos de projetos de prospecção geoquímica decorre dos trabalhos de campo para coleta de amostras.

A técnica para a produção de amostras compostas a partir dos arquivos de alíquotas de levantamentos de prospecção geoquímica realizados pela MINEROPAR e pelo SGB-CPRM, por meio de uma malha regular com células de 5' x 5', ou aproximadamente 8 km x 8 km está sendo pesquisada em parte do Escudo do Paraná. As 148 amostras compostas, cada qual localizada no centro de uma célula, foram obtidas a partir de 9.050 amostras originais e foram submetidas à análise química por uma combinação de técnicas analíticas para determinação de 50 elementos. Esta pesquisa de mestrado em execução tem como ob-

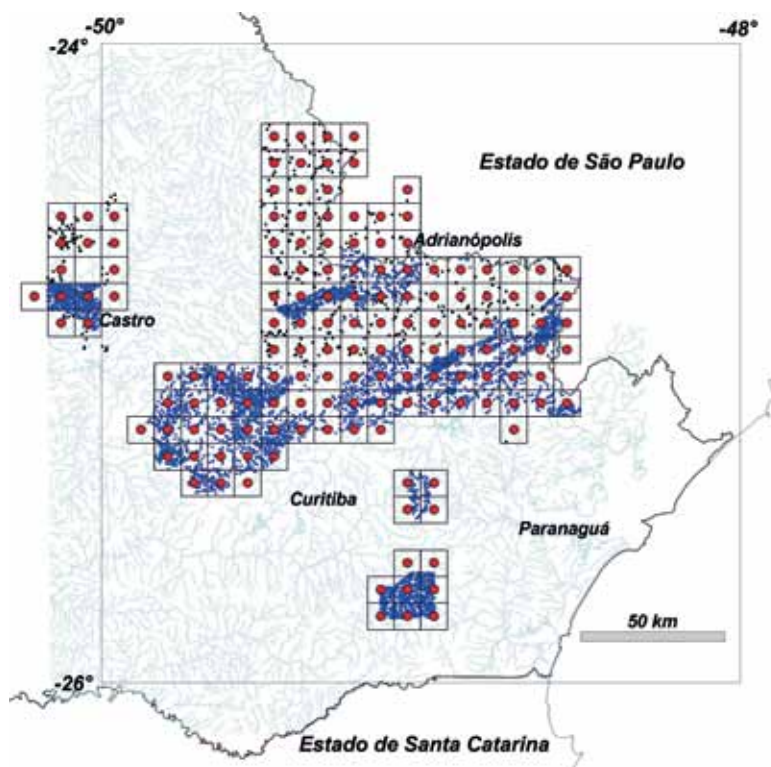


Figura 11 As 148 amostras compostas (círculos vermelhos) obtidas a partir de 9.050 amostras originais armazenadas nos bancos de alíquotas de projetos antigos da Mineropar (pontos azuis) e do SGB-CPRM (pontos pretos); as células têm 5' x 5' ou cerca de 8 km x 8 km. Algumas células foram descartadas pela pequena quantidade de amostras contidas. (Fonte: CRISIGIOVANNI, 2015, pesquisa de mestrado em andamento).

jetivos mostrar que redução da densidade amostral preserva as estruturas geoquímicas delineadas com densidade amostral elevada e identificar novos alvos exploratórios com a determinação de elementos não analisados nas amostras originais (CRISIGIOVANNI, 2015) (Figura 11).

São escassos os estudos geoquímicos orientativos abrangendo diferentes modelos e tipos de depósitos minerais em diversos ambientes fisiográficos e climáticos. Essas pesquisas devem abordar questões como os meios amostrais, as frações granulométricas, as técnicas analíticas e o espaçamento amostral mais adequados e eficientes para a identificação de alvos exploratórios. A identificação de novos meios amostrais como águas superficiais e subterrâneas, vegetais, gases e vapores de elementos voláteis, aumentaria a profundidade de investigação em regiões com espessas coberturas inconsolidadas ou de rochas mais jovens ou com densas florestas tropicais.

CONCLUSÕES

Historicamente, é impossível negar a importância e o sucesso que as técnicas de prospecção geoquímica desempenharam na identificação de depósitos minerais, no Brasil e no mundo. Ressalta-se a necessidade das empresas de mineração investir em técnicas de prospecção geoquímica (à luz da nova legislação que considera pesquisa e desenvolvimento como investimento) e a obrigação que o governo federal tem, através do Serviço Geológico do Brasil, de manter e acelerar o Projeto de Geoquímica de Baixa Densidade do Brasil com adoção de técnicas analíticas multielementares e com baixíssimos limites de detecção e que tem, entre a ampla gama de produtos, a delimitação de grandes cinturões geoquímicos - metalogenéticos do território brasileiro. Da mesma maneira, cabe aos organismos governamentais estaduais, a realização de levantamentos de maior detalhe buscando aprofundar o conhecimento das potencialidades minerais de seus territórios bem como promover as múltiplas aplicações e usos dos dados geoquímicos.

A geração de alvos exploratórios dos mais diversos bens minerais exige que os dados geoquímicos produzidos por levantamentos de escala nacional e regional sejam interpretados em conjunto com os dados produzidos por levantamentos geofísicos, imagens de sensores remotos e mapeamento geológico de detalhe, visando reduzir os riscos e aumentar a eficiência do processo de exploração mineral.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao geólogo Luiz Fernando Magalhães pela cessão dos dados de prospecção geoquímica da METAGO, aos geólogos Cássio Roberto da Silva e Fernanda Cunha, do SGB-CPRM, pelo envio das coordenadas das amostras do Levantamento Geoquímico Multiuso do Brasil, ao geólogo Eric Santos Araújo pelo envio das coordenadas das amostras geoquímicas do Projeto Geofísica Brasil-Canadá PGBC, ao geólogo Duílio Rondinelli pela identificação das cartas 1:50.000 abrangidas pelo Programa ProMinério IPT-SP, ao geólogo Rafael Avena Neto, Diretor Técnico da CBPM, pelo envio das coordenadas das amostras coletadas pela empresa e ao geólogo Fabio Luigi Crisigiovanni pela cessão de dados de pesquisa de mestrado em andamento no Escudo Paranaense.

REFERÊNCIAS

- AGRICOLA, G. *De Re Metallica*. HOOVER, H.C.; HOOVER, L.H. (Trad.). 1556. Dover Publ. Inc. New York. 1912.
- BIRINGUCCIO, V. *De la pirotechnia*. SMITH, C.S.; GNUDI, M.T. (Trad.). 1540. Am. Inst. Min. Met. Eng. New York. 1942.
- BIRKE, M.; RAUCH, U.; STUMMEYER, J. How robust are geochemical patterns? A comparison of low and high sample density geochemical mapping in Germany. *J. Geochem. Explor.*, v. 154, p. 105-128. 2015.
- BIRKE, M.; RAUCH, U.; RASCHKA, M. Geochemischer Atlas von Deutschland. *Berichte der geologischen Bundesanstalt*, Wien, v. 77, p. 13-15. 2008.
- CARDOSO, L.M.; MORITA, M.C.; LICHT, O.A.B.; ALVES, J.C. Anomalia hidrogeoquímica e a ocorrência de fluorose dentária em Itambaracá – PR. In: VIII Congresso Brasileiro de Geoquímica e I Simpósio de Geoquímica dos Países do MERCOSUL. SBGq. Curitiba, *Resumos*, 2001. [CD-ROM].
- CICCHELLA, D.; LIMA, A.; BIRKE, M.; DEMETRIADES, M.; WANG, X.; De VIVO, B.; Mapping geochemical patterns at regional to continental scales using composite samples to reduce the analytical costs. *J. Geochem. Explor.*, v. 124, n. 1, p. 79-91. 2013.
- CRISIGIOVANNI, E.L. Geoquímica multielementar de sedimentos fluviais ativos no escudo paranaense. In: XVIII Seminário do Programa de Pós-Graduação em Geologia, UFPR. *Boletim de resumos*. p. 31. 2015. Disponível em: <<http://www.posgeol.ufpr.br/home/wp-content/uploads/2015/09/RESUMOS-Semin%C3%A1rios.pdf>>. Acesso em 18 de outubro de 2015.
- CUNHA, F.G. Levantamento Geoquímico de Baixa densidade no Brasil. In: 45º Congresso Brasileiro de Geologia-Desenvolvimento e mudanças globais, 2010, Belém (PA).
- CUNHA, F.G.; FIGUEIREDO, B.R.; PAOLIELLO, M.M.B.; CAPITANI, E.M. de; SAKUMA, A.M. Human and environmental lead contamination in the upper Ribeira Valley southeastern Brazil. *Terrae* (Campinas), v. 2, p. 28-36. 2005.
- CUNHA, F.G.; MACHADO, G.J.; CAVALCANTI, E.M. Dispersão do chumbo, arsênio, cádmio e flúor em água superficial no Estado do Rio de Janeiro e implicações na saúde pública. In: VII Congresso Brasileiro de Geoquímica / V Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Porto Seguro. p. 122-123. 1999.
- CUNHA, F.G.; PESSANHA, L.A.C.; SHINTAKU, I. Ocorrência de arsênio em sedimentos de corrente no estado do Espírito Santo. In: XIV Congresso Brasileiro de Geoquímica/Simpósio Latino-Americano de Mapeamento Geoquímico, Diamantina - MG. 2013a.
- CUNHA, F.G.; PESSANHA, L.A.C.; SHINTAKU, I. Fluoretos em água superficial no estado do Espírito Santo. In: XIV Congresso Brasileiro de Geoquímica/Simpósio Latino-Americano de Mapeamento Geoquímico, Diamantina - MG. 2013b.
- DARNLEY, A.G.; BJÖRKLUND, A.J.; BØLVIKEN, B.; GUSTAVSON, N.; KOVAL, P.V.; PLANT, J.A.; STEENFELT, A.; TAUCHID, M.; XUEJING, X. A global geochemical database for environmental and resource management: recommendations for international geochemical mapping. *Science Report* 19, UNESCO, Paris. 122 p. 1995.
- FIGUEIREDO, B.R.; BORBA, R.P.; ANGÉLICA, R.S. Arsenic occurrence in Brazil and human exposure. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 29, n. 2, p. 109-118. 2007.
- GARRETT, R.G.; REIMANN, C.; SMITH, D.B.; XUEJING, X. From geochemical prospecting to international geochemical mapping: a historical overview. *Geochem. Explor. Environ. Anal.*, v. 8, n. 3-4, p. 205-217. 2008.
- GRIPP, M.R. *Indicação geoquímica do desenvolvimento urbano-industrial em cidade portuária (Rio Grande – RS)*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, FURG. 2012.
- LEVINSON, A.A. *Introduction to Exploration Geochemistry*. Maywood, Applied Publ., 605 p. 1974.
- LICHT, O.A.B. *Prospecção Geoquímica - Princípios, técnicas e métodos*. Rio de Janeiro: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. v. 1. 216 p. 1998.
- LICHT, O.A.B. *A geoquímica multielementar na gestão ambiental. identificação e caracterização de províncias geoquímicas naturais, alterações antrópicas da paisagem, áreas favoráveis à prospecção mineral e regiões de risco para a saúde no Estado do Paraná, Brasil*. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia, UFPR. v. 2, 2001.
- LICHT, O.A.B.; BRANCO, P.C.A. Primórdios da Prospecção Geoquímica. In: LICHT, O.A.B.; MELLO, C.S.B.; SILVA, C.R. (Eds.). *Prospecção geoquímica: Depósitos Minerais Metálicos, Não metálicos, Óleo e Gás*. 1. ed. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geoquímica - SBGq, p. 13-96. 2007.
- LICHT, O.A.B.; MELLO, C.S.B.; SILVA, C.R. (Eds.). *Prospecção geoquímica: Depósitos Minerais Metálicos, Não metálicos, Óleo e Gás*. 1. ed. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geoquímica - SBGq. 788 p. 2007.
- LICHT, O.A.B.; MORITA, M.C.; TARVAINEN, T. A utilização de dados de prospecção geoquímica de fluorita do Primeiro Planalto Paranaense na identificação de áreas de interesse para a saúde pública – uma abordagem preliminar. *Geochimica Brasiliensis*, v. 10, n. 1, p. 57-69. 1996.
- LICHT, O.A.B.; XUEJING, X.; QIN, Z.; MYAZAWA, M.; FERREIRA, F.J.F.; PLAWIAK, R.A.B. Average Reference values of geochemical and geophysical variables in stream sediments and soils, State of Paraná, Brazil. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 58, p. 59-87. 2006.
- LOPES JR., I. *Atlas geoquímico do Vale do Ribeira: geoquímica dos sedimentos ativos de corrente*. 2. ed. rev. São Paulo: CPRM. 2007. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/atlas_geoq_apre.pdf>. Acesso em 19 de outubro de 2015.
- MATTOSO, S.Q. *Algumas notas sobre os primeiros trabalhos de prospecção geoquímica na Bahia*. 2009. Disponível em: <<http://exploracaogeoquimica.blogspot.com.br/2009/09/serie-memorias-geoquimicas-por-sylvio-q.html>>. Acesso em 18 de outubro de 2015.

-
- MELCHER, G.C. Geochemical exploration in the rio Ribeira do Iguape lead district, Brazil. In: Symposium de Exploración Geoquímica Internacional, v. 3. 20º Congreso Internacional de Geología. México, p. 585-596. 1956.
- MINEROPAR. *Atlas geoquímico do Estado do Paraná*. 1 ed. Curitiba: Minerais do Paraná S.A. - MINEROPAR. v. 1, 71 p. 2001a.
- MINEROPAR. *Atlas geoquímico da Folha Curitiba*. 1 ed. Curitiba: Minerais do Paraná S.A. - MINEROPAR. v. 1, 67 p. 2001b.
- MINEROPAR. *Geoquímica de solo – horizonte B. Relatório Final do Projeto*. Curitiba: Minerais do Paraná S.A. - MINEROPAR. v. 2. 2005.
- MIRLEAN, N.; BAISCH, P.; MACHADO, I.; SHUMILIN, E. Mercury contamination of soil as the result of long-term phosphate fertilizer production. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 81, p. 305-308. 2008.
- MORITA, M.C.; CARRILHO, A.; LICHT, O.A.B. Use of geochemistry data in the identification of endemic fluorosis áreas. In: 1st World Congress of Health and Urban Environment. Madrid, Ayuntamiento de Madrid. *Abstracts*, 244 p. 1998.
- ROSE, A.W.; HAWKES, H.E.; WEBB, J.S. *Geochemistry in Mineral Exploration*. New York, Academic Press, 2 Ed., 657 p. 1979.
- SAKUMA, A.M.; CAPITANI, E.M. de; FIGUEIREDO, B.R.; MAIO, F.D. de; PAOLIELLO, M.M.B.; CUNHA, F.G. da.; DURAN, M.C. Arsenic exposure assessment of children living in a lead mining area in Southeastern Brazil. *Cadernos de Saúde Pública* (ENSP. Impresso), v. 26, p. 391-398. 2010.
- SELINUS, O.; ALLOWAY, B.; CENTENO, J.A.; FINKELMAN, R.B.; FUGE, R.; LINDH, U.; SMEDLEY, P. (Eds.). *Essentials of Medical Geology*. Elsevier, Amsterdam, 820 p. 2005.
- SERGEEV, E.A. Geochemical of prospecting for ore deposits. *Materialy Vsesoinuznogo Nauchno-Issledovale' skogo Geologicheskogo. Instituta Geofizika, sbornik 9-10, st. 3-55*. SOKOLOFF, V.P. (Trad.). 1941. In: Selected Russian papers on geochemical prospecting for ores. *U.S. Geol. Survey*, p. 15-87. Feb. 1950.
- SGB-CPRM - Serviço Geológico do Brasil. *Projeto de Geoquímica de Baixa Densidade do Brasil*. 2015. (em desenvolvimento)
- SMITH, D.B.; REIMANN, C. Low-density geochemical mapping and the robustness of geochemical patterns. *Geochem. Explor. Environ. Anal.*, v. 8, n. 3-4, p. 219-227. 2008.
- VIGLIO, E.P.; CUNHA, F.G.; ANJOS, J.A.S.A. Characterization of contamination of anthropogenic origin associated with Pb in Santo Amaro, Bahia, Brazil. In: 5th International Conference on Medical Geology, 2013, Arlington. Disponível em: <<https://gsa.confex.com/gsa/2013MED/webprogram/Paper220929.html>>. Acesso em 18 de outubro de 2015.

Integração de dados & exploração mineral

Carlos Roberto de Souza Filho

Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas

Adalene Moreira Silva

Instituto de Geociências, Universidade de Brasília

RESUMO

A integração de dados digitais visando a definição de alvos exploratórios nas escalas continental, regional e de distrito é uma atividade fundamental para o progresso da indústria mineral global. Numerosas técnicas matemáticas e estatísticas e programas computacionais foram desenvolvidos, principalmente a partir da década de 1980, para o reconhecimento de padrões em dados espaciais, permitindo uma utilização eficaz dos dados de exploração gerados cumulativamente por empresas governamentais e privadas. A expansão da exploração mineral e da mineração têm demandado o desenvolvimento contínuo de técnicas exploratórias que sejam ambientalmente neutras e que visem uma redução do custo e tempo investidos nessas atividades. Nesse contexto, esse artigo objetiva fornecer uma visão sinóptica da evolução, estado da arte e tendências futuras sobre a integração de dados voltados à prospecção mineral.

Palavras-chave Integração de dados. Modelagem espacial. Potencial mineral. Exploração mineral, Spatial Data Modeler (SDM).

INTRODUÇÃO

Esse artigo compreende uma síntese, com viés histórico, sobre os principais métodos de integração de dados, opções de plataformas computacionais para modelagem espacial, assim como tendências e cenários futuros do uso de tecnologias de integração em exploração mineral.

A integração de dados voltada à exploração tem como principal objetivo a geração de mapas de prospectividade mineral, também denominados de mapas de potencial ou favorabilidade mineral (BONHAM-CARTER, 1994). O mapeamento da prospectividade mineral baseado em modelos previsionais objetiva, com o apoio de recursos computacionais, reduzir áreas-alvo para a exploração mineral *greenfield* e *brownfield*, que variam da escala regional para a escala de depósito (HRONSKY; GROVES, 2008; PORWAL; CARRANZA, 2015). Neste contexto, a análise integrada de dados geológicos, geofísicos, geoquímicos e de sensoriamento remoto é utilizada para a geração de um modelo prospectivo para determinados bens minerais, que serve de subsídio para a definição de áreas favoráveis para a exploração mineral em contextos geológicos variáveis (CARRANZA, 2009; RAJESH, 2004).

Um modelo de prospectividade mineral é fundamentalmente uma função de integração que relaciona um conjunto de características geológicas com a localização e assinatura de um determinado alvo (ocorrências e/ou depósitos minerais conhecidos). As características geológicas de entrada no modelo são consideradas *proxies* ou análogos espaciais dos processos de mineralização e denominadas de mapas evidenciais (Figura 1). As funções de integração utilizadas na modelagem

variam de aritmética simples ou operadores lógicos até funções matemáticas complexas (CARRANZA et al., 2008; CARRANZA, 2009; CARRANZA, 2011a,b; PORWAL; CARRANZA, 2015).

Existem duas correntes de raciocínio para avaliação da prospectividade mineral. Os modelos são classificados entre aqueles dirigidos pelo conhecimento (*knowledge-driven*) e aqueles dirigidos pelos dados (*data-driven*), dependendo da forma como são derivados os parâmetros da função de integração (BONHAM-CARTER, 1994). No método *knowledge-driven*, os parâmetros são estimados de forma heurística, considerando-se o conhecimento de um ou mais especialistas no tipo de mineralização sob investigação. Esse método é executado sem o uso de pontos de treinamento. Sua aplicação não é limitada a situações onde há conhecimento prévio da localização de depósitos de interesse. No método *data-driven*, os parâmetros são determinados de forma empírica, levando-se em conta as relações espaciais e estatísticas entre depósitos conhecidos e os mapas evidenciais. Nesse caso, o uso de pontos de treinamento é imperativo para o sucesso do método. Ambos os modelos são normalmente implementados utilizando-se ferramentas disponíveis em Sistemas de Informações Georreferenciadas (SIG).

A figura 1 ilustra um conjunto de dados exploratórios tipicamente utilizado no mapeamento da prospectividade mineral na escala regional e o produto de sua integração, que equivale a um mapa, gerado por algoritmos possibilísticos ou probabilísticos, onde uma pequena fração da área total investigada é assinalada como de maior e menor potencial prospectivo para determinado bem mineral (e.g. NYKÄNEN; OJALA, 2007).

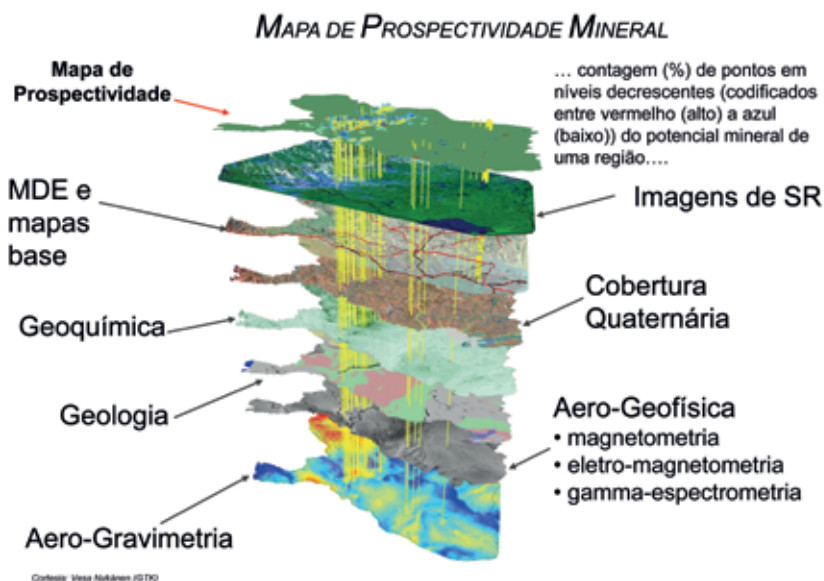


Figura 1 Conjunto de dados tradicionalmente utilizados na geração de mapas de prospectividade mineral. Em muitos países, incluindo o Brasil, esses dados são disponibilizados pelos Serviços Geológicos para trabalhos na escala regional. Nessa escala, um dos principais objetivos da integração de dados é reduzir de forma significativa a área de busca para determinado bem mineral (Fonte: NYKÄNEN, 2008).

ANÁLISE DE PROSPECTIVIDADE MINERAL: MODELO DIRIGIDO PELO CONHECIMENTO

O roteiro mais simples para análise de prospectividade pelo método dirigido pelo conhecimento envolve o delineamento de áreas com potencial mineral variável considerando-se a experiência do geólogo ou do time de exploração no problema e a interpretação de dados geológicos, geofísicos, de sensoriamento remoto e geoquímicos disponíveis. O resultado é a produção de polígonos que representam alvos potenciais para exploração mineral e possibilidades ou cenários para investimento em áreas de *greenfield* ou *brownfield*. A avaliação de alvos é tipicamente guiada por um modelo genético conceitual, dados exploratórios históricos e características geológicas de depósitos conhecidos na mesma região ou em terrenos geologicamente similares àquele sob investigação. Esse método é intuitivo e rápido, mas cercado de tendências, subjetividade e de difícil reprodução. É guiado principalmente por modelos concebidos na escala de depósito e, portanto, menos efetivo quando transferido para escala regional. Nesse caso, dados aerogeofísicos de alta densidade de amostragem e de sensoriamento remoto podem auxiliar na diminuição de ambiguidades, pois são empregados para geração de produtos que auxiliam na cartografia

geológica e geração de vetores de exploração. Quando utilizados em áreas *greenfield*, é de extrema importância que a interpretação dos dados geofísicos e espectrais e a sua integração com a geologia leve em consideração as propriedades físicas das rochas, tais como densidade, susceptibilidade magnética, condutividade e reflectância ou emissividade espectral. Isso reforça o elo entre a geofísica, a espectroscopia e a geologia, ressalta a variação mapeada em dados geofísicos e espectrais e pode indicar uma mudança na propriedade física estudada, que por sua vez é reflexo de mudança no contexto geológico. Os resultados geram camadas evidenciais que permitem a construção de modelos prospectivos que indicam corredores ou novas áreas com potencial metalogenético.

Uma das principais fontes de erro da análise de prospectividade dirigida pelo conhecimento é a escolha (equivocada ou incompleta) das feições que compõem a assinatura de um determinado depósito e que são utilizadas como mapas evidenciais. Por exemplo, os depósitos de ouro do Quadrilátero Ferrífero (QF) têm uma conhecida associação a formações ferríferas bandadas (FFBs) do tipo Algoma compreendidas no *greenstone belt* arqueano Rio das Velhas. Os depósitos representam uma pequena parte (< 3km²) de um sistema de mineralização, que pode se estender por dezenas ou centenas de quilômetros, em escala de distrito ou

regional, respectivamente. Os modelos de prospectividade mais antigos para esse cinturão consideravam as FFBs como as rochas de potencial singular para hospedar mineralizações. Esse modelo, entretanto, mostrou-se incompleto, pois muitos depósitos de Au do tipo *lode* do QF estão associados a múltiplas rochas hospedeiras, diferentes estilos de alteração hidrotermal e obedecem a outros tipos de controles (e.g. zonas de cisalhamento). Isso implica em propriedades físicas, químicas e espectrais distintas, que não podem ser consideradas em um mesmo modelo (TEIXEIRA et al., 2006). Numerosos novos depósitos e prospectos situados na porção NE do QF jamais seriam descobertos com base naquele modelo inicial, evidenciando o problema da escolha de critérios exclusivamente subjetivos na análise de prospectividade.

ANÁLISE DE PROSPECTIVIDADE MINERAL: MÉTODO DIRIGIDO PELOS DADOS

Uma das primeiras grandes mudanças de paradigma para análise de prospectividade foi a incorporação de técnicas de modelagem estatística. Nas décadas de 1960 e 1970, um grupo liderado por geólogos americanos e canadenses iniciou uma série de trabalhos utilizando ferramentas de estatística na análise de prospectividade mineral, fomentados pela necessidade de minimizar a subjetividade dos modelos tradicionais e torná-los reproduzíveis entre vários cenários. Nessa fase, a técnica basicamente envolvia um modelo de regressão simples dirigido pelos dados para estabelecer a relação entre depósitos minerais conhecidos e feições geológicas em áreas de controle em uma região. A aplicação do modelo estatístico concebido visava determinar a probabilidade de ocorrência de novos alvos em terrenos pouco conhecidos ou inexplorados. Entretanto, na imensa maioria dos casos, os dados não eram processados e integrados de forma espacializada.

SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEORREFERENCIADAS VS ANÁLISE DE PROSPECTIVIDADE

Com o advento dos Sistemas de Informações Georreferenciadas (SIG) comerciais na década de 1980, houve um aumento significativo no uso de modelos dirigidos pelo conhecimento e, principalmente, daqueles baseados em estatística na análise da prospectividade mineral (PARTINGTON, 2010). Na medida em que o SIG permite uma ligação dinâmica entre feições espaciais

e uma tabela de atributos, isso possibilita a aplicação de modelos estatísticos e computacionais tanto para dados tabulares, quanto para dados espacializados (SETIJADJI; WATANABE, 2005).

No final da década de 1980, um grupo liderado por G.F. Bonham-Carter e F.P. Agterberg, do Serviço Geológico Canadense, implementaram o método Bayesiano denominado peso de evidências (ou ponderação por evidências, ou *weights of evidence* - WofE), disponibilizando algoritmos numa plataforma de SIG para a análise de prospectividade mineral. O WofE (BONHAM-CARTER, 1994) compreende um modelo probabilístico que utiliza a teoria da probabilidade condicional para quantificar a associação espacial entre um conjunto de mapas evidenciais e depósitos minerais conhecidos. A técnica é a forma log-linear do teorema de Bayes e inclui as etapas do cálculo da probabilidade *a priori* e *a posteriori*, o estabelecimento de pesos positivos e negativos para cada evidência relativa às ocorrências minerais e medidas da incerteza do modelo. O WofE é capaz de lidar com dados incompletos, é intuitivo, de fácil uso e compreensão, e continua sendo um dos modelos matemáticos mais amplamente aplicados na exploração mineral. O método, entretanto, pode produzir resultados duvidosos em situações onde os dados de entrada são altamente correlacionados.

Na década de 1990 e início de 2000, com a popularidade do SIG e a possibilidade de seu uso em computadores pessoais, houve um aumento expressivo no uso de modelos computacionais para análise de prospectividade mineral. Modelos *knowledge-driven* baseados em Lógica Fuzzy (ou lógica difusa ou nebulosa), na teoria da crença de Dempster-Shafer e na Lógica Booleana foram amplamente utilizados no mundo todo para geração de mapas de prospectividade. Os modelos modernos dessa natureza envolvem ferramentas matemáticas e computacionais elegantes e que visam diminuir o impacto da subjetividade do especialista, mas definitivamente não a excluem.

No final da década de 1990, análises de prospectividade baseadas em inteligência artificial, antes restritas a programas de consulta interativa (e.g. programa Prospector), foram também implementadas em plataformas de SIG (e.g. NOBREGA; SOUZA FILHO, 2003; SOUZA FILHO; LEITE, 2009a,b). As RNAs compreendem técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado no raciocínio humano. São formadas por elementos de processamento denominados neurônios, que compreendem funções matemáticas interconectadas por meio de ligações relacionadas a coeficientes numéricos, denominados pesos sinápticos. Estes pesos mostram a intensida-

de de cada conexão e tendem a ser alterados a fim de adaptar, da melhor forma possível, o modelo aos dados. De maneira geral, as camadas relacionadas às RNAs são classificadas em três grupos: (a) a camada de entrada, compreendendo os vetores de entrada (planos de informação); (b) a(s) camada(s) oculta(s), na(s) qual(is) uma determinada função irá estabelecer uma conexão ponderada entre os neurônios da camada de entrada e de saída; (c) a camada de saída, que compreende o mapa de prospectividade mineral. O uso de RNAs na análise de prospectividade sempre despertou o interesse de geólogos pois, em muitos casos, fornecem resultados similares ou superiores ao WofE (e.g. MAGALHÃES & SOUZA FILHO, 2012). Outro ponto importante é que a análise não é comprometida em função da existência de dependência condicional (correlação) entre as variáveis de entrada. A RNA também é capaz de lidar com dados ruidosos. Entretanto, as RNAs têm suas limitações. Ao contrário da Lógica Fuzzy e WofE, os parâmetros utilizados não são de simples compreensão, nem tampouco a percepção dos pesos que a rede atribui aos mapas evidenciais. Ademais, para que as RNAs funcionem plenamente, um número significativo de pontos de treinamento (depósitos minerais conhecidos) é requerido. Para o treinamento de algumas redes é necessária ainda a indicação de ocorrências ou depósitos minerais que não possuam uma associação espacial com o bem mineral sob investigação. As RNAs demandam muito tempo de processamento, com um alto custo computacional, o que implica na necessidade de uso de computadores com especificações bem mais robustas que um computador pessoal comum. Estudos mais recentes nesse campo incluem o uso de programação genética (*genetic programming*), máquinas de suporte vetorial (*support vector machines*), floresta randômica (*random forest*) e aprendizado profundo (*deep learning*). Essas técnicas apresentam possibilidades para transpor certas limitações das RNAs mais tradicionais. Além das RNAs supervisionadas, existem ainda redes não-supervisionadas, entre as quais destacam-se o agrupamento fuzzy (*fuzzy clustering*) e os mapas auto-organizáveis (*self-organizing maps*) (LEITE; SOUZA FILHO, 2010).

O PROGRAMA SPATIAL DATA MODELER (SDM)

Os avanços em SIG situam-se não somente na disponibilidade de novas técnicas de análise espacial de dados e de algoritmos matemáticos, mas, principalmente, na conversão destes em programas com interação mais simples e amigável com o usuário final. Apesar das possibilidades oferecidas por programas comerciais, o software denominado *Arc-Spatial Data Modeler* (ArcSDM, ou simplesmente SDM) foi o que mais se destacou entre usuários da comunidade acadêmica, órgãos de governo (serviços geológicos) e na indústria mineral. O ArcSDM foi inicialmente desenvolvido por Graeme Bonham-Carter/Laura Kemp (GSC), em conjunto com Gary. Raines e Don Sawatzky (USGS), sob patrocínio dos serviços geológicos do Canadá e EUA e empresas de mineração. O núcleo dos códigos mais recentes foi desenvolvido por Don Sawatzky. As componentes de redes neurais do SDM foram desenvolvidas sob a liderança de Carl Looney da Universidade de Nevada, Reno. O software tem sido disponibilizado gratuitamente desde suas primeiras versões. Atualmente, o SDM é mantido e desenvolvido sob a responsabilidade do Grupo de Geotecnologias da UNICAMP.

O SDM fornece as ferramentas para aplicação de vários métodos de análise espacial na avaliação de favorabilidade mineral, entre os quais a Lógica Fuzzy, peso por evidências (WofE), regressão logística e redes neurais (duas supervisionadas: RBFLN (*radial basis functional link net*) e PNN (*probabilistic neural net*); e uma não supervisionada: *Fuzzy Clustering*).

No Brasil, grande parte dos cursos de graduação e pós-graduação de Geologia fazem uso do SDM e de ferramentas de integração de dados disponíveis em SIGs. A CPRM e diversas empresas privadas do setor mineral nacional utilizam sistematicamente Lógica Fuzzy e WofE na composição de mapas de prospectividade regionais. Quadro análogo é observado em vários países do exterior, com destaque para os serviços geológicos e empresas baseadas nos EUA, Canadá, Austrália e Finlândia. Numerosos exemplos de sucesso de aplicação desses métodos existem no país. Entre os mais recentes e tornados públicos, pode-se citar os trabalhos de Magalhães e Souza Filho (2012), Costa-Silva et al. (2012) e Andrade et al. (2015).

A figura 2 ilustra como são articuladas as várias fases para a geração de um modelo de prospectividade utilizando o SDM como plataforma de integração.

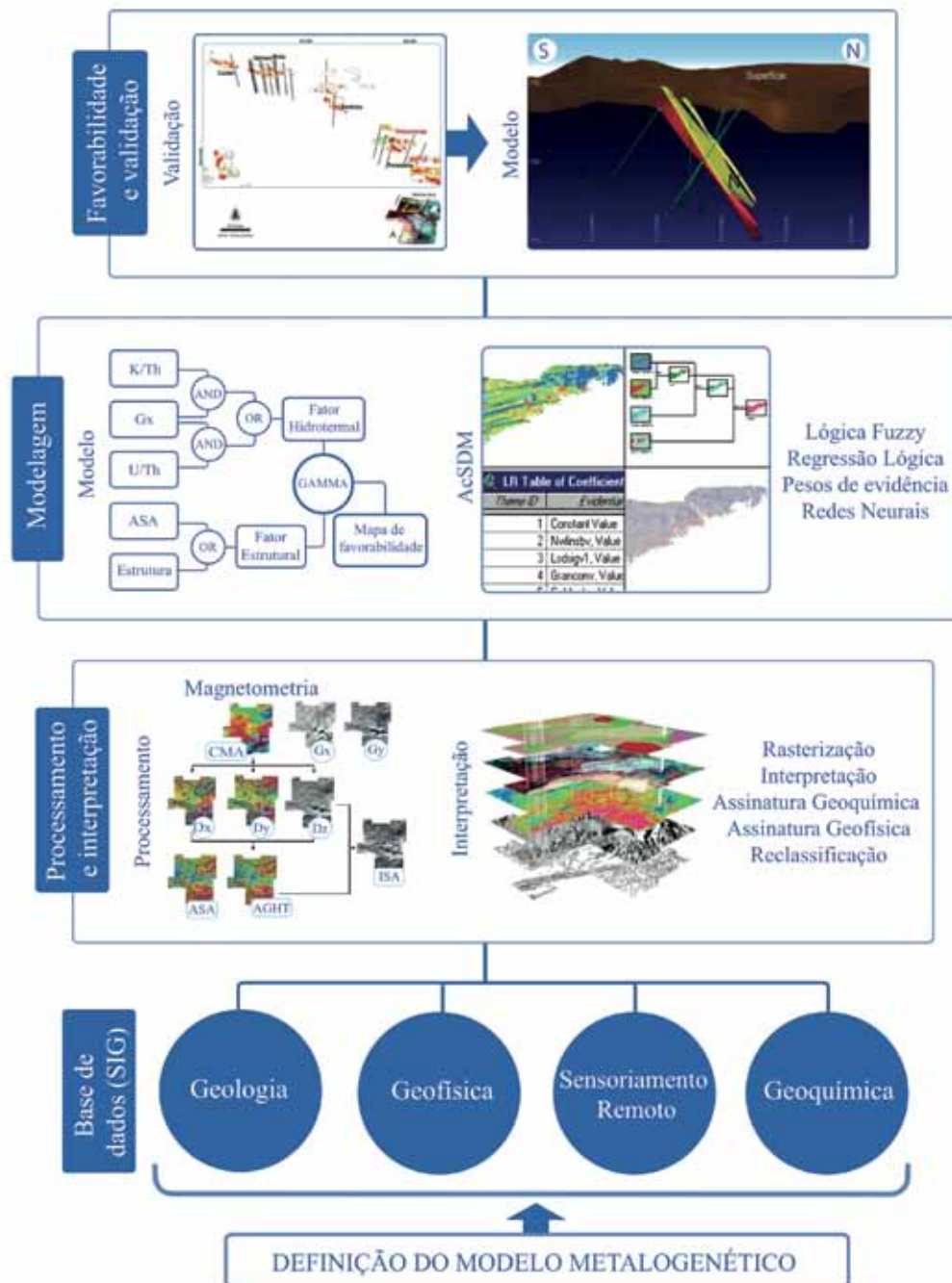


Figura 2 Sistematização para a geração de mapas de prospectividade mineral: (i) modelagem conceitual dos depósitos minerais investigados, identificação dos possíveis mapas evidenciais de entrada e formatação da base de dados em ambiente SIG. (ii) processamento, no SIG, do conjunto de dados exploratórios disponíveis, visando a obtenção de mapas evidenciais adequados ao modelo do depósito mineral adotado. (iii) integração dos mapas evidenciais utilizando modelos matemáticos disponíveis no software SDM. (iv) geração do mapa de prospectividade, reduzindo substancialmente as áreas de maior interesse exploratório e classificando-as entre aquelas de maior e menor prioridade para *follow-up*. (v) validação do modelo através de campanhas de sondagem e geoquímica de detalhe (Fonte: COSTA-SILVA et al., 2012, modificado).

TENDÊNCIAS: A ABORDAGEM DE SISTEMAS MINERAIS PARA O MAPEAMENTO DA PROSPECTIVIDADE

A utilização de modelos de depósito para a construção e seleção de mapas evidenciais apresenta uma limitação fundamental: leva-se em consideração principalmente as características do depósito, em contraste aos processos formadores da mineralização. Isso pode gerar tanto falsos positivos como também falsos negativos nos mapas de prospectividade (PORWAL; CARRANZA, 2015).

Para lidar com as limitações das abordagens baseadas em modelos de depósitos, Wyborn et al. (1994) propuseram uma abordagem de sistemas para a formação de depósitos minerais. Um sistema mineral é definido como todos os fatores geológicos que controlam a geração e preservação de depósitos minerais, incluindo processos envolvidos na mobilização de componentes do minério a partir de uma fonte, transporte e concentração, seguidos de sua preservação ao longo da história geológica subsequente. Além de fonte, caminhos e trapas, os autores também reconheceram a fonte de energia para a transferência de massa e a conservação pós-formação de depósito como processos geológicos críticos. A base conceitual da abordagem de sistemas minerais é que os depósitos minerais são pontos focais de sistemas muito maiores de energia e transferência de massa provocadas por vários processos terrestres que operaram simultaneamente no tempo e no espaço (WYBORN et al., 1994).

A tendência atual sobre a geração de mapas de prospectividade mineral é que os modelos de depósitos rígidos (baseados em feições na escala do depósito) sejam transcendidos e substituídos, na sua concepção, por modelos de sistemas minerais genéricos, que são baseados em processos mineralizantes que operam da escala crustal à escala de depósito (MCCUAIG et al., 2010). No contexto da modelagem do potencial mineral, isto implica que o mesmo modelo de sistema mineral pode ser utilizado para proposição de mapas evidenciais em diferentes escalas, embora a importância relativa dos vários processos de mineralização, critérios de definição de alvos e mapas de prospectividade deverão variar com a escala objetivada (HRONSKY; GROVES, 2008; MCCUAIG et al., 2010). Da mesma forma, um determinado modelo de sistemas minerais pode ser usado para modelar a prospectividade de tipos de depósito geneticamente relacionados e que são definidos por *proxies* semelhantes (WYBORN et al., 1994).

Na sequência dos trabalhos de Wyborn et al. (1994), diversas adaptações foram desenvolvidas (e.g. BARNICOAT, 2008; SKIRROW, 2009; MCCUAIG et al., 2010). A ênfase destas abordagens é o mapeamento de processos relevantes de mineralização através da identificação de *proxies* geológicos adequados. Em áreas expostas e em profundidades relativamente rasas, *proxies* mapeáveis podem ser constituídos com base em dados geológicos, espectrais e geoquímicos. Em terrenos recobertos por sedimentos, unidades mais jovens ou regolito, dados geofísicos são imprescindíveis para geração de vetores de exploração e critérios para seleção de alvos.

O conceito de sistemas minerais compreende quatro componentes principais, consideradas críticas para o mapeamento de uma mineralização específica, a saber: (i) fontes de energia, metais, fluidos e ligantes; (ii) condutos para focalização do fluxo de fluidos; (iii) barreiras físicas para o trapeamento de fluidos; e (iv) barreiras químicas para a precipitação de metais. Esses critérios, uma vez ponderados, podem então ser integrados em um ambiente SIG utilizando, por exemplo, o SDM. O modelo agrega os componentes do sistema, que por sua vez são somados para derivar o mapa final de prospectividade mineral. No volume especial editado por Porwal e Carranza (2015), há vários artigos que ilustram de forma didática a concepção e aplicação desse tipo de abordagem, com destaque para o mapeamento da prospectividade de urânio em terrenos áridos e semi-áridos.

CENÁRIO FUTURO: DADOS E MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO

Em que pese a diversidade de modelos para o mapeamento da prospectividade mineral de uma região, de fato não há um modelo único ou superior que possa ser utilizado eficazmente em todas as situações (PORWAL; CARRANZA, 2015). Na prática, o desempenho de um modelo depende, em grande parte, da qualidade do modelo genético conceitual e da precisão com que os mapas evidenciais são capazes de capturar aspectos dos processos mineralizantes. O maior entrave para avanços nesse campo é que os processos de mineralização ocorrem no espaço e no tempo em 4 dimensões (4D), ao passo que os mapas evidenciais tradicionalmente utilizados para representá-los estão em duas dimensões (2D).

Inovações importantes têm ocorrido e serão amplamente expandidas num futuro próximo visando

estreitar essa relação entre processos e produtos com base em modelagem da prospectividade em 3D e 4D. Guimarães (2011) abordou uma série de soluções para representar modelos de potencial fuzzy em 3D a partir da integração de mapas gerados em 2D (Figura 3a,b) para mineralizações de ouro de Morro da Glória, no Quadrilátero Ferrífero. A crescente disponibilidade de programas de SIG 3D, públicos e comerciais, vem permitindo que esse modelos sejam agora produzidos diretamente em 3D.

Outro avanço expressivo deverá ocorrer na área de processamento digital visando a inversão de dados geofísicos e desenvolvimento de modelos 3D do tipo voxel ou mais avançados. Os modelos 3D podem ser usados para a geração de mapas evidenciais 3D, que por sua vez podem ser combinados por qualquer função de integração objetivando a determinação do potencial mineral de cada voxel no modelo, conforme ilustrado

na figura 3c. O entrave, nesse caso, é a restrição dos dados 3D à escala do depósito.

A falta de dados 3D em escala regional será outro desafio a ser superado no futuro. Entretanto, experiências com a inversão de dados geofísicos orbitais, como aqueles derivados por gradiometria (electrostatic gravity gradiometer) a partir do satélite GOCE (*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*), mostram um futuro promissor para o desenvolvimento de modelos de prospectividade regionais em *greenfield*, em áreas de fronteira exploratória. O uso de dados dessa natureza poderá ainda ser maximizado a partir de sua integração com dados orbitais hiperespectrais, com cobertura no espectro refletido e termal, que deverão ser lançados entre 2017-2022, a exemplo do EnMap (*Environmental Mapping and Analysis Program; DLR*) e HypsIRI (*Hyperspectral Infrared Image, NASA*).

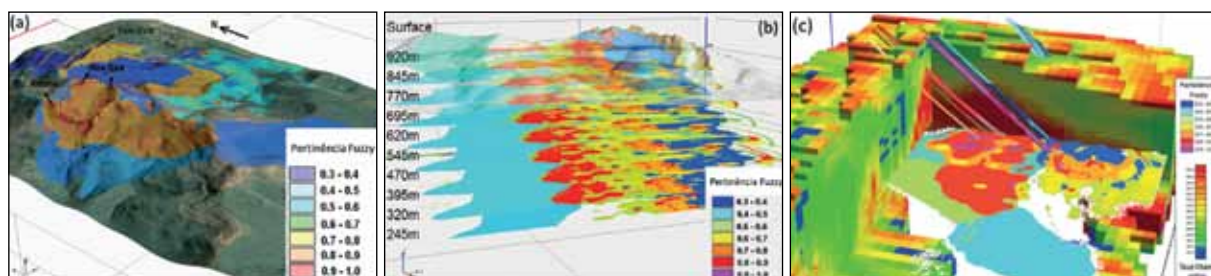


Figura 3 Depósito de Au de Morro da Glória, Quadrilátero Ferrífero (MG). Modelo de prospectividade fuzzy gerado com mapas evidenciais de superfície (a) e sub-superfície (b). (c) Modelo voxel 3D obtido com a inversão de dados eletromagnéticos e recorte, em profundidade, do modelo Fuzzy (Fonte: GUIMARÃES, 2011).

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, L. B.; SILVA, A.M.; SOUZA FILHO, C. R. Nickel prospective modelling using fuzzy logic on nova Brasilândia metasedimentary belt, Rondônia, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica* (Impresso), v. 32, p. 419-431. 2015.
- BARNICOAT, A. *The mineral systems approach of the pmd*CRC*: Geoscience Australia Record, v. 09, p. 1-6. 2008.
- BONHAM-CARTER, G.F. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*, 398 p. 1994.
- COSTA-SILVA, E.; SILVA, A. M.; TOLEDO, C.L.B.; MOL, A.G.; OTTERMAN, D.W.; SOUZA, S.R.C. Mineral Potential Mapping for Orogenic Gold Deposits in the Rio Maria Granite Greenstone Terrane, Southeastern Para State, Brazil. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, v. 107, p. 1387-1402. 2012.
- CARRANZA, E.J.M. Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features. *Ore Geology Reviews*, v. 35, n. 3-4, p. 383-400. 2009.
- CARRANZA, E.J.M. From Predictive Mapping of Mineral Prospectivity to Quantitative Estimation of Number of Undiscovered Prospects. *Resource Geology*, v. 61, n. 1, p. 30-51. 2011a
- CARRANZA, E.J.M. Geocomputation of mineral exploration targets. *Computers & Geosciences*, v. 37, n. 12, p. 1907-1916. 2011b.
- CARRANZA, E.J.M.; HALE, M.; FAASSEN, C. Selection of coherent deposit-type locations and their application in data-driven mineral prospectivity mapping. *Ore Geology Reviews*, v. 33, n. 3-4, p. 536-558. 2008.
- GUIMARÃES, F. R. *Análise espacial tridimensional e geoestatística de dados multi-fonte de superfície e subsolo aplicada à modelagem prospectiva de mineralizações auríferas no Quadrilátero Ferrífero, MG*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, 153 p. 2011.
- HUSTON, D.L.; WHELAN, J.A.; SCHOFIELD, A.; CHOPPING, R.G.; GALLAGHER, R.G. Uranium-rich iron oxide-copper-gold systems. In: SCHOFIELD, A. (Ed.). *An assessment of the uranium and geothermal prospectivity of the southern Northern Territory*: Geoscience Australia Record, v. 51, p. 45-87. 2012.
- HRONSKY, J.M.A.; GROVES, D.I. Science of targeting: definition, strategies, targeting and performance measurement. *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 55, n. 1, p. 3-12. 2008.
- LEITE, E.P.; SOUZA FILHO, C.R. Artificial neural networks applied to mineral potential mapping for copper-gold mineralizations in the Carajás Mineral Province, Brazil. *Geophysical Prospecting*, v. 57, n. 6, p. 1049-1065. 2009a.
- LEITE, E.P.; SOUZA FILHO, C.R. Probabilistic neural networks applied to mineral potential mapping for platinum group elements in the Serra Leste region, Carajás Mineral Province, Brazil. *Computers & Geosciences*, v. 35, n. 3, p. 675-687. 2009b.
- LEITE, E.P.; SOUZA FILHO, C.R. Mapas auto-organizáveis aplicados ao mapeamento do potencial mineral na região de serra leste, província mineral de Carajás, Pará. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 28, n. 3, p. 397-409. 2010.
- MAGALHAES, L. A. ; SOUZA FILHO, C. R. Targeting of Gold Deposits in Amazonian Exploration Frontiers using Knowledge- and Data-Driven Spatial Modeling of Geophysical, Geochemical, and Geological Data. *Surveys in Geophysics*, v. 33, n. 2, p. 211-241. 2012.
- MCCUAIG, T.C., BERESFORD, S.; HRONSKY, J. Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system. *Ore Geology Reviews*, v. 38, p. 128-138. 2010.
- NOBREGA, R.P.; SOUZA FILHO, C.R. Análise espacial guiada pelos dados (data-driven): O uso de redes neurais para avaliação do potencial poli-minerálico na região centro-leste da Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n. 2(Suplemento), p. 111-120. 2003.
- NYKÄNEN, V. Spatial data analysis as a tool for mineral prospectivity mapping. *Geological Survey of Finland, Original Articles (I-VI)*, Espoo. 27 p. 2008.
- NYKÄNEN, V.; OJALA, V.J. Spatial Analysis Techniques as Successful Mineral-Potential Mapping Tools for Orogenic Gold Deposits in the Northern Fennoscandian Shield, Finland. *Natural Resources Research*, v. 16, n. 2, p. 85-92. 2007.
- PARTINGTON, G. Developing models using GIS to assess geological and economic risk: An example from VMS copper gold mineral exploration in Oman. *Ore Geology Reviews*, v. 38, n. 3, p. 197-207. 2010.
- PORWAL, A., CARRANZA, E.J.M. Introduction to the Special Issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, v. 71, n. 12, p. 477-483. 2015.
- RAJESH, H.M. Application of remote sensing and GIS in mineral resource mapping - An overview. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, v. 99, p. 83-103. 2004.
- SETIJADJI, L.M.; WATANABE, K. On the Progress Design of Integrated Geologic Analysis System: Object-Relational Database Model and Visualization for Earth Resources. *Resource Geology*, v. 55, n. 3, p. 267-280. 2005.
- SILVA, A.M. *Geophysical and Geological Data Integration Using a New Statistical Approach for Mineral Target Selection Applied to the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 1999.
- SILVA A.M.; TEIXEIRA, A.A.; MCCAFFERTY, A.; PIRES, A.C.B.; MORAES, R.A.V.; SOUZA FILHO, C.R. Mapping Archean Greenstone-Hosted Deposits with Probability Ratio and Weights of Evidence Models, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *GIS and Spatial Analysis*, Toronto, Canadá, v.1, p. 551-556. 2005.
- SKIRROW, R.G. (Ed.). *Uranium ore-forming systems of the Lake Frome region, South Australia*: regional spatial controls and exploration criteria. Geoscience Australia Record, v. 40, 151 p. 2009.
- TEIXEIRA, A.A.; SILVA, A.M.; PIRES, A.C.B.; MORAES, R.A.V.; SOUZA FILHO, C.R. Integração e análise de dados aerogeofísicos por meio da aplicação de técnicas de processamento digital de imagens e classificação não supervisionada: o exemplo do Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24, n. 4, p. 559-572. 2006.





III

Tecnologia Mineral

Tecnologia mineral: pesquisa, desenvolvimento e inovação

Panorama na mineração brasileira

Fernando A. Freitas Lins

Centro de Tecnologia Mineral - CETEM

RESUMO

Apresenta-se um panorama dos investimentos dos últimos anos em P&DI na mineração brasileira. Mostra-se que é flagrante a falta de correspondência entre a importância do setor mineral para o Brasil, por sua contribuição para o PIB e ao comércio exterior, e o orçamento e o número de cientistas e técnicos das instituições de P&D dedicadas a cada um dos setores usados para comparação (agricultura, petróleo, e energia elétrica). São analisados a evolução da Pintec (2000-2011) e o aumento das atividades de pesquisa e inovação em razão da renúncia fiscal da Lei do Bem (2006-2012) com respeito à mineração.

Palavras-chave Tecnologia Mineral. Investimentos em PD&I. Mineração Brasileira.

INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta potencial para expandir e se consolidar como uma liderança mundial na produção mineral. O aproveitamento econômico dos depósitos minerais depende, dentre outros, do desenvolvimento de tecnologias específicas para cada caso, que permitam a concentração dos minerais de minério bem como a extração dos seus elementos químicos de modo sustentável, para serem usados na indústria. As grandes empresas que atuam no país certamente adotam, ou adotarão no futuro, as melhores tecnologias disponíveis, que são importadas, no entanto, em sua maioria.

Mas o Brasil também apresenta potencial para se tornar um líder global no desenvolvimento de tecnologias a longo prazo e de se estabelecer como um exportador de tecnologia mineral. Nesse sentido, é oportuno ter em conta a diferença entre tecnologia de processo e de produto. A primeira diz respeito ao modo de fabricação, que pode ser rudimentar (por exemplo, um garimpo de ouro) ou fazer uso da tecnologia mais sofisticada disponível para a produção de ouro, com minas operadas com tecnologias de informação e comunicação (TICs) embarcadas nos equipamentos e nos controles dos sistemas de operação, eventualmente operação com controle remoto. Em ambos os casos, o produto final comercializável é ouro, obtido através de processos distintos e com diferentes graus de pureza nos exemplos apontados. Parece óbvia essa explicação, mas tem sido comum analistas desinformados classificarem a mineração como uma atividade industrial de “baixa tecnologia”, sem a devida explicação de que os produtos da mineração, como também em geral os produtos da agricultura, podem ser produzidos

com tecnologia rudimentar ou com processos de alta tecnologia. Evidentemente, tal raciocínio confunde o leigo ao comparar um produto tradicional como a *commodity* mineral com um produto moderno como um tablet, que é um produto de alta tecnologia.

Para alcançar um nível internacional de desenvolvimento de tecnologias, investir em P&D é um pré-requisito fundamental: investimento público e do setor produtivo, pois a inovação tecnológica se concretiza na indústria.

PANORAMA DA TECNOLOGIA MINERAL NO BRASIL

O Brasil investe adequadamente em P&D no setor mineral? A Tabela 1 apresenta o investimento público federal em P&D no setor mineral e faz a comparação com outros setores econômicos que também apresentam como base os recursos naturais. Qualquer que seja o critério de análise, é flagrante a falta de correspondência entre a importância do setor mineral para o Brasil, por sua contribuição para o PIB e ao comércio exterior, e o orçamento e o número de cientistas e técnicos das instituições de P&D dedicadas a cada um dos setores em consideração.

Dá para inferir, por exemplo, sem muito esforço, porquê alcançamos competência na produção de petróleo em águas profundas, a caminho do Pré-sal, ou porquê a moderna agricultura é sempre citada como orgulho nacional. A lacuna do P&D em mineração necessita de uma reforma urgente ou o país permanecerá refém dos avanços tecnológicos desenvolvidos no exterior.

Tabela 1 Recursos em P&D de setores econômicos baseados em recursos naturais.

Setor Econômico	Participação do Setor no		Instituições Setoriais de P&D		
	PIB	Saldo Comercial	Instituição	Orçamento	Empregados
Petróleo&Gás	4,7%	- US\$ 5,7 Bi	CENPES/MME	R\$ 2,0 Bi	4.000
Energia Elétrica		n.d.	CEPEL/MME	R\$ 230 Mi	600
Mineral	3,9%	US\$ 27 Bi	CETEM/MCTI	R\$ 30 Mi	350
Agropecuário	6,0%	US 79 Bi	EMBRAPA/MAPA	R\$ 2,1 Bi	9.800

(Fonte: Elaborada pelo autor, a partir de informações de MCTI; MME; EMPRAPA; IBGE, 2012).

Notas: (1) PIB do setor energético inclui a produção de P&G, refino de petróleo e a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica; (2) PIB do setor mineral inclui a mineração, metalurgia extrativa e a produção de não-metálicos; (3) Comércio exterior de P&G inclui petróleo, derivados de petróleo, gás natural e GNL; (4) Comércio exterior do setor mineral inclui minérios, metais/ligas e produtos não-metálicos; e (5) CENPES e CETEM incluem empregados terceirizados.

A Tabela 2 reforça a análise em andamento quando mostra a assimetria de recursos destinados ao setor mineral e aos demais setores usados para comparação, por meio dos investimentos obrigatórios e dos fundos setoriais específicos.

leira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii) que possibilita que um projeto de P&D&I seja realizado em uma instituição de ciência e tecnologia e tenha um custo para a empresa contratante de um terço apenas do custo total.

Tabela 2 Investimentos obrigatórios de P&D e recursos de fundos setoriais de setores econômicos baseados em recursos naturais.

Setor Econômico	Investimentos Obrigatórios e Fundos Setoriais				
	ANP	ANEEL	DNPM	FNDCT (MCTI)	Total
Petróleo&Gás	R\$ 1,2 Bi			R\$ 1,4 Bi	R\$ 2,6 Bi
Energia Elétrica		R\$ 150 Mi		R\$ 280 Mi	R\$ 430 Mi
Mineral			ZERO	R\$ 36 Mi	R\$ 36 Mi
Agropecuário				R\$ 130 Mi	R\$ 130 Mi

(Fonte: Elaborada pelo autor, a partir de informações de MCTI, 2012).

Obs: Investimentos obrigatórios são aqueles mínimos estipulados por ANP e ANEEL para as empresas/concessionárias reguladas por estas Agências. Não existe essa obrigação para as empresas de mineração.

Entretanto, ao setor privado nacional cabe também estimular, em seu próprio benefício, nossas universidades e centros de pesquisa a se dedicarem à busca de soluções tecnológicas. A competitividade de uma empresa ou de um setor industrial específico guarda relação com a competitividade do país e esta passa, entre outros fatores, pelo estabelecimento de um sistema de C,T&I.

Houve avanços e iniciativas importantes neste século para a promoção de um ambiente favorável a atividades de inovação, a exemplo de: criação dos fundos setoriais, inclusive um voltado para a mineração; Lei da Inovação; Lei do Bem; os institutos nacionais de ciência e tecnologia (INCTs); o Programa Ciência sem Fronteira; o Programa Inova Empresa (para o setor mineral deverá ser lançado um edital no início de 2016, o InovaMin); e a criação da Empresa Brasi-

O superciclo de quase 10 anos de grande valorização das *commodities* minerais exauriu-se. Nessas condições atuais menos favoráveis, é fundamental perseguir o aumento da produtividade e a diminuição dos custos por meio da inovação tecnológica, assegurando competitividade às empresas brasileiras e, ainda, sob as condicionantes da sustentabilidade ambiental.

Os investimentos privados em P&D na mineração brasileira podem ser apreciados na Tabela 3, na qual são apresentados os dados do PINTEC e da Lei do Bem (de renúncia fiscal). É importante ressaltar que na PINTEC a indústria extrativa pode ser considerada uma *proxy* razoável da extrativa mineral, ou seja, da mineração, uma vez que os dados da extração de petróleo e gás são adicionados à atividade econômica de maior receita da empresa, no caso a atividade de refino de petróleo, seguindo-se a metodologia internacional.

Tabela 3 Informações da PINTEC e do uso da Lei do Bem na Mineração.

PINTEC	2000		2003		2005		2008		2011	
N.E. / Taxa de Inovação (%) (1)	297 / 17,2		415 / 22,0		427 / 23,1		491 / 23,7		458 / 18,9	
N.E. / Atividades Inovativas (R\$ Mi) (2)	226 / 189		325 / 385		330 / 681		354 / 496		366 / 768	
N.E. / P&D interno (R\$ Mi)	69 / 29		76 / 28		18 / 78		100 / 74		23 / 437	
Receita Líquida de Vendas (R\$ Bi)	12,8		23,9		37,9		56,7		110	
Intensidade Tecnológica (%) (3)	0,23		0,12		0,20		0,13		0,40	
N.E. / P&D externo (R\$ Mi)	39 / 6,7		65 / 5,6		14 / 12		18 / 13		14 / 25	
LEI DO BEM	2006	2007	2008		2009	2010	2011		2012	
N.E. / Renúncia Fiscal (R\$ Mi)	2 / 2	1 / 0,1	1 / 1		4 / 0,6	7 / 9	13 / 12		18 / 32	

(Fonte: Elaborada pelo autor, a partir de informações de PINTEC/IBGE e MCTI, 2012).

Obs.: N.E. é o número de empresas inovadoras conforme discriminado em cada linha.

Notas: (1) A taxa de inovação é definida como o percentual das empresas que declararam ter implementado inovações durante o triênio encerrado no ano de referência, por exemplo, em 2000, no período 1998-2000, enquanto as demais linhas da tabela correspondem ao ano referido; (2) As atividades inovativas incluem: aquisição de máquinas e equipamentos; aquisição de software; P&D interno; P&D contratado; treinamento; introdução de inovações tecnológicas no mercado; e projeto industrial; (3) A intensidade tecnológica é medida pelo dispêndio interno em P&D com relação à receita líquida de vendas, cujo total se aproxima, no caso da Mineração, do Valor da Produção Mineral.

Verifica-se na Tabela 3 que a taxa de inovação da mineração mostra uma evolução, com o aumento do número de empresas inovadoras. A queda da taxa em 2011, para 18,9%, é menos afetada pelo decréscimo de empresas inovadoras e mais pelo aumento do número de empresas consultadas do universo: 2.421, no período 2009-2011, e 2.076, em 2006-2008. As atividades inovativas, uma série de elementos de despesas voltadas à inovação, incluindo P&D, crescem significativamente em valor no período, com destaque para 2011, alcançando R\$ 768 milhões, enquanto se mantém no mesmo patamar o número de empresas.

Com relação a P&D intra-muros, há uma oscilação muito grande no número de empresas, mas verifica-se um aumento no dispêndio, especialmente, em 2011, de R\$ 437 milhões. A intensidade tecnológica da mineração segue o mesmo padrão, alcançando 0,40% em 2011, mais do dobro da média dos anos anteriores. Já o número de empresas que contratam P&D é pequeno, apenas 14 em 2011, e baixo o dispêndio, embora crescente, atingindo R\$ 25 milhões em 2011, quase o dobro de 2008. O baixo dispêndio pode ser uma aparente contradição com o discurso recente das grandes empresas de mineração, que têm afirmado uma preferência pela inovação aberta. Possivelmente, a próxima PINTEC deverá capturar essa disposição.

O segundo documento consultado é o relatório anual da utilização dos incentivos fiscais, do MCTI, com base na Lei do Bem (de 2005), que analisa o período 2006-2012. A tabela mostra a evolução do número de

empresas de mineração beneficiadas e a renúncia fiscal por investimento em inovação. Nos primeiros quatro anos, possivelmente um período de aprendizado sobre esse incentivo fiscal, houve pouca adesão. Percebe-se, todavia, a partir de 2010, o aumento significativo do interesse para utilizar a Lei do Bem. Com efeito, uma adesão crescente se manifesta, alcançando R\$ 32 milhões de renúncia em 2012 (último ano disponível), correspondendo a 18 empresas. Entre estas, encontram-se a Vale, Imerys, Samarco, CBMM e Usiminas Mineração.

Em resumo, a análise dos números da Tabela 3 mostra um incremento nas atividades inovativas, especialmente nos últimos anos. São boas notícias que apontam, potencialmente, para o aumento futuro da produtividade e da competitividade da mineração brasileira. Um desafio para os próximos anos é fazer desse esforço, público e privado, uma prática de inovação mais eficiente, com melhores resultados.

Finalizando, cabe uma atenção especial às micro e pequenas empresas (MPEs) de mineração, as quais constituem mais de 80% do universo de empresas e respondem por menos de 10% dos *royalties* (CFEM) arrecadados. Propõe-se aqui que um percentual da CFEM devida à União pelas MPEs possa ser transformada em crédito (*vouchers*) para utilização no pagamento de serviços técnicos especializados a instituições/laboratórios credenciados. Seriam recursos descentralizados para a melhoria da eficiência técnica e ambiental de processos e de produtos das MPEs.

A lavra e a indústria mineral no Brasil – tendências tecnológicas e desafios de inovação

Jair Carlos Koppe

Departamento de Engenharia de Minas,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

O mercado mundial de bens minerais vive um ciclo de desaceleração de crescimento. O preço e a produção das *commodities* foram afetados pela diminuição do crescimento da economia de diversos países, em especial da China. Como resultado dessa situação, as grandes empresas de mineração voltam-se para questões de redução de custos e aumento de produtividade. As principais áreas em que a indústria mineira está claramente pressionada são: (i) necessidade de novos depósitos de classe mundial demandando novas formas de exploração mineral, (ii) redução de custos e aumento de produtividade de forma criativa e inovadora, não simplesmente baseado no corte de custos ou melhorias contínuas, (iii) questões de sustentabilidade e uso de água e energia e (iv) necessidade de investimentos para suportar inovações na indústria mineira. A evolução da mineração busca uma total integração dos sistemas de mineração utilizando sistemas de gerenciamento de mina envolvendo programas modulares, equipamentos GPS de alta precisão, equipamentos de *dispatch* e monitoramento *online* dos sistemas operacionais.

Palavras-chave Inovação na Mineração. Automação. Sistemas de Mineração.

INTRODUÇÃO

O mercado mundial de bens minerais vive um ciclo de desaceleração de crescimento. O preço e a produção das *commodities* foram afetados pela redução na expansão da economia de diversos países, em especial da China. Observa-se uma diminuição na aplicação de investimentos voltados à exploração mineral, na busca de novos depósitos minerais e em projetos de empreendimentos mineiros produtivos em vários países, entre eles o Brasil. Os grandes produtores de bens minerais como os EUA, Canadá, Austrália, China, Brasil, Rússia, Índia, Chile e África do Sul vêm sofrendo com esse cenário. Como resultado dessa situação, as grandes empresas de mineração voltam-se para questões de redução de custos e aumento de produtividade à espera de um novo ciclo de prosperidade.

No período compreendido entre 2003 e 2012, a indústria mineira investiu vultosos recursos financeiros em exploração e expansão das operações. Novas minas foram abertas com crescentes custos de capital. Apesar dessa situação, houve um declínio na qualidade das novas descobertas e mesmo na forma de operação das empresas mineiras. Em função da forte demanda nesse período e o preço elevado dos bens minerais, muitos depósitos de baixo teor e com crescentes razões estéril/minério foram desenvolvidos. Com o declínio dos preços a partir de 2012, esses fatores impactaram custos e margens de lucro impondo forte pressão na indústria mineira.

Os ciclos de prosperidade ou de declínio são uma constante no desenvolvimento da mineração nos últimos séculos. Deve-se considerar, também, que a população mundial e as economias dos países emergentes

continuarão a crescer o que irá demandar um maior consumo de bens minerais, afetando diretamente a indústria mineira. Em algum momento, os preços das *commodities* irão subir novamente. No entanto, a situação atual de preços baixos expôs problemas fundamentais no negócio mineiro como um todo. Além disso, o crescimento da indústria mineira provoca um conflito aberto com a sociedade civil principalmente nas questões ambientais e de sustentabilidade. Esse cenário implica em mudanças na indústria mineira que vão requerer não apenas inovação tecnológica, mas, também, na forma de relacionamento com a sociedade civil.

As principais áreas que a indústria mineira está claramente pressionada são: (i) necessidade de novos depósitos de classe mundial demandando novas formas de exploração mineral, (ii) redução de custos e aumento de produtividade de forma criativa e inovadora, não simplesmente baseado no corte de custos ou melhorias contínuas, (iii) questões de sustentabilidade e uso de água e energia e (iv) necessidade de investimentos para suportar inovações na indústria mineira.

A LAVRA NO BRASIL

A produção mineral no Brasil atingiu, em 2014, cerca de US\$ 40 bilhões (IBRAM, 2015), o que representou um decréscimo em relação ao observado no ano de 2010 (Figura 1) e reflete as dificuldades econômicas globais e a queda no preço dos bens minerais nos últimos anos. No entanto, o volume da produção de minério tem aumentado, concentrada principalmente nos agregados e minério de ferro, que, juntos, representam uma pro-

dução aproximada de 1,1 bilhão de toneladas. O ferro representa 73% das exportações de produtos minerais do Brasil. Embora mais de 2000 minas estejam em operação no país, empregando aproximadamente 200 mil trabalhadores, lavradas preferencialmente a céu aberto e abrangendo uma grande diversidade de bens minerais (mais de 57 variedades), desde alumínio até zircônio, apenas 47 empresas respondem por aproximadamente 80% do total do valor da produção mineral comercializada (DNPM, 2014). De acordo com classificação do DNPM (2006), as grandes minas representam apenas 4% do total de minas, as médias correspondem a 23% e as pequenas minas a 73% do total de minas. Portanto, a imensa maioria das minas é representada por pequenas minerações, cuja lavra está centrada na maioria dos casos em agregados da construção civil (areia, cascalho e brita) com cerca de 70% do total de minas.

Embora as grandes empresas de mineração já tenham incorporado técnicas geoestatísticas na avaliação de seus depósitos, aplicando-as, também, no planejamento mineiro, a maioria das minas, por não utilizarem essas técnicas, opera sem um conhecimento adequado de seu depósito e sem planejamento de lavra no curto, médio e longo prazo.

A altura de bancadas é bastante variável, observando-se, no entanto, a tendência de padronização para bancadas com 15 m de altura, acompanhando a média de altura de bancada observada no exterior. Por outro lado, nas pedreiras para brita essa tendência não é observada na maioria dos casos e as bancadas, em geral, são mais altas, atingindo muitas vezes alturas superiores a 20 metros. Nessas situações, os resultados de lavra são, geralmente, inadequados aos objetivos pretendidos, resultando em fragmentação grosseira

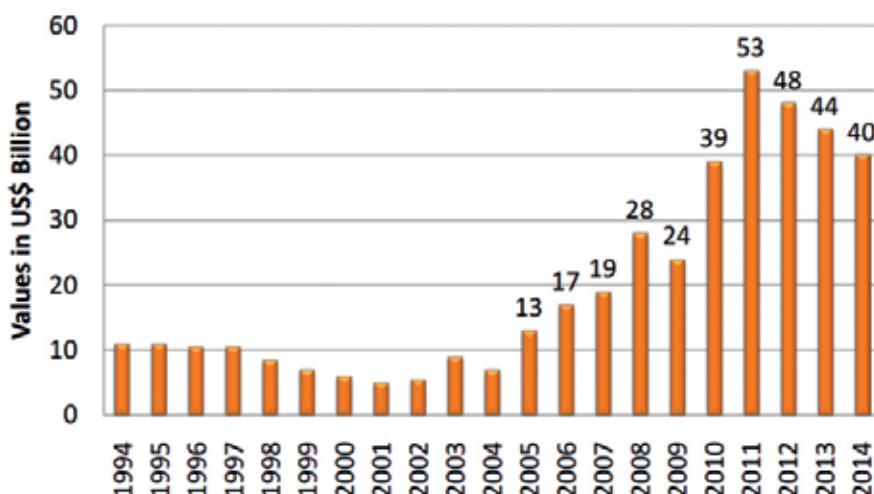


Figura 1 Evolução da produção mineral do Brasil (Fonte: IBRAM, 2015).

A lavra a céu aberto no Brasil é desenvolvida essencialmente em encostas em cavas, em tiras ou fatias e em *placers*. A maioria das operações é de pequeno porte, no entanto, algumas minas, principalmente de minério de ferro e carvão, são enquadradas como de grande porte. De um modo geral, as operações de lavra a céu aberto no Brasil não diferem das operações de lavra no exterior. As principais diferenças dizem respeito ao porte das operações incluindo diâmetro de perfuração, técnica de desmonte, equipamentos de carregamento e transporte. Além do menor número de minas de grande porte, no Brasil a quantidade de lavras em cava, também, é menor do que nos países com maior tradição em mineração.

e na geração de grandes matacões que induzem uma maior atividade na britagem e a operações de desmonte secundário, aumentando os custos das pedreiras.

Na maioria das minas a céu aberto não existe um planejamento adequado em relação ao porte da operação e tamanho de equipamentos de perfuração, escavação, carregamento e transporte. Poucas minas conseguem harmonizar essa relação, redundando em desperdício, diminuição de produtividade e aumento de custos. Nas pedreiras, é frequente se observar alturas de bancadas incompatíveis com a capacidade da perfuratriz e com o porte do equipamento utilizado para carregamento do material fragmentado. Poucas minas brasileiras utilizam britadores nas cavas, equipamento

que facilitaria o transporte do material fragmentado, reduzindo custos e aumentando a produtividade das operações que se seguem.

A fragmentação do material é um aspecto que assume importância fundamental nas operações mineiras que seguem o desmonte de rocha. Esse assunto não é abordado, no entanto, de forma técnica compatível com o porte das atividades da maioria das minas brasileiras. Com raras exceções, a busca de solução para a fragmentação é feita de forma empírica e sem controle de resultados.

Outro setor importante da mineração brasileira e que vem crescendo muito nos últimos anos é o setor de rochas ornamentais. A totalidade da lavra de rochas ornamentais ocorre a céu aberto e está distribuída na maioria dos Estados brasileiros. Destacam-se na produção os Estados do Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia, mas muitos outros têm apresentado um crescimento significativo principalmente no Nordeste, incluindo Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte. Inúmeras frentes de lavra são responsáveis por produções que vão de poucos metros cúbicos a 500 m³ por mês; poucas empresas conseguem produzir valores em torno de ou mais de 1000 m³/mês. A lavra, de um modo geral, não segue um planejamento pré-definido e a exploração prévia é praticamente inexistente o que resulta muitas vezes em um grande desperdício de material e uma baixa produtividade do setor. Com poucas exceções, as técnicas de lavra são artesanais e pouco mecanizadas. Paulatinamente estão sendo introduzidos equipamentos e métodos de lavra que irão permitir um aumento da produtividade e melhor ordenação dos trabalhos.

A lavra de *placer* compreende a lavra de sedimentos inconsolidados nos aluviões, dunas, praias, lagos e outros depósitos sedimentares. No Brasil, os principais bens minerais lavrados abrangem ouro, cassiterita, ilmenita, rutilo, zircão, monazita, diamantes. Atividades de garimpeiros foram responsáveis por grande parte da lavra de *placer* por meio de métodos que envolvem utilização de dragas, desmonte hidráulico e bombeamento por sucção. De um modo geral, as empresas que atuam nesse tipo de lavra utilizam dragas de pequeno porte. Alguns depósitos poderão futuramente utilizar dragas de maior porte à semelhança de operações em *placers* na Malásia e Austrália. A lavra de areia para construção civil desenvolve-se de forma similar e são muito numerosas nas proximidades dos grandes centros urbanos.

Alguns depósitos sedimentares incluindo carvão, caulim e bauxita são lavrados pelo método de lavra em tiras ou fatias (*strip mining*), entre eles estão algu-

mas minas de grande porte como a mina de carvão de Candiota (RS) e a mina de bauxita de Trombetas (PA).

As operações unitárias de lavra a céu aberto incluem limpeza, remoção de cobertura, perfuração, detonação, escavação, carregamento e transporte. Considerando-se a diversidade de operações de lavra no Brasil, vários sistemas podem ser empregados nas diferentes operações. Em geral, o decapeamento é feito com trator de esteira, carregadeira frontal ou escavadeira e caminhão, seguindo-se a operação de desmonte de rocha, que pode ser mecânico ou utilizar a combinação perfuração/detonação, na continuidade o carregamento com carregadeiras frontais, escavadeiras ou *shovels* e transporte por caminhões. Poucas operações introduziram transporte por correias. *Draglines* também são utilizadas nas operações de decapeamento. Mineradores contínuos a céu aberto não são muito empregados na lavra a céu aberto, apenas na mina de bauxita de Paragominas (PA) a sua utilização foi feita com sucesso.

Nas operações de desmonte de rocha com utilização de explosivos, as empresas brasileiras têm evoluído pouco no sentido da adoção de diâmetros maiores na perfuração. Os explosivos nitroglicerinais dominaram um bom período no Brasil e foram recentemente substituídos por ANFO (*ammonium nitrate fuel oil*) e emulsões, explosivos mais consumidos no exterior. Convém ressaltar que os explosivos ainda são a fonte de energia mais barata disponível para fragmentação de rochas e que os processos que se seguem ao desmonte (carregamento, transporte e cominuição) dependem muito da eficiência do mesmo.

A atividade de lavra subterrânea no Brasil é muito pouco desenvolvida existindo um número restrito de minas subterrâneas que representam menos de 2% das minas existentes no país (não foram consideradas as atividades de garimpo em subsolo), situação essa que deverá mudar no futuro à medida que novos depósitos de metálicos em profundidade forem descobertos. Os métodos de lavra mais empregados no Brasil são: câmeras e pilares, sub-níveis, corte e enchimento (*cut-and-fill*), VCR (*vertical crater retreat*) e *sublevel caving*.

A maioria das minas subterrâneas do Brasil está concentrada na produção de carvão nos Estados de Santa Catarina e Paraná, onde o método dominante é o de câmeras e pilares. As profundidades das minas variam de 40 a 200 metros, sendo que a Carbonífera Metropolitana está estudando a possibilidade de desenvolver a lavra em profundidades maiores (300 metros). Para evitar subsidência o DNPM restringiu a recuperação de pilares. A lavra é desenvolvida a partir do desmonte de rocha com emprego de explosivos,

prática distante da lavra mecanizada em atividade nos EUA. Algumas tentativas de utilização de mineradores contínuos foram feitas sem muito sucesso.

O método de câmeras e pilares também é empregado na mina de potássio Taquari-Vassouras da CVRD, em Sergipe, sendo considerada uma das mais modernas e produtivas minas subterrâneas do Brasil. Nesse caso, o desmonte é feito com mineradores contínuos e a operação de transporte/carregamento, por *shuttle cars* e correia transportadora.

O método de corte e enchimento (*cut-and-fill*) é ou foi desenvolvido em algumas minas de ouro brasileiras (Cuiabá e São Bento em Minas Gerais e na mina de Crixás em Goiás) e em mina de fluorita em Santa Catarina. O método utiliza material de enchimento dos vazios que pode ser estéril (enchimento mecânico) ou rejeito de planta de beneficiamento (*backfill*) caracterizando o rejeito hidráulico. O método admite um bom grau de mecanização. A abertura de uma nova mina de carvão em Santa Catarina de propriedade da Empresa Rio Deserto está prevista com o método de *backfill*, o que amenizaria os problemas ambientais na área.

O método VCR (*vertical crater retreat*), desenvolvido no Canadá, é pouco empregado no Brasil. A mina da Mineração Caraíba (BA) tem empregado esse método aliado a uma variação do método de sub-níveis com resultados positivos.

No subsolo, as operações unitárias em rocha dura se caracterizam pela adoção de sistemas sem trilhos, onde participam carretas de perfuração do tipo jumbo, carregadeiras do tipo LHDs e caminhões rebaixados, já em rochas moles podem ser utilizados os mineradores contínuos, *shuttle cars*, correias transportadoras e mesmo caminhões rebaixados.

Problemas de ventilação, higiene e segurança do trabalho e mecânica de rochas são comuns à maioria das minas subterrâneas no Brasil. Estudos para melhoria do planejamento e desenvolvimento de operações de lavra são raros e grande parte do planejamento é assistida por consultores do exterior ou nacionais, baseados essencialmente na experiência prática observada em outros países.

O cenário apresentado da mineração brasileira reflete a dicotomia da sociedade como um todo, onde convive o lado desenvolvido e rico com o lado subdesenvolvido e pobre. Na mineração, essa relação também é observada, por exemplo, no pífio ou quase inexistente desenvolvimento tecnológico nas atividades de lavra nas pequenas empresas ou mesmo atividades garimpeiras com técnicas artesanais comparadas a um expressivo desenvolvimento tecnológico na lavra em algumas grandes minerações.

AVANÇOS CIENTÍFICOS E INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS

Os principais avanços científicos e inovações tecnológicas na mineração nos países de maior tradição mineira estão relacionados com a intensa mecanização e automação das operações de lavra, tanto a céu aberto quanto em subsolo.

O desmonte de rochas a céu aberto caminha para a adoção de grandes diâmetros de perfuração, diminuindo assim a quantidade de furação e o custo associado. Os explosivos do tipo *blends* tendem a predominar, sendo que o carregamento deverá ser efetivado a partir de caminhões com bombeamento do explosivo para os furos de detonação e com operação de um único homem que comandará o enchimento dos furos e a mescla de explosivos, essencialmente ANFO e emulsões, a partir dos quais se fará o explosivo do tipo *blend*. A adoção de detonadores eletrônicos fará com que a iniciação dos fogos seja feita com maior precisão, melhorando de um modo geral a fragmentação e os problemas ambientais (ruído e vibração).

Estudos estão sendo efetivados para obtenção de dados sobre as características mecânicas do maciço a partir da perfuração. Informações como dureza da rocha poderão ser transmitidas *online* para o escritório de apoio que poderá utilizá-las para otimização do plano de fogo.

Equipamentos de grande porte foram adotados em céu aberto reduzindo a quantidade de caminhões, diminuindo a mão-de-obra, aumentando a produção e produtividade, acompanhado de redução de custos significativa, tornando esses países mais competitivos no mercado internacional. No Brasil, devido a dificuldades pontuais, mesmo em minas de grande e médio porte, a adoção de caminhões de menor porte ou rodoviários adaptados tem sido uma prática usual. A tendência de terceirização de serviços no Brasil têm sido uma constante.

A utilização de GPS e pesagem tem agilizado imensamente as operações de carregamento e transporte. Em tempo real é possível se conhecer a quantidade e qualidade do minério lavrado. Sistemas de *dispatching* direcionam os caminhões para as escavadeiras/carregadeiras otimizando a utilização dos equipamentos. No Brasil, esses sistemas ainda não têm ampla utilização; os custos envolvidos na aquisição de *softwares* importados podem ser a principal causa de uma certa contenção na sua utilização.

Na lavra subterrânea a tendência é a mecanização e automação via a adoção de eletrônica embarcada nos equipamentos de perfuração, carregamento e trans-

porte, procurando reduzir os riscos principalmente de carregamento nos realces.

Estudos de mecânica de rochas tornam-se muito valiosos para garantir a segurança das aberturas subterrâneas. Nesse sentido, medidores de deformação/tensão poderão ser instalados enviando informações *online* para a equipe técnica que poderá assim acompanhar o comportamento mecânico do maciço. O reforçamento do maciço é feito principalmente com parafusos de teto, cabos, concreto projetado e telas.

A utilização de mineradores contínuos também é uma tendência observada, buscando-se diminuir a utilização do desmonte de rochas com explosivos mesmo em rochas duras. A prática já é comum em rochas moles, o que acarreta uma maior produção nas minas subterrâneas. Infelizmente, no Brasil, mesmo nas minas de carvão onde a adoção de mineradores contínuos seria previsível, esse sistema é pouco utilizado. O monitoramento automático das condições ambientais relativas ao maciço rochoso e de ventilação não é muito empregado no momento, mas a tendência é de se tornar uma prática comum nas minas em subsolo.

O planejamento de lavra baseado na modelagem dos atributos geometalúrgicos de um depósito está em pleno desenvolvimento sustentado pela introdução de inúmeros *softwares* desenvolvidos essencialmente no exterior. A geoestatística assume importância vital nessa área. Diversos grupos atuam no exterior enfocando esse tema para a mineração tradicional e no petróleo. No Brasil, poucos grupos se dedicam a essa área de conhecimento.

A evolução da mineração mundial busca uma total integração dos sistemas de mineração utilizando sistemas de gerenciamento de mina envolvendo programas modulares, equipamentos GPS de alta precisão, equipamentos de *dispatch* e monitoramento *online* dos sistemas operacionais.

Fundamental, também, é destacar os novos conceitos em vigor na mineração mundial que incluem fortemente educação e treinamento das equipes mineiras, desde operadores até os técnicos de nível superior. Mineiros educados e treinados implicam em melhorias nas operações mineiras, nas condições de segurança e no ambiente de trabalho.

DESAFIOS TECNOLÓGICOS NA ÁREA DE LAVRA DE MINAS

Considerando o cenário internacional e nacional, alguns pontos merecem destaques para a definição de prioridades para os desafios tecnológicos na área

de lavra de minas, sabendo-se que o planejamento de lavra constitui-se hoje em uma das ferramentas mais importantes para o alcance de competitividade e avanços tecnológicos, por meio do tratamento das informações disponíveis da jazida:

- i) Desenvolvimento de pesquisa e capacitação de recursos humanos na área de modelagem de depósitos minerais. Utilização da geoestatística para definição de recursos e reservas e aplicação no planejamento de lavra de curto e médio prazo. Certificação e auditoria de recursos e reservas. No Brasil existem poucos grupos que trabalham com geoestatística. Alguns desses grupos estão voltados essencialmente ao desenvolvimento de pesquisa na área de petróleo havendo necessidade de apoiar-se a formação de novos grupos e consolidação dos já existentes. As empresas por sua vez, também, necessitam qualificar o próprio pessoal que atua nessa área.
- ii) Desenvolvimento de pesquisa operacional para construção de programas adaptados à realidade nacional para o gerenciamento de equipamentos de carregamento e transporte aplicados a lavra a céu aberto e em subsolo. O desenvolvimento desse setor pode facilitar a utilização dessas ferramentas em empresas de médio porte, tornando-as mais competitivas, reduzindo custos operacionais.
- iii) Desenvolvimento de sistemas de monitoramento e controle *online* de propriedades geometalúrgicas e geomecânicas, baseados na tecnologia GPS auxiliando diretamente o planejamento de lavra e o controle efetivo das operações. Essa tendência mundial precisa ser inserida nas minas de grande e médio porte do Brasil, pois se trata de tecnologia que busca otimizar as operações de lavra.
- iv) Desenvolvimento de sistemas de automação e robotização de operações unitárias na lavra a céu aberto e em subsolo. A redução de riscos nos trabalhos em subsolo e diminuição do custo de mão-de-obra é um dos focos principais das empresas no exterior.
- v) Desenvolvimento de pesquisa na área de fragmentação de rochas buscando otimizar os processos de desmonte de rochas e operações de cominuição na planta de beneficiamento. Sistemas de análise de imagens do minério fragmentado *online* podem auxiliar o processo em tempo real. Pesquisas na área de desmonte de rochas envolvendo explosivos e acessórios (desenvolvimento de *blends* e espoletas eletrônicas), perfuração, controle de vibrações e

ruídos, utilização de unidades bombeáveis e aplicação de mineradores contínuos nas operações de lavra tanto a céu aberto como em subsolo.

- vi) Pesquisa na área de mecânica de rochas envolvendo estabilidade de taludes a céu aberto e dimensionamento de vias subterrâneas com desenvolvimento de equipamentos para monitoramento *online* de deformações e tensões. Outra preocupação recente envolve a estabilidade das barragens de rejeito e que demanda, também, desenvolvimento de pesquisa.
- vii) Desenvolvimento de sistemas de monitoramento *online* de atmosfera de mina em lavra subterrânea integrados a programas para análise do sistema de ventilação. Estudos de atmosfera de mina no Brasil são muito incipientes e necessários ao bom desenvolvimento das operações e para a saúde dos mineiros.
- viii) Desenvolvimento de pesquisas para otimização de amostragem, sequenciamento e homogeneização de pilhas de minério. Desenvolvimento de técnicas para reconciliação de teores e rastreabilidade de minério.

REFERÊNCIAS

- DNPM-Departamento Nacional de Produção Mineral.
Anuário Mineral Brasileiro. DNPM: Brasília, 2006.
- DNPM-Departamento Nacional de Produção Mineral.
Informe Mineral, v.2, p. 22. 2014.
- IBRAM-Instituto Brasileiro de Mineração. *Overview of Brazilian Mineral Sector*, IBRAM: Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005617.pdf>>. Acesso em 05 de maio de 2015.

Beneficiamento de minérios

Claudio L. Schneider

Elves Matiolo

Reiner Neumann

Otávio F. M. Gomes

Centro de Tecnologia Mineral – CETEM

RESUMO

O foco do processamento mineral é o aproveitamento ótimo dos recursos do nosso subsolo, com sustentabilidade. Sendo assim o esforço está na redução dos custos operacionais, especialmente energia, bem como dos custos de capital, porém priorizando as alternativas de equipamentos mais eficientes. Na flotação, o foco está no processamento de minérios mais finos e, conseqüentemente, na flotação em colunas, no desenvolvimento de equipamentos de grande capacidade e na otimização de reagentes. Dentro desta perspectiva, a união da cominuição e flotação deve ser estudada com enfoque em técnicas de remoagem, cada vez mais empregadas com objetivo de reduzir custos. Quanto aos outros processos destaca-se as operações de separação sólido-líquido e a produção de pastas, com um possível viés de processamento a seco. Na caracterização tecnológica o enfoque continua sendo o uso de diversas técnicas para identificação e quantificação de minerais.

Palavras-chave Caracterização Tecnológica. Cominuição. Flotação.

INTRODUÇÃO

Embora o setor mineral brasileiro seja relativamente bem desenvolvido, responsável por uma significativa fatia do PIB do país, é possível imaginar que, em outra conjuntura, o setor poderia estar em um estágio de desenvolvimento muito acima do que este que se observa nos dias de hoje. Inclusive comparável ao setor mineral de países como Austrália, Canadá e Chile. Além de todos os problemas que impedem o desenvolvimento de todos os setores no Brasil, o setor mineral é especialmente prejudicado pelas elevadas taxas de juros, perenemente vigentes há décadas.

Projetos de mineração novos, os chamados projetos *Greenfield*, requerem um investimento de capital que se realiza durante as fases de engenharia e implementação. Via de regra, estes investimentos são amortizados durante a vida do empreendimento, e lucros são realizados somente após alguns anos de operação. Este sistema de negócio é característico do setor mineral, e não pode conviver com taxas de juros elevadas. Assim, as empresas de mineração devem tomar empréstimos no exterior para financiar novos projetos. Isso afeta o desenvolvimento tecnológico de duas formas.

Primeiramente, os projetos de engenharia de plantas de processamento sempre priorizam o menor custo de capital, e nunca a sustentabilidade (menor custo operacional) do projeto. Com isso assistimos ao mundo desenvolvendo e implantando processos sustentáveis, energeticamente eficientes e que permitem um melhor aproveitamento dos recursos minerais, enquanto aqui adotamos a sustentabilidade somente quando ela não implica em um maior custo de investimento.

A segunda forma que as altas taxas de juros prejudicam o desenvolvimento tecnológico é direta, já que os investimentos em PD&I diretamente relacionados a projetos *Greenfield* são contabilizados como custo de capital e, portanto, minimizados. Porém, e felizmente, têm surgido no Brasil modalidades de financiamento de PD&I e este problema tende a ser atenuado.

Dentro desta realidade, e apesar dos problemas macroeconômicos, devemos persistir na sustentabilidade de todos os projetos da área mineral, em todos os seus aspectos, inclusive e especialmente no que diz respeito ao processamento mineral de sistemas particulados. Dentre os processos envolvidos destacam-se aqueles relativos à cominuição (desmonte, britagem e peneiramento, moagem e classificação), os processos de concentração (flotação, gravíticos e magnéticos) e as etapas de separação sólido-líquido.

A moagem (cominuição com alta razão de redução) e a flotação são os processos prioritários a merecerem atenção. O primeiro por representar, frequentemente, em torno de 50% do custo operacional de uma planta de processamento mineral, e o segundo por ser o processo mais comumente empregado na concentração de minerais de minérios no Brasil.

Ainda dentro desta perspectiva, o desenvolvimento de rotas de processo para os minérios brasileiros deve constituir o foco dos esforços em PD&I. O sucesso nestes desenvolvimentos depende muito da caracterização mineralógica e tecnológica, além da caracterização física (inclusive propriedades de tenacidade e abrasividade) e físico-química dos minérios em potencial. Aqui surge a geometalurgia como uma estratégia moderna de desenvolvimento e planificação de lavra de longo

prazo em função do conhecimento detalhado da jazida e do produto gerado ao longo da vida da mina. A geo-metalurgia combina a geoestatística com a metalurgia extrativa para criar um modelo geológico preditivo de plantas de processamento mineral.

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E TECNOLÓGICA

A caracterização mineralógica e tecnológica dos minérios deve estar à frente do beneficiamento de minérios, gerando as informações estratégicas necessárias para planejar o desenvolvimento da tecnologia de exploração racional e sustentável de um depósito mineral.

É necessário considerar um quadro geral com condições de contorno impostas pelos minérios à caracterização, que incluem: i) teores progressivamente mais baixos com a exaustão das jazidas mais ricas; ii) mineralogia complexa; iii) cristais menores, condicionados pela mineralogia e pela textura do minério, que implicam na necessidade de cominuição mais intensa para atingir a liberação das fases de interesse; e iv) abordagem holística a fim de avaliar potenciais subprodutos da jazida e também implicações ambientais, de consumo de água e energético.

No caso brasileiro, a caracterização mineralógica e tecnológica apresenta-se como um desafio ao desenvolvimento de tecnologia com conteúdo local. Mineralogia complexa e tamanho reduzido de cristais são afetados sobremaneira pela intensa ação intempérica sobre as rochas originais, particularmente nas condições morfoclimáticas tropicais que predominam no Brasil, diferentes do que é encontrado nos países exportadores de tecnologia. Aos fatores naturais, soma-se o menor prazo de maturação de um empreendimento mineral moderno, com menos etapas entre desenvolvimento da tecnologia e a sua implantação industrial, além de amostragem com menos massa disponível, muitas vezes baseada em testemunhos de sondagem.

Apesar dos desafios maiores, a evolução das ferramentas analíticas tem permitido a execução a contento da maioria das missões da caracterização mineralógica e tecnológica. De uma forma geral, as análises visando a caracterização mineralógica podem ser executadas de forma pontual ou numa alíquota do minério moído, a amostra global. A representatividade é a chave na questão, uma vez que uma alíquota da amostra global deve ser representativa do minério, mas as análises pontuais, que permitem observações muito mais detalhadas, não são. As principais técnicas analíticas em alíquotas de minério são as análises químicas de rocha

total (diversas técnicas), difratometria de raios X pelo método do pó, e algumas espectroscopias vibracionais, como FTIR e Raman/FT-Raman.

A identificação de materiais cristalinos por difratometria de raios X deve sua mais recente evolução a detectores mais sensíveis e rápidos, que permitem identificá-los desde décimos percentuais (menos em algumas situações), e também quantificá-los por deconvoluções como o método de Rietveld, com boa precisão, na mesma faixa de concentração. Componentes amorfos ou fases mal descritas também podem ser quantificados, com alguns procedimentos adicionais, e esse é um resultado exclusivo da difratometria de raios X.

Os diversos métodos de análise química de rocha total podem detectar praticamente qualquer elemento ou composto desde concentrações ínfimas como ppt (partes por trilhão). As espectroscopias vibracionais em amostras globais podem fornecer informações importantes sobre a composição química da amostra, particularmente ligações químicas diagnósticas, como hidroxilas em argilominerais por FTIR ou identificação do tipo de carbono por Raman.

Esses métodos de espectroscopia vibracional são também importantes para análises pontuais, particularmente através de microespectrômetro Raman acoplado ao microscópio petrográfico, um poderoso método, em geral auxiliar, para identificação de minerais. Os métodos pontuais mais importantes, no entanto, são os que envolvem imagens, principalmente de microscopia eletrônica, associadas a informações químicas pontuais por fluorescência de raios X (dispersão de energia, principalmente, ou de onda).

As análises de minérios por microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada à espectroscopia de dispersão de energia de fluorescência de raios X (EDS) e sistemas de automação e análise de imagens, chamadas genericamente de mineralogia automatizada, são hoje rotina em empresas de mineração de grande porte e em centros de pesquisa.

A detecção de baixos teores e de partículas e feições finas (abaixo de 1 μm), no entanto, é ainda um desafio. A resolução espacial típica na operação de um sistema de mineralogia automatizada é da ordem de alguns μm devido à profundidade e à extensão lateral da excitação, ambas de alguns μm , condicionadas pela tensão de aceleração e pelo número atômico do material. Para mitigar esse problema, o emprego conjunto de algumas tecnologias recentes mostra-se promissor.

Os MEVs com emissão de campo, agora mais estáveis e com preço mais acessível, são capazes de gerar um feixe de elétrons mais fino e com densidade de

corrente muito maior. Com isso, é possível trabalhar com menor tensão de aceleração e consequentemente menor volume de excitação e melhor resolução espacial.

Os novos detectores *in lens* permitem a obtenção de imagens com grande magnificação e melhor contraste, operando com uma distância de trabalho muito pequena. Da mesma forma, detectores de EDS mais sensíveis, com janelas maiores e mais finas, e processamento de sinal mais eficiente, também aceleram a aquisição de dados. Assim, a análise por mineralogia automatizada para bens minerais de elevado valor, como elementos do grupo da platina, torna-se viável. Para recursos minerais de minérios lateríticos, naturalmente muito finos, mas com menor valor agregado, ainda há requisitos adicionais de preparação de amostra e protocolos analíticos, que precisam ser desenvolvidos.

Uma outra abordagem para melhor resolução é a utilização de MEV com duplo feixe – feixe de elétrons e feixe de íons focado (FIB) – para produzir lâminas finas (~1 µm) da amostra e em seguida analisá-las. Assim, é possível reduzir o volume de excitação, sem, contudo, reduzir a tensão de aceleração.

Outra limitação intrínseca da caracterização mineralógica e tecnológica é a representatividade de uma análise efetuada em poucos micrômetros. As análises pontuais ganham representatividade ao considerar milhares de partículas, em procedimentos que podem durar várias horas. Ao aumentar a magnificação para analisar partículas finas, é necessário ampliar o número de campos analisados, o que, aliado ao tempo de aquisição maior devido à menor energia de excitação, potencializa o tempo total.

Essas são análises pontuais que adquirem representatividade pela sua multiplicação lateral, com recobrimento bidimensional da amostra. O processamento do minério, no entanto, requer informações tridimensionais. Tecnologias mais recentes, como microtomografia de raios X e imageamento com desbaste sequencial da amostra em MEV com duplo feixe, permitem a obtenção destes dados, no limite do que pode ser considerado representativo.

De forma geral, os desafios para a caracterização adequada de minérios são grandes e crescentes, mas vêm sendo acompanhados pelo desenvolvimento de instrumental analítico. O problema, neste contexto, é o custo de aquisição e operação dos equipamentos, progressivamente maiores quando caem os teores ou diminuem os tamanhos de partículas, e a formação e atualização dos recursos humanos envolvidos no desenvolvimento metodológico e geração de dados.

COMINUIÇÃO

A conjuntura atual mostra ênfase em novos equipamentos de cominuição (britagem e moagem) que têm demonstrado maior eficiência energética, tais como o HPGR e o Vertimill. Maior eficiência energética vem ao encontro da sustentabilidade dos processos em tecnologia mineral. Deve-se ter em mente que os diversos equipamentos de cominuição podem apresentar particularidades, como, por exemplo, a cominuição em leitos de partículas que ocorre em prensas de rolos, processos de impacto e moagem por compressão de partículas, abrasão, atrição etc.

Os diversos processos requerem o entendimento dos fenômenos que ocorrem nas operações unitárias simultaneamente às propriedades da rocha/minério com respeito aos processos envolvidos. Sendo assim, deve-se entender que os processos não podem ser estudados independentemente das rochas e o desenvolvimento de modelos de operações unitários está ligado ao desenvolvimento de técnicas de caracterização física das rochas/minérios.

Quanto à integração das diversas rotas de processamento para cominuição em geral, um sistema interessante, baseado em banco de dados, foi proposto por Morrel e, aparentemente, ainda está sendo melhorado e expandido. Neste sistema, um minério ou rocha é caracterizado em laboratório e diversos parâmetros associados às suas características de quebra são determinados. Estes parâmetros incluem um parâmetro de caracterização física que é a densidade específica da rocha, um parâmetro determinado a partir do ensaio de DWT e do BWI que é o parâmetro do ensaio de Bond para moinhos de bolas. De acordo com Morrel estas características são suficientes para determinar o consumo específico de energia para cominuição da rocha em uma série de circuitos de cominuição pré-estabelecidos como, por exemplo, HPGR/Bolas e ABC/SABC etc. Neste sistema é necessário especificar o parâmetro de desempenho de cada etapa, ou seja, o P80 do desmonte, das etapas de britagem e de moagem.

Outro exemplo deste tipo foi apresentado recentemente por D.W. Fuerstenau, envolvendo prensas de rolos de alta pressão. O sistema já permite produzir informações importantes do ponto de vista da rota de processamento a ser escolhida com base na maior eficiência energética (e consequentemente a rota mais sustentável). Estes sistemas são úteis mesmo que a prioridade seja minimizar o custo de investimento, já que, dentro deste cenário, podem existir alternativas que permitam a melhoria da eficiência da cominuição.

Os simuladores de plantas de processamento e de cominuição permitem este tipo de cálculo, porém, e em geral, simulações úteis requerem caracterização detalhada e a comparação de alternativas é consideravelmente complexa. A grande vantagem do sistema proposto por Morrel é a simplicidade. Por outro lado, é bastante provável que, neste estágio de desenvolvimento, a acuracidade da metodologia seja sofrível. Há, portanto, muito espaço para melhorias e esta parece ser uma área fértil para PD&I no setor.

O escopo da pesquisa nesta área se enquadra como a otimização de rotas de processamento para cominuição. Adicionalmente, dentro desta perspectiva, pode ser incluída uma linha importante que é a otimização do desmonte em função da rota de processamento. Ou seja, o impacto da curva de ROM (produzida pela furação e carga explosiva) nos CAPEX e OPEX da planta de britagem/moagem a jusante. Algumas iniciativas já foram tomadas nesta área, porém não com o enfoque atual e com o nível de conhecimento atual.

Outra linha de pesquisa importante na cominuição é o desenvolvimento de modelos e de técnicas de caracterização específicas para moagem SAG (e AG). Em função da necessidade de menor CAPEX, no Brasil, a moagem SAG torna-se uma alternativa importante, justamente por permitir um menor investimento de capital, com as muitas etapas de britagem e moagem reunidas em uma única operação. Esta estratégia é utilizada frequentemente no Canadá e na Austrália. Existem riscos, todavia, e os circuitos montados em torno de um moinho SAG só são eficientes energeticamente quando a rocha é suficientemente tenaz para servir como corpo moedor. Nem sempre um circuito montado em torno de um moinho tipo SAG é o mais eficiente em termos de custos operacionais. É necessário acertar o escalonamento para evitar a necessidade de expansão com britagem de *pebbles* e abertura de *pebbleports* ou outras medidas paliativas *a posteriori*, implicando em CAPEX adicional. Acertar o escalonamento concretiza a vantagem do menor custo de investimento.

Finalmente, a remoagem e a quantificação dos seus benefícios deveriam ser abordadas ainda que puramente na cominuição, mas preferencialmente em conjunto com a flotação de grossos (*rougher*) e a quantificação de partículas não liberadas.

FLOTAÇÃO

A flotação é a tecnologia mais amplamente empregada para a separação de partículas minerais e é baseada na capacidade de bolhas de ar aderirem em superfícies

minerais específicas em uma mistura água/minério denominada de polpa mineral. As partículas hidrofóbicas aderidas às bolhas de ar são transportadas até uma fase espuma de onde são coletadas no topo das máquinas de flotação, deixando na fase polpa as partículas hidrofílicas que não apresentam afinidade com o ar. A flotação pode ser adotada para a separação de uma ampla variedade de minerais e o uso de adequados reagentes químicos pode alterar ou adequar às propriedades superficiais das partículas para se otimizar e maximizar a separação.

Atualmente a flotação é empregada na produção de uma vasta gama de bens minerais, tais como: concentrados de minerais sulfetados de cobre, chumbo, zinco, molibdênio e sulfetos contendo ouro; concentrados de cloreto de potássio (silvinita); separação de matéria carbonosa de cinzas; separação de quartzo de óxidos de ferro; separação de fosfatos (apatitas) de minerais silicatados e carbonatados; concentrados de pirocloro para a produção de ligas à base de nióbio; produção de concentrados de barita, entre outros. Estimativas indicam que, globalmente, foram beneficiadas mais de três bilhões de toneladas de minérios por flotação no ano de 2014.

A aplicação da flotação em larga escala teve início há 110 anos e tornou possível o aproveitamento de minérios de baixos teores e de mineralogia complexa e que apresentam granulometria fina de liberação ($< 150 \mu\text{m}$). Outra característica do processo é a possibilidade de elevadas taxas de alimentação dos minérios às usinas de concentração por flotação, chegando em alguns casos ao beneficiamento de até 60 milhões de toneladas de minério por ano em uma planta.

O Brasil tem posição de destaque na indústria mineral mundial, em especial na produção de *commodities* minerais tais como concentrados de minérios de ferro, utilizados na produção de aço; concentrados de apatita e de silvinita aplicados na produção de fertilizantes fosfatados e de potássio; concentrados de pirocloro aplicados na produção da liga Fe-Nb; produção de concentrados de sulfetos de cobre e concentrados de ouro. A flotação é empregada em larga escala para a produção destes bens minerais, sendo a tecnologia aplicada na totalidade da produção de nióbio; em torno de 90% do fosfato, 50% dos concentrados de ferro e também parcela significativa do ouro produzido no país.

Em relação à evolução da tecnologia de flotação destaca-se a aplicação cada vez mais intensa de colunas de flotação, em especial para minérios de granulometria fina ($< 50 \mu\text{m}$); aprimoramento dos sistemas de geração de bolhas nas colunas de flotação através do uso de tubos de cavitação e estudos de aplicação e desenvolvimento de equipamentos para flotação de

partículas minerais grossas ($> 200 \mu\text{m}$).

Outra tendência importante observada é o aumento exponencial do volume das máquinas de flotação, que na década de 50 apresentavam volume máximo de $1,35 \text{ m}^3$ e atualmente existem máquinas em operação com volume de até 650 m^3 . O aumento expressivo no tamanho das máquinas de flotação traz novos desafios, em especial os relacionados aos estudos de caracterização hidrodinâmica e, até mesmo, à manutenção de equipamentos.

Quanto aos estudos científicos e fundamentais voltados ao processo de flotação destaca-se o desenvolvimento de modelos para melhor prever o comportamento das partículas minerais na zona de coleção (onde ocorre o contato bolha-partícula) e para o melhor entendimento dos fenômenos ocorridos na zona de espuma.

Por fim, também se destacam os grandes avanços observados no desenvolvimento de novos reagentes químicos aplicados ao processo. Neste caso observam-se cada vez mais parcerias entre as empresas mineradoras e grandes companhias da indústria química que focam o desenvolvimento de produtos que melhor atendam as demandas dos clientes (*taylormade*).

As expectativas futuras em relação à indústria mineral indicam que a tecnologia de flotação terá um papel cada vez mais preponderante para a produção de minerais indispensáveis para a evolução do bem-estar das sociedades, dado o aumento verificado da demanda destes bens, o que leva à necessidade do beneficiamento de maiores quantidades de minério, e também devido ao fato desta tecnologia ter a capacidade de processar minérios de baixos teores e de mineralogia cada vez mais complexa. Neste cenário, o avanço da aplicação da flotação no Brasil deverá ter posição de destaque, haja vista os substanciais recursos minerais do país e a já consolidada aplicação desta tecnologia nas usinas de beneficiamento de minérios do país.

OUTROS PROCESSOS

Dentre os diversos outros processos de processamento mineral existem alguns tópicos de interesse especial. Dentro do atual contexto, as etapas de separação sólido-líquido assumem importância significativa, já que os custos de disposição de rejeitos finos estão associados à obtenção de licenças ambientais para construção de barragens. Aqui podemos listar como alternativa a tecnologia de pastas, com espessadores de alta capacidade. Esta alternativa é, a bem da verdade, muito realista e alcançável.

Por outro lado, tem-se explorado alternativas de processamento a seco. Aqui o desafio tecnológico é

muito maior. Moagem a seco é possível e bastante praticada. Talvez seja suficiente explorar os moinhos de rolos verticais, muito utilizados na fabricação de cimento, como alternativa aos moinhos de bolas convencionais e ao vertimill, à base de água. Porém, métodos de concentração a seco com partículas finas, nos tamanhos requeridos para uma boa liberação das fases minerais, não são eficientes. Separadores magnéticos, eletrostáticos, tribo-eletrostáticos etc. são candidatos, porém necessitam ser reconfigurados e até mesmo reinventados.

Nem sempre a alternativa para o processamento a seco está vinculada a partículas muito finas. Um exemplo notório é a nova planta de processamento de *Sinter Feed* da Vale em Carajás. Neste caso, etapas de peneiramento e classificação a úmido foram substituídas por processos a seco, com resultados muito positivos. O desafio tecnológico aqui é alcançar a mesma eficiência dos processos a úmido empregados anteriormente.

Finalmente, processos de pré-concentração são muito pouco utilizados no Brasil, talvez até devido à riqueza de minérios ricos, de alto teor. A pré-concentração é uma estratégia que permite grande economia de recursos de capital já que, após a pré-concentração, a planta de processamento só precisa ser construída para tratar uma fração reduzida da produção na mina e, por vezes, bastante reduzida. Com isso a capacidade da planta de processamento pode ser significativamente reduzida, otimizando também os custos operacionais.

Técnicas de pré-concentração podem ser muito diversas. Pouco empregados no Brasil e comprovadamente eficientes são os processos de concentração gravítica que se utilizam de meio fluido artificial (meio denso) e os processos de catação automática ou catação eletrônica (*ore sorting*).

Meio denso é consideravelmente mais eficiente que outras operações de concentração gravítica, porém muito pouco utilizado no Brasil, podendo ser bem empregado no processamento de partículas na faixa de $0,3 \text{ mm}$ até 1 mm , embora tamanhos consideravelmente maiores também possam ser processados. Minérios onde o diferencial de densidade é alto não necessitam de muita liberação para uma pré-concentração vantajosa.

Ore Sorting encontra aplicações em faixas mais grosseiras de tamanhos, e tem como uma vantagem importante ser um processo que não utiliza nem depende de água. Embora aplicações deste tipo sejam bastante utilizadas em outros países, seja em minerais industriais, metais base e metais preciosos, gemas, diamantes e carvão, na indústria mineral brasileira não há uma aplicação prática conhecida.

REFERÊNCIAS

- BARRATT, D.J.; DOLL, A.G. Testwork Programs that Deliver Multiple Data Sets of Comminution Parameters for Use in Mine Planning and Project Engineering. In: PROCEMIN 2008. *Anais...* Santiago, Chile, 2008.
- BULLED, D.; MCINNES, C. *Flotation plant design and production planning through geometallurgical modeling*. Centenary of Flotation Symposium, Brisbane, QLD, 6-9. June 2005.
- FITTON, T.; SEDDON, K. Paste and thickened tailings - myths busting and clarification. *Proceedings of Paste 2013*. Australia: Australian Centre for Geomechanics, p. 37-46. 2013.
- FUERSTENAU, D.W. An approach to assessing energy efficiency, grindability and HPGR technology through comminution research. In: *International Mineral Processing Congress*, 27, Chile. Keynote Address. 2014.
- KEPPLER, R.; LAROS, T.; SCHOEBRUNN, F. Deep Paste Thickening Systems. *Proceedings...* 1998. MINEFILL'98, Brisbane, Australia.
- LESSARD, J.; BAKKER, J.; MCHUGH, L. Development of ore sorting and its impact on mineral processing economics. *Minerals Engineering*, v. 65, p. 88-97, 2014. ISSN 0892-6875.
- MCKEN, A.; WILLIAMS, S. An overview of the small-scale tests required to characterize ore grindability. In: INTERNATIONAL AUTOGENOUS AND SEMI-AUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY 2006. *Anais...* Vancouver, Canada, 2006.
- MORRELL, S. Predicting the overall specific energy requirement of crushing, high pressure grinding roll and tumbling mill circuits. *Minerals Engineering*, v. 8, n. 6, 2009. ISSN 0892-6875.
- MORRELL, S. Predicting the specific energy required for size reduction of relatively coarse feeds in conventional crushers and high pressure grinding rolls. *Minerals Engineering*, v. 23, n. 2, p. 151-153, Jan. 2010. ISSN 0892-6875.
- POWELL, M.; BENZER, H.; MAINZA, A. The strengths of SAG and HPGR in flexible circuit designs. In: MAJOR, K.; FLINTOFF, B.C.; KLEIN, B. and MCLEOD, K. SAG. 2011. *International Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Rolls Technology 2011*, Vancouver, Canada, p. 25-28. 2011.

Metalurgia extrativa

Ronaldo L. Santos

Marisa Nascimento

Andrea C. Rizzo

Claudia Duarte Cunha

Centro de Tecnologia Mineral – CETEM

RESUMO

Dentre as definições existentes para o termo metalurgia extrativa, incluímos aquela que a designa como um dos ramos da engenharia metalúrgica, ao qual estão associados os vários processos e métodos de extração de elementos metálicos e não-metálicos de interesse industrial, a partir de seus minérios e concentrados minerais. Este sub-capítulo apresenta, de forma resumida, alguns dos desafios e tendências tecnológicas mais significativas para que ações de pesquisa e desenvolvimento realizadas no Brasil possam, no curto e médio prazos, resultar em inovações sustentáveis em termos de processos e técnicas aplicados às tecnologias extrativas minerais. Espera-se assim reverter o estágio atual, qualificando o Brasil entre os países exportadores não somente de *commodities*, mas também de tecnologias e de *specialties* minerais, como já são a Austrália, Canadá, Finlândia, Chile e China, dentre outros.

Palavras-chave Metalurgia Extrativa. Sustentabilidade. Inovação.

INTRODUÇÃO

Atualmente são muitos os países dependentes de importações de produtos minerais de relevância, para garantir suas necessidades de manutenção de desenvolvimento e mesmo hegemonia. No caso brasileiro, há os exemplos do potássio, do fosfato e dos elementos de terras-raras, além de outros elementos considerados estratégicos (DNPM, 2014).

Entretanto, o Brasil possui imensas reservas minerais, que podem atender a sua demanda interna e a uma parcela da demanda mundial, não apenas por meio do fornecimento de minério ou concentrado bruto, mas também a partir de produtos de maior valor agregado, que podem ser obtidos nas etapas finais das cadeias produtivas de bens minerais. Por outro lado, também é de conhecimento público que cada vez mais a indústria extrativa mineral tem se deparado com o desafio de desenvolver e aplicar tecnologias sustentáveis para o tratamento e/ou processamento de minerais complexos e de baixos teores.

Outro aspecto importante é que, além dos depósitos minerais clássicos, outras fontes geológicas não-tradicionais (por exemplo, os nódulos do fundo do mar) provavelmente irão contribuir para o fornecimento futuro de metais. Com a mesma conotação de sustentabilidade deve-se focar esforços no reaproveitamento, reprocessamento ou reciclagem de produtos ou resíduos industriais decorrentes das diversas atividades minero-metalúrgicas.

HIDROMETALURGIA

O termo hidrometalurgia designa, em geral, processos de extração, separação e recuperação de elementos metálicos contidos em minérios, envolvendo o uso do meio aquoso. As aplicações tradicionais da hidrometalurgia incluem a produção de alumina, ouro, urânio, zinco, níquel, cobre, titânio, terras-raras, dentre outros. Nos processos hidrometalúrgicos são usadas operações unitárias clássicas como a lixiviação, filtração, extração por solventes, separação por troca iônica, cristalização e precipitação que operam, em geral, em meio aquoso, além das operações típicas da eletrometalurgia, como: a eletrorecuperação e o eletrorefino de metais.

O texto que se segue é resultado de uma atualização de informações para a área de hidrometalurgia que teve como ponto de partida o trabalho elaborado pela Professora Virginia S. T. Ciminelli (UFMG) para a publicação “Tendências Tecnológicas - Brasil 2015” editado no ano de 2007 pelos pesquisadores do CETEM e da CPRM, Francisco R. C. Fernandes, Gerson M. M. de Matos, Zuleica C. Castilhos e Adão B. da Luz. O texto teve o objetivo de servir, para os próximos anos, como uma orientação ou subsídio para a definição de prioridades ou desafios tecnológicos para área.

A hidrometalurgia enfrenta, atualmente, alguns desafios e pode tender para um futuro duvidoso se estiver associada a elevados custos de produção, alto consumo de energia, gerar grandes volumes de resíduos tóxicos e, ainda, se estiver atrelada a um mercado sensível, à alta

variabilidade nos preços das *commodities*. Devemos lembrar que hidrometalurgia é originária da química aplicada e foi desenvolvida através de adaptações que tiveram como base a química analítica mineral. Assim, faz-se necessário desenvolver, continuamente, ações inovadoras que permitam uma melhoria dos processos, não só em termos de produtividade, mas também atendendo ao contexto sustentável. Nesse sentido, devem ser feitas análises críticas das várias operações unitárias ou processos, de modo a definir os desafios a serem vencidos para que se caminhe obrigatoriamente em direção às Melhores Tecnologias Disponíveis (BAT, sigla em inglês).

Nesse contexto, como **desafios tecnológicos** em hidrometalurgia devem ser observados alguns dos aspectos relacionados ao aumento da sustentabilidade dos processos extrativos, tais como: minimizar o consumo de energia e de reagentes e a geração de resíduos e de efluentes. Absolutamente necessário se faz caracterizar as propriedades das matérias-primas, produtos, coprodutos, subprodutos e resíduos, assim como otimizar as operações unitárias, a partir da análise e desenvolvimento de processos que incluem a modelagem e simulação, assim como análise termodinâmica e de controle de processos, sem nunca perder o foco nas questões ambientais. Ainda, no que concerne às questões ambientais é imprescindível dar prioridade ao uso racional e reuso da água, assim como ao tratamento e à reciclagem de efluentes e resíduos. São justamente esses fatores que caracterizam e justificam, por sua natureza de aplicação, as ações de PD&I em hidrometalurgia.

Do ponto de vista dos estudos hidrometalúrgicos de natureza mais fundamental, a pesquisa tem utilizado técnicas avançadas como, por exemplo: a de análises instrumentais de superfícies e de interfaces, bem como técnicas eletroquímicas entre outras, que têm permitido grandes avanços no entendimento dos mecanismos das reações. No caso da lixiviação, podemos citar como tendência de crescimento a utilização de novos materiais para a construção de reatores mais resistentes e mais eficientes, em termos de otimizar os fenômenos de transferência de massa.

A busca por sistemas reacionais autocatalíticos deve merecer mais atenção e, por conseguinte, as ferramentas de modelagem molecular deverão ser mais intensivamente empregadas. A ampliação do número de grupos de pesquisa nessa área do conhecimento deve ser incentivada.

Minérios complexos ou de natureza polimineral representam desafios em termos de encontrar reagentes mais seletivos, em comparação com aqueles mais tradi-

cionalmente utilizados. A lixiviação *in situ* deve ocupar um espaço maior, considerando a exploração de minérios de baixo teor e/ou de mineralogia mais complexa.

Tratamentos até então considerados no Brasil como não-convencionais, como: a redução com H_2 para recuperar elementos metálicos de efluentes industriais; a ativação mecânica de minérios ou concentrados para facilitar a etapa de solubilização; a aplicação de ultrassom em processos de lixiviação ou de eletrorrecuperação de metais; assim como o tratamento térmico por micro-ondas poderá favorecer o aumento dos rendimentos das reações de extração seletiva dos elementos de interesse de seus concentrados e minérios.

Não se deve ignorar, entretanto, os avanços importantes advindos do desenvolvimento dos processos hidrometalúrgicos com polpas, que utilizam resinas e/ou outros adsorventes industriais, tais como: *carbon in pulp* (CIP), *carbon in leach* (CIL) e *solvent in pulp* (SIP). Nesse contexto as oportunidades de melhoria e avanços passam pela obtenção de resinas funcionalizadas e mais resistentes à abrasão, assim como de carvões ativados de maior área superficial e resistência mecânica.

Da mesma forma, para os processos de separação como a extração por solventes, as pesquisas com a utilização de misturas de extratantes e seus efeitos sinérgicos deverão ser aumentadas. Outro exemplo consiste no uso da modelagem computacional para criar novos reagentes para aplicações hidrometalúrgicas. A eletrolixiviação de minérios e/ou concentrados, assistida por ultrassom, atualmente é muito pouco aplicada no cenário brasileiro, representando uma oportunidade de melhoria desse processo.

Outro aspecto importante que merece atenção é a montagem e operação de plantas piloto hidrometalúrgicas, como consequência dos ensaios de bancada. Especificamente em relação aos ensaios de bancada, é previsível que cada vez mais deverá se fazer uso dos recursos de modelagem molecular para racionalizar o tempo a eles dedicado. É sabido que testes em plantas piloto devem ser incluídos nos estudos de viabilidade de projetos com a intenção de reduzir os riscos associados ao aumento de escala. Os ensaios em escala piloto permitem detectar problemas, muitas vezes graves, que não são detectados em escala de bancada e podem ser previstos ou solucionados nessa etapa, evitando resultados decepcionantes na escala industrial. A execução de ensaios nessa escala é uma ferramenta reconhecida mundialmente como eficaz para o desenvolvimento e otimização de processos hidrometalúrgicos, gerando informações e dados de maior confiabilidade e minimizando os riscos do projeto. Além disso, a planta piloto

também permite o treinamento da equipe operacional e dos profissionais de gestão do processo, além de permitir experimentar com segurança mudanças de condições operacionais que sejam propostas em circuitos já existentes e em operação.

No entanto, poucas instituições brasileiras dispõem de infraestrutura e equipe especializada para o atendimento das demandas de montagem e de operação plantas piloto hidrometalúrgicas no país.

Outro gargalo tecnológico existente no Brasil é o relativo número reduzido de grupos de pesquisa, atuando especificamente em processos hidrometalúrgicos, no desenvolvimento de pesquisas em controle e modelagem de processos. O valor do controle de processo deve ser reconhecido, já que é fundamental para que as operações unitárias e reações características sejam levadas a efeito, corretamente, dentro dos parâmetros projetados. Há a necessidade de desenvolvimento de sensores de controle de processos adequados às condições variadas e mais extremas das várias etapas de um fluxograma hidrometalúrgico para a melhor obtenção das respostas do processo. Constata-se, até então, que, diferentemente do que acontece na área de beneficiamento de minérios, a modelagem e simulação de processos hidrometalúrgicos são relativamente pouco pesquisadas no Brasil e quase sempre dependem de soluções importadas. É sabido, entretanto, que a modelagem e a simulação são ferramentas que permitem a otimização de circuitos, de forma a se manter uma relação favorável de custos de processo.

Nesse contexto, ações são requeridas para a promoção de pesquisas nessa área, além do desenvolvimento de novos equipamentos. A tendência à melhoria e à adaptação de processos existentes tem sido mais marcante nos dias atuais do que tem sido as descobertas em termos de novos processos. Assim, é desejável que ferramentas de modelagem matemática e simulação possam ser combinadas para aumentar a capacidade de experimentação e de tratamento de dados (termodinâmicos, cinéticos, mecânicos etc.) antes de se realizar uma grande bateria de testes. Nesse contexto deve ser destacado que o uso de técnicas de planejamento de experimentos tende a minimizar os custos e maximizar a obtenção de informações.

Em termos ambientais, é possível dizer que os processos hidrometalúrgicos apresentam riscos menores, quando comparados com as atividades de pirometalurgia, por exemplo. No entanto, essas atividades hidrometalúrgicas, principalmente para a extração dos metais não-ferrosos, que representam o grande nicho de suas aplicações, requerem grandes quantidades de água e energia.

O reuso de água usada nos processos tornar-se-á obrigatória, tendo em vista, principalmente, as pressões que virão a partir da sociedade e dos órgãos fiscalizadores. Esse cenário representa uma oportunidade para o aumento do uso dos tratamentos secundários e terciários de purificação de efluentes, por meio de processos de troca por osmose direta e osmose reversa, além de outros tratamentos passíveis de baixo custo e de alta eficácia. O uso de adsorventes poliméricos modificados e naturais deve ser objeto de novos desenvolvimentos e aperfeiçoamentos.

É sabido que muitas operações hidrometalúrgicas podem emitir gases poluentes e efluentes líquidos que prejudicam o meio ambiente e a saúde de trabalhadores. O conceito de gerar-tratar efluentes/resíduos em cada operação unitária, deverá ganhar muito espaço, permitindo uma segregação mais fácil, tanto de resíduos, quanto de efluentes. Desse modo, será facilitado o seu reuso ou descarte em condições de menor impacto e de toxicidade. Particularmente, podemos citar os processos para produção de terras-raras, aos quais estão associados radionuclídeos, por representarem riscos adicionais por conta da radiação intrínseca e do seu tempo de abatimento.

Dentro do desenvolvimento de novos temas em pesquisas hidrometalúrgicas, deve ser incluída a obrigatoriedade de também pesquisar novos processos e técnicas, mais eficazes que as melhores práticas atuais, de modo que garantam que o descarte de resíduos e efluentes esteja sempre abaixo dos limites máximos admitidos pela legislação. Da mesma forma, projeta-se que os tratamentos terciários ou de polimento devam ser objeto, portanto, de mais pesquisa e de uso, no médio e longo prazo.

No caso dos efluentes, existe um espaço a ser ocupado pelos processos que utilizam membranas trocadoras de íons e resinas poliméricas de adsorção seletiva de íons, reconhecidas como resinas íons específicas. Portanto, espera-se que a funcionalização e/ou metalização de polímeros possa abrir novas perspectivas para ampliar o seu uso. Assim se espera que sejam diminuídos os impactos e os níveis da poluição, assim como melhore a conservação e a otimização do uso dos recursos naturais, projetando-se a eliminação dos riscos para a saúde dos trabalhadores. Isso porque, devemos esperar que, no futuro, a população brasileira aumente sua resistência ao uso de novas áreas para a mineração e para a instalação de indústrias extrativas.

Com respeito aos processos eletrolíticos sugere-se que ainda há espaço para evolução, no tocante ao uso de eletrodos tridimensionais de grande área superficial. Esses eletrodos podem ser desenvolvidos

e fabricados sob a forma de esponjas metálicas ou de carvão vítreo reticulado. Da mesma forma cabe avançar no desenvolvimento e no uso de células com arranjo de eletrodos e soluções tipo *flowthrough*. Nas questões relacionadas à minimização do consumo de energia e ao aumento da eficiência dos processos, deve-se focar na diminuição dos efeitos da sobretensão de hidrogênio e/ou oxigênio. Entende-se que o uso de correntes pulsantes, em suas diferentes modulações, traz vantagens significativas ainda não esgotadas ao nível do conhecimento atual, podendo ser um diferencial na recuperação de metais de soluções diluídas.

Finalizando, deve ser destacado que as emissões de efluentes gasosos e líquidos, a drenagem ácida de minas e a disposição de rejeitos são questões cada vez mais debatidas a nível popular. Assim, pesquisas devem ser intensificadas sobre esses temas, incluindo as questões sobre como melhor utilizar os recursos minerais, incluindo a premissa do seu aproveitamento o mais completo possível das jazidas, de maneira a garantir, sobretudo, a mais ampla aderência aos preceitos do desenvolvimento sustentável.

Essas premissas, somadas ao aumento dos custos operacionais para o tratamento de minérios, fazem com que a reciclagem, o reprocessamento ou reaproveitamento de fontes secundárias tornem-se atrativas para muitos elementos. Metais preciosos, terras raras, níquel, zinco, cobalto e urânio são alguns dos muitos exemplos de elementos que merecem o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis de reaproveitamento.

A reciclagem por via hidrometalúrgica de produtos eletrônicos, ímãs permanentes, lâmpadas, catalisadores entre outros produtos finais, alguns deles disponibilizados atualmente como sucata, podem fornecer alternativas viáveis aos processos clássicos de produção, diminuindo, assim, os riscos ambientais decorrentes de uma disposição inadequada, mas também a importância estratégica da dependência de fornecimento por outros países.

BIOMINERAÇÃO/BIOMETALURGIA

Biomineração ou biometalurgia é um termo genérico que descreve o processamento de minérios e concentrados para obtenção de metais de interesse utilizando a rota biotecnológica. Os microrganismos interagem com os metais, transformando-os através da bioacumulação, bioprecipitação, biorredução, bio-oxidação e outros mecanismos. Algumas destas atividades resultam na solubilização ou extração de metais, sendo este

fundamento usado com êxito nos processos industriais da biomineração, incluindo os biohidrometalúrgicos. O processo biológico tem emergido como uma tecnologia alternativa aos métodos físico-químicos tradicionais de processamento mineral, especialmente para obtenção de metais como ouro e cobre, em função do baixo custo operacional, quando comparado aos outros processos convencionais. Além disso, pode ser considerado uma alternativa tecnológica viável quando envolve minérios de complexa mineralogia, e difíceis de serem tratados através das tecnologias convencionais.

A aplicação moderna da biomineração só foi iniciada na década de 1960 com a construção e irrigação de pilhas para a recuperação de cobre na mina Bingham Canyon, Utah, EUA, pertencente à Kennecott. Já a aplicação comercial pioneira de biopilhas de lixiviação de cobre, projetada para explorar a atividade microbiana, foi iniciada em 1980 no Chile, na mina *Lo Aguirre*. Esta mina processou 16.000 t de minério/dia entre 1980 e 1996, usando a biolixiviação. Numerosas operações de biopilhas de cobre foram comissionadas e, desde então, o Chile produz cerca de 400.000 t de cobre por meio de processo biológico, representando 5% da produção total de cobre (GAHAN et al., 2012).

A biomineração hoje é amplamente praticada comercialmente em todo o mundo para: melhorar a extração de ouro a partir de minérios e concentrados, nos quais o metal precioso se encontra ocluído em sulfeto mineral; para extrair cobre a partir de fontes secundárias (sucatas metálicas ou minerais oxidados); e, de forma mais limitada, para lixiviar outros metais diferentes do cobre a partir de minérios e concentrados. As mais importantes operações da biomineração estão localizadas em países em desenvolvimento, como Chile, Indonésia, México, Peru e Zâmbia.

Dados recentes demonstram que a biolixiviação de cobre em pilhas (*bioheap leaching*) é responsável por 7% (cerca de 1 Mt/a) da produção global anual de aproximadamente 17 Mt de cobre. Estima-se que, se a *dump leaching* for contabilizada, cerca de 20-25% da produção de cobre do mundo é obtida através da biomineração. Entre 1980 e 1998, a quantidade de cobre produzida mundialmente a partir da biomineração aumentou de 10 para 25%.

Em 1999, a Newmont Mining Corporation iniciou a aplicação comercial da biolixiviação em pilhas como pré-tratamento de minérios refratários de ouro. Estes minérios contêm partículas microscópicas de ouro que estão ocluídas em sulfetos minerais, geralmente, pirita, arsenopirita, ou ambas (BRIERLEY, 2008; GAHAN et al., 2012).

A Talvivaara Mining Company, localizada na Finlândia, iniciou uma planta piloto de lixiviação em pilha *on-site*, em junho de 2005, e a aplicação da biolixiviação iniciou em agosto de 2005. A mina entrou em plena operação em 2010 e a produção de níquel é de aproximadamente 33.000 t, tendo potencial de fornecer 2,3% da produção mundial.

Países como África do Sul, Austrália, Brasil, China, Cazaquistão, Uzbequistão possuem histórico de operações (atuais e antigas) de plantas de bio-oxidação em escala industrial utilizando tanques agitados para o pré-tratamento de ouro presente em sulfetos refratários. A planta da Kasese Cobalt Company Limited, em Uganda, também utiliza a bio-oxidação em reatores CSTR (*continuous stirred tank reactor*) para recuperar cobalto, níquel, cobre e zinco (BRIERLEY, 2008; GAHAN et al., 2012). Na biomineração utilizando biorreatores agitados, com aeração intensa e cuidadosamente controlados, a decomposição do mineral ocorre em dias ao invés de semanas ou meses como nos sistemas com irrigação (biolixiviação em pilhas, por exemplo).

No Brasil, em particular, a planta industrial da Mineração São Bento, da empresa AngloGold Ashanti, iniciou sua operação em 1991 utilizando o processo BIOX® para o pré-tratamento de concentrado refratário de ouro em biorreator agitado, com capacidade de 150 t. No entanto, em 2008, as operações da planta foram encerradas em razão de descontinuidade das atividades de lavra e da baixa cotação do ouro no mercado das *commodities* (GAHAN et al., 2012).

Recentemente, vem acontecendo, no cenário mundial, o fortalecimento e o aprimoramento do uso de processos biotecnológicos para o tratamento de minérios secundários e o reaproveitamento dos resíduos de mineração, buscando a sustentabilidade do setor e a agregação de valor aos rejeitos. As tecnologias empregadas, em ambos os casos, geralmente requerem baixo investimento de capital inicial e baixo custo operacional, devido à simplicidade das instalações utilizadas, sendo aplicadas, atualmente, em escala industrial para recuperação de metais como cobre, urânio e ouro, em países como: EUA, Rússia, Chile, Espanha, Canadá, África do Sul, Austrália, entre outros.

No Brasil, a biolixiviação do cobre e do níquel tem sido muito estudada (estudos fundamentais e em escala piloto) em minerais sulfetados de baixo teor e rejeitos de processamento mineral, merecendo investimento de grandes empresas como a Mineração Caraíba e Votorantim Metais.

Agenda Tecnológica

Devido ao aumento da demanda mundial por bens minerais, tem-se verificado um progressivo esgotamento das reservas contendo altos teores de metais de interesse econômico. Esse cenário impõe a necessidade do desenvolvimento de métodos alternativos para o aproveitamento de depósitos que, até então, não vinham sendo aproveitados economicamente. A biotecnologia apresenta vantagens competitivas quando se busca viabilizar a produção de minérios com composição polimineral mais complexa e que apresentam teores que são considerados antieconômicos para serem tratados pelos métodos tradicionais.

Espera-se que a pesquisa e o desenvolvimento industrial da biolixiviação em pilhas de minérios de baixo teor e concentrados junto com os processos em biorreator (tanques de biolixiviação e bio-oxidação - CSTR) deem um salto maior para sustentar o avanço tecnológico da indústria mineral nos próximos anos.

Além disso, a preocupação constante no que diz respeito à possível futura escassez de suprimentos de metais tem motivado a realização de projetos de PD&I com maior ênfase no aproveitamento de metais de fontes alternativas (minérios mais complexos ou sucatas metálicas) ou resíduos gerados a partir de diferentes fontes.

Tendo como base o documento “Panorama da Biotecnologia no Mundo e no Brasil” (ABDI – CGEE, 2008) e a atuação do CETEM/MCTI na área de biotecnologia (industrial e ambiental) nos últimos 20 anos, destaca-se como principal ponto crítico e gargalo em Biotecnologia no Brasil a dificuldade no *scale up* e comercialização das tecnologias envolvendo os bioprocessos. A descoberta das interações dos micro-organismos com minerais sustenta a importância dos mesmos em fazer da terra um ambiente adequado para todas as formas de vida. O valor da solubilização mediada por micro-organismos (biossolubilização) já é conhecido há décadas e é amplamente explorada em processos industriais, visando a recuperação de metais a partir de minérios.

O estudo da interação mineral – micro-organismo é, no entanto, uma etapa crucial para o desenvolvimento de estratégias promissoras em todos os setores da biotecnologia. Pode-se acrescentar que no futuro próximo, o estudo das ciências “ômicas” (Genômica, Proteômica, Transcriptômica e Metabolômica) associado à aplicação das propriedades metabólicas das comunidades microbianas capazes de promover a biossolubilização poderão se tornar a força motriz na expansão do setor de biomineração.

A realização de investimentos maciços nos desafios tecnológicos anteriormente citados, poderá resultar:

- i) Na realização de projetos de pesquisa científica e tecnológica que visem ao desenvolvimento de produtos e processos biotecnológicos para otimizar o processamento de minérios e concentrados para obtenção de metais de interesse utilizando a rota biotecnológica;
- ii) Promoção da formação de recursos humanos na área; e
- iii) Indução da transferência de tecnologia e licenciamento de produtos relacionados à biomineração.

REFERÊNCIA

- ABDI-Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
– CGEE-Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.
Panorama da Biotecnologia no Mundo e no Brasil. 170 p. 2010b. Disponível em: <<http://www.abdi.com.br/Estudo/Panorama%20Setorial%20Biotecnologia.pdf>>. Acesso em 25 de abril de 2015.
- ABDI-Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial.
Biotecnologia: iniciativa nacional de inovação, panorama de biotecnologia. Brasília: ABDI/CGEE, 137 p. 2008. Disponível em: <<http://www.abdi.com.br/Estudo/Panorama%20Setorial%20Biotecnologia.pdf>>. Acesso em 25 de abril de 2015.
- BRIERLEY, C. L. How will biomining be applied in future?
Transactions of Nonferrous Metals Society of China, v.18, n.6, p.1302-1310, 2008. ISSN 1003-6326.
- BRIERLEY, C. L. Biohydrometallurgical prospects.
Hydrometallurgy, Amsterdam, v. 104, p. 324-328, 2010. ISSN 036174-7.
- GAHAN, C. S. et al. Biohydrometallurgy and biomineral processing technology: a review on its past, present and future. *Research Journal of Recent Sciences*, v. 1, n. 10, p. 85-88, 2012. ISSN 2277-2502.

Minerais estratégicos: terras raras e lítio

Marisa Nascimento

Ronaldo L. Santos

Paulo F. A. Braga

Sílvia C. A. França

Centro de Tecnologia Mineral – CETEM

RESUMO

O conceito de minerais estratégicos adotado nesse texto é consoante com as definições adotadas pelo Plano Nacional da Mineração- PNM/MME (2010-2030), assim como pela Estratégia Nacional da Ciência, Tecnologia e Inovação-ENCTI/MCTI (2012-2015), a qual está próxima de ser relançada para o período 2016-2019. Assim, são considerados estratégicos para o país os minerais e/ou elementos que sejam escassos, críticos ou essenciais de modo a garantir vantagens comparativas competitivas por meio da geração de divisas, mas que também possam representar oportunidades de aplicação em alta tecnologia e, ainda, aqueles dos quais haja uma forte dependência de importação. O texto apresenta, portanto, uma síntese de oportunidades de exploração e de tendências de aplicação de dois grupos de minerais que contêm elementos estratégicos, a saber: os elementos das terras raras e o lítio. Em ambos os casos são mostradas as possibilidades e alternativas de seu aproveitamento, em especial na geração e armazenamento da chamada energia verde, mas também na substituição gradual do uso de combustíveis fósseis em veículos automotivos.

Palavras-chave Minerais Estratégicos. Terras raras. Lítio.

TERRAS RARAS

As Terras Raras (TRs) formam um grupo de 17 elementos constituídos pela série dos lantanídeos com a inclusão dos elementos Ítrio e Escândio. Juntamente com outros elementos estratégicos, os elementos de terras raras são considerados elementos “portadores de futuro”.

O texto que se segue foi baseado no trabalho “Uso e aplicações de terras raras no Brasil: horizonte 2012-2030” (CGEE, 2013). Esse estudo foi realizado pelo CGEE, por solicitação da Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (SETEC), do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Participaram desse estudo mais de 70 especialistas e gestores do governo, da academia, ICT e empresas, o que torna esse trabalho uma referência de importância diferenciada para o assunto. Assim, são apresentados aqui as principais abordagens do texto com o objetivo de tratar eventuais lacunas existentes e consolidar proposições e recomendações estratégicas sobre esse tema que é de alto potencial para o país. As principais percepções e sugestões para a área de tecnologia mineral, em um horizonte até 2030, discutidas no texto original, foram:

- A necessidade urgente de mapeamento e dimensionamento das ocorrências de TRs no país, a confirmação de novas reservas e a ampliação das reservas já conhecidas: A partir do mapeamento e dimensionamento das ocorrências, os recursos minerais em TRs no país deverão ser explorados de forma sustentável. Espera-se a confirmação de importantes reservas de TRs em mais de uma região brasileira;
- Desenvolvimento de projetos de exploração por empresas privadas, com aumento da produção, atualmente com participação reduzida na produção mundial de TRs;
- Priorização dos minerais estratégicos nas políticas do Governo Federal, especialmente a ENCTI do MCTI e o PNM 2030 do MME, e intensificação dos programas de geologia básica e de recursos minerais da CPRM, voltados aos minerais estratégicos. Foco no desenvolvimento e confirmação de recursos e reservas minerais;
- Criação de um “Programa Nacional de PD&I para Terras Raras”, voltado preponderantemente para o fortalecimento da infraestrutura laboratorial, formação e capacitação de pessoal e projetos de PD&I. Estabelecimento, à semelhança dos setores de petróleo e elétrico, de mecanismos de financiamento de PD&I pelas empresas, em cooperação com universidades e ICT;
- Definição e início da implementação de uma política industrial de estruturação da cadeia produtiva de TR em suas diversas fases: processamento mineral, processamento químico e processos industriais. Estímulo à formação de parcerias público-privadas. Incentivo a verticalização e organização industrial da cadeia produtiva de TR e atração de empresas de alta tecnologia baseadas em TRs;
- Implementação do novo Marco Regulatório Mineral, com efetivo cumprimento das obrigações associadas aos direitos minerários. Reavaliação do papel da CNEN como parceiro das empresas, ICT e universidades no equacionamento das questões

relativas a TRs, quando associadas a minerais radioativos. Interpretação da legislação ambiental quanto às atividades de mineração de TRs;

- Consolidação de parcerias, consórcios e *joint ventures* para exploração sustentável de TRs no país.

A visão de futuro da cadeia produtiva de TRs no Brasil, considerando o horizonte de 2030, refere-se à auto-suficiência e inserção competitiva do Brasil no mercado internacional de terras raras, a partir do aproveitamento racional, eficiente e integral desses recursos minerais, com domínio científico e tecnológico ao longo de toda a cadeia produtiva, obedecendo aos preceitos de sustentabilidade. Então, podemos sintetizar a seguir como estratégia nacional para atingir essa visão:

- Realizar mapeamento de ocorrências e identificação e dimensionamento das reservas, e viabilizar a produção e processamento mineral de TRs;
- Encaminhar e aprovar o Novo Marco Regulatório Mineral, explicitando aspectos referentes ao desenvolvimento da cadeia produtiva de TRs;
- Promover políticas públicas de cunho mineral, industrial e de CT&I voltadas para o desenvolvimento da cadeia produtiva de TR;
- Equacionar as questões ambientais relacionadas à presença de radionuclídeos em jazidas na legislação brasileira;
- Criar mecanismos de financiamento em condições compatíveis com os concorrentes internacionais e incentivos para atração de empresas de toda a cadeia produtiva;-
- Viabilizar as cadeias produtivas de aplicações de TRs de forma sustentável e competitiva;
- Consolidar e expandir a infraestrutura de laboratórios, facilidades de pesquisa, suporte técnico e logístico ao desenvolvimento da cadeia produtiva de TRs;
- Capacitar recursos humanos para o desenvolvimento da cadeia produtiva de TRs;
- Promover o desenvolvimento tecnológico e inovação associados ao desenvolvimento da cadeia produtiva de TRs.

Oportunidades em PD&I em terras raras

Considerando as diversidades mineralógicas dos vários minérios de TRs, em razão das complexidades dos depósitos, assim como as implicações ambientais

(ex. intemperismo e a presença de elementos radioativos), em decorrência das várias etapas envolvidas no desenvolvimento dos processos de concentração, lixiviação e de separação, a área de caracterização química, mineralógica e tecnológica de minérios deve ser considerada uma área-alvo para investimentos em pesquisa. Ela se faz necessária em todas as cadeias produtivas minerais, que abrange desde a exploração até a produção.

Assim, devem ser criadas oportunidades para que se estabeleçam cooperações duráveis entre empresas, ICTs e universidades para atuarem nessas áreas do conhecimento de forma integrada. Isso certamente levará a uma vantagem competitiva no tocante aos projetos de TRs realizados no Brasil, já que o uso compartilhado de equipamentos e de instalações de pesquisa maximiza o esforço de investigação e minimiza os custos associados a essa atividade. Assim, deve ser uma prioridade a realização de pesquisas em caracterização estrutural e de composição para minerais complexos até a escala nanométrica. Isto deve incluir desenvolvimentos teóricos e experimentais na análise espectral das linhas de baixa energia de raios-X dos elementos das TRs e a interação com técnicas de microdifração de raios-X.

Deve-se conceder incentivos de forma a construir uma *expertise* em análises de superfície de forma a apoiar as atividades de pesquisa em lixiviação de minérios. Deve-se dedicar maior atenção à formação de RH em análise de superfícies para fornecimento de informações técnicas que auxiliem numa melhor compreensão dos processos reacionais envolvidos para auxílio aos estudos de lixiviação de minérios de terras raras. As argilas de adsorção ou outras ocorrências minerais com baixo grau de mineralização carecem do desenvolvimento de técnicas inovadoras como, por exemplo, em análise de imagem e raios-X que propiciem melhorias na caracterização tecnológica para o entendimento da distribuição espacial dos elementos das TRs nessas ocorrências.

A flotação e outras técnicas de separação física assumem importância estratégica na concentração de minerais das terras-raras para diminuir a quantidade de fases minerais não desejáveis no material a ser tratado na etapa de hidrometalurgia, diminuindo, assim, os custos de capital e operacionais para a produção de óxidos de terras raras.

No tocante aos elementos terras-raras, as preocupações ambientais relativas aos efluentes e resíduos de processo devem continuar recebendo atenção e investimentos. Os processos de concentração mineral e os extrativos têm nessa área uma excelente oportunidade de melhoria.

Assim, como sugestões de abordagens inovadoras com o objetivo de melhorar as técnicas de concentração mineral, citam-se: as pesquisas em novos esquemas e técnicas de cominuição que permitam a otimizar a liberação dos minerais de TRs na moagem grossa a fim de reduzir a geração de partículas minerais ultrafinas, que são difíceis de recuperação; processos mais eficientes de flotação com o desenvolvimento e testes de novos reagentes para aumentar a recuperação mineral de TRs e o grau de concentração; aplicações modernas de triagem de minérios e rejeito de estéril mineral para redução do consumo de água, produtos químicos e energia durante as operações de concentração mineral; e melhorias de plantas piloto de flotação para testes de fluxogramas conceituais.

Para a hidrometalurgia, citam-se como oportunidades de melhoria e desafios tecnológico a otimização da lixiviação de minérios brasileiros como a xenotima, a monazita e as argilas de adsorção iônica de terras-raras, que agora têm sido identificadas como ocorrências com muita frequência no solo brasileiro. Na etapa de lixiviação, os desafios apontam para o uso de reagentes menos agressivos ao meio ambiente, mais seletivos em relação aos elementos terras-raras. Da mesma forma devem ser privilegiadas as pesquisas com foco na diminuição do consumo de energia e dos reagentes. A diminuição do consumo de reagentes trará como consequência direta a minimização da geração de efluentes e resíduos.

Busca-se, ainda, o uso de reagentes alternativos para lixiviação em baixas temperaturas. Nesse caso as ferramentas de modelagem molecular serão particularmente importantes, tanto na previsão das melhores condições de operação, como na previsão da geração dos resíduos e efluentes. As pesquisas sobre lixiviação *in situ* devem ser objeto de atenção especial, tendo em vista a diversidade das ocorrências das terras-raras e o seu baixo teor. Na operação unitária de extração com solventes ainda se faz necessário, no contexto brasileiro, ampliar os estudos de modelagem e simulação de circuitos, a experimentação de novos agentes químicos extratores como os novos organofosforados, as aminas e seus sais, o efeito sinérgico decorrente da mistura de extratantes e a precipitação direta durante o processo de reextração.

Outras temáticas também são muito importantes. Nota-se no Brasil a falta de materiais de referência certificados para elementos de terras-raras. O desenvolvimento de pesquisa na produção de materiais de referência certificados de terras-raras deve merecer atenção, uma vez que essa é uma lacuna considerável nas áreas do conhecimento brasileiro sobre esses elementos. Estes produtos são de suma importância,

pois os resultados de pesquisa têm implicações diretas sobre as decisões de investimento. Além disso, esses materiais podem contribuir nos ajustes laboratoriais para análises químicas quantitativas desses elementos, uma vez que essa tarefa não é trivial por suas naturezas química e mineralógica.

Um outro enfoque necessário é o estudo da toxidez e o comportamento dos elementos de terras-raras em ambientes naturais e o efeito em espécies aquáticas. Esse tipo de estudo, muito difundido para cátions divalentes, não é aplicado com a mesma frequência para os lantanídeos trivalentes. Como deve ser a toxidez para as espécies aquáticas? Como eles interagem com compostos orgânicos naturais? Esses estudos podem fornecer informações valiosas dos riscos potenciais e as questões ambientais em nosso território para a mineração e/ou produção das terras-raras.

A questão dos resíduos radioativos também deve ser salientada. Quase todos os depósitos de terras-raras no Brasil contêm tório e urânio. Isso significa que tanto empresas, institutos de pesquisa e universidades devem desenvolver planos de gestão e estudos tecnológicos para convívio, adequação e disposição desses materiais radioativos durante suas operações de pesquisa e produção de elementos de terras-raras. As normas regulatórias que gerenciarão a mineração das terras-raras necessitam tratar os materiais radioativos como resíduo gerado. Devem ser desenvolvidos programas para melhor compreensão e orientação dos regulamentos de manejo dos produtos radioativos que estão envolvidos no processamento de minérios de terras-raras.

LÍTIO NO BRASIL: HISTÓRICO, DESAFIOS E PERSPECTIVAS

O lítio é o mais leve dos metais, com alta reatividade e grande potencial eletroquímico. Tem baixo coeficiente de expansão térmica e alto poder calorífico e forma uma liga muito leve e resistente com o alumínio. Essas propriedades o tornam um elemento muito especial para uso em pilhas e baterias e na fabricação ou no recobrimento de vidros e cerâmicas, além do uso na indústria aeronáutica. Atualmente, apenas duas fontes são economicamente viáveis: as salmouras e os pegmatitos. O uso crescente de baterias recarregáveis (íon-lítio) dos equipamentos com portabilidade (*cellphones, tablets, notebooks*, ferramentas elétricas etc.), somado às projeções da demanda futura para os veículos elétricos e/ou híbridos tem despertado um interesse mundial pelo lítio bastante significativo (BRAGA; FRANÇA, 2013).

Existem duas rotas principais para obtenção do carbonato e do hidróxido de lítio (principais produtos comercializáveis), a partir de concentrados minerais. A primeira desenvolvida foi a rota alcalina, onde o concentrado mineral é calcinado com cal hidratada ou calcário e o clínquer formado é moído, lixiviado com água, filtrado e, em seguida, cristalizado sob forma de hidróxido de lítio monohidratado. A outra, mais eficiente e desenvolvida posteriormente, é a rota ácida. Nesta, o concentrado mineral é calcinado, sulfatado com ácido sulfúrico e depois lixiviado com água. Após a lixiviação, a solução de lítio é filtrada e precipitada como carbonato de lítio, por meio de reação com barrilha (carbonato de sódio).

A extração do lítio de pegmatitos foi abandonada na década de 1990, devido ao elevado custo de produção, mas tem-se viabilizado nos anos mais recentes em função de um aumento gradativo nos preços e da pureza do carbonato de lítio produzido. A atenção global de hoje pelo lítio é devida ao seu potencial como um ingrediente-chave para o desenvolvimento de uma nova geração de baterias para veículos elétricos. Segundo Lowry (2015), a demanda do mercado mundial em 2015 foi de 165.000 t LCE (*Lithium Carbonate Equivalent*); e a previsão de demanda para 2025 é de 400.000 t LCE. O Brasil, apesar de possuir reservas de pegmatitos litíferos e uma pequena produção de carbonato e hidróxido de lítio, tem participação pouco significativa neste mercado mundial, restringindo-se à fabricação de graxas automotivas.

Histórico da produção de lítio no Brasil

As ocorrências de lítio no país estão associadas às rochas pegmatíticas localizadas nos Estados de Minas Gerais, Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba. Os principais minerais pegmatíticos são a amblygonita, o espodumênio, a petalita e a lepidolita.

Alguns pegmatitos já eram conhecidos no Brasil desde 1924, mas, só em 1942, iniciou-se a pesquisa e a lavra de alguns minerais de lítio. A exploração comercial começou em 1966, pelo pesquisador Khalil Afgouni, que encontrou corpos lenticulares de pegmatitos (espodumênio) em Araçuaí, Minas Gerais (AFGOUNI; SILVA SÁ, 1977).

A indústria de lítio no Brasil teve início na década de 1940, quando foi criada a Orquima Indústria Química, com o objetivo de beneficiar areia monazítica, rica em urânio. No final da década de 1950, a Orquima foi adquirida pela CNEN-Comissão Nacional de Energia Nuclear, e passou a se chamar Nuclemon (Nuclebrás Monazita SA) e também conhecida como USAM - Usina Santo Amaro, sua principal unidade (NOGUEIRA et al., 2009). Na década de 1970, o Brasil já utilizava petalita,

lepidolita e espodumênio na fabricação de cerâmicas, esmaltes e vidros especiais.

A unidade produtora de sais de lítio da Nuclemon processava minério de amblygonita ($\text{LiAl}(\text{PO}_4)(\text{F},\text{OH})$) contendo de 3,5 a 4,2% Li, suprido por pequenas empresas (lavra por catação manual ou por meio de garimpagem) dos Estados de Minas Gerais e Ceará. A usina tinha capacidade para processar 120 t/mês de amblygonita e, geralmente, operava com 60% de sua capacidade. Os principais produtos eram o carbonato, hidróxido, cloreto e fluoreto de lítio, o sulfato de sódio (sal de Glauber), aluminato de sódio e o fosfato trissódico. Na década de 1980 sua produção era de 30 t/ano de LCE e as importações eram superiores a 500 t/ano. Em 1987, a Nuclemon paralisa a produção de sais de lítio devido a dificuldades operacionais para garantir o suprimento de minério de amblygonita (pequena e irregular), depreciação e problemas ambientais em sua usina de São Paulo.

Após fechamento da Nuclemon, foi criada, no final dos anos 1980, através de capital privado, a CBL – Cia. Brasileira de Lítio, com o objetivo de produzir compostos de lítio e derivados. Os principais fatores que motivaram a criação da CBL foram a disponibilidade de matéria-prima (espodumênio), a existência de um mercado nacional promissor, caracterizado pela dependência das importações, os incentivos dos Governos Federal e Estadual e as oportunidades de investimento no setor produtivo, uma vez que, o setor especulativo financeiro estava paralisado (Plano Cruzado). A CBL faz lavra subterrânea de minério de lítio em pegmatitos, nos municípios de Araçuaí e Itinga-MG. O concentrado de espodumênio produzido é transferido para a fábrica da CBL em Divisa Alegre, MG, onde é transformado em carbonato e hidróxido de lítio por meio da rota ácida de processamento.

Produção nacional e comércio exterior

No ano de 2014 foram produzidas 569 t de LCE, representadas por 198 t de carbonato de lítio e 421 t de hidróxido de lítio monohidratado, considerando-se a relação molar $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O} = 0,881$. A produção nacional em termos de LCE tem-se mantido constante entre 550 e 600 t/ano nos últimos 5 anos, representando cerca de 0,4% da produção mundial (150.000 t LCE). Ainda no ano de 2014 foram comercializadas 387 t de concentrado mineral com 5,3% de Li_2O , para fabricantes de cerâmicas em SP e MG (GARCIA, 2015, no prelo).

Devido à sua utilização na área nuclear, as atividades de industrialização, importação e exportação de minérios e minerais de lítio, produtos químicos orgânicos e inorgânicos, lítio metálico e ligas de lítio

são supervisionadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), conforme determina o Decreto nº 2.413, de 04/12/97, publicado no Diário Oficial da União (DOU), em 05/12/97 e prorrogado pelo Decreto 5.473 de 21/06/2005 até 31/12/2020. Face ao exposto, a exportação de lítio e derivados é desprezível.

Desafios tecnológicos e oportunidades em PD&I **Purificação do Carbonato e do Hidróxido de Lítio**

O carbonato de lítio e o hidróxido de lítio produzidos no Brasil não têm a pureza requerida pela indústria de baterias de Li-íon, pois são produtos de grau industrial. A indústria de baterias de Li-íon requer produtos com pureza elevada de forma a minimizar reações eletroquímicas secundárias indesejáveis. Para que os produtos nacionais sejam usados na fabricação de baterias é necessário o desenvolvimento de um processo de refino adicional.

Obtenção Direta do LiOH pela Rota Alcalina

No Brasil, o principal produto de lítio demandado pela indústria é o hidróxido de lítio utilizado na fabricação de graxas e lubrificantes. Uma mudança na rota de processamento poderá promover a redução dos custos de produção, por eliminação do uso de barrilha e ácido sulfúrico. O processo alcalino utiliza cal ou calcário como principal insumo, disponíveis abundantemente no mercado nacional e de menor custo do que a barrilha e o ácido sulfúrico.

Obtenção de Lítio a partir da água do mar e/ou de águas-mães de salinas

Considerando que as concentrações de lítio e sódio na água do mar são 0,15 e 10.800 ppm, respectivamente, um processo de concentração seletiva por troca iônica foi desenvolvido recentemente por pesquisadores da Saga University e University of Kitakyushu, no Japão. Os resultados demonstram que é possível extrair cerca de 30 g de LiCl a partir de 140 m³ de água do mar (LiCl/Li = 6), em testes de escala de laboratório (YOSHIZUKA et al., 2007). No processo de produção de sal marinho, após a cristalização do cloreto de sódio, uma quantidade significativa de salmoura (águas-mães) é devolvida ao mar, com elevadas concentrações de íons K, Mg, B, I e Li (MELO et al., 2008). A realização de um estudo para caracterização e recuperação do lítio contido nessas águas-mães poderá indicar uma possibilidade para aproveitamento econômico.

Aproveitamento Integral dos Pegmatitos Litiníferos

Novos empreendimentos para produção de lítio a partir de minérios são descritos no trabalho de Clarke (2013),

que cita projetos no Canadá (Canada Lithium e Nemaska), Estados Unidos (Western Lithium) e Austrália (Reed Resources, Altura Mining e Galaxy Resources), totalizando uma produção adicional de 72.000 t LCE. Para que a produção de lítio a partir de minérios seja economicamente viável, seria necessário o aproveitamento integral do pegmatito em que o mineral de lítio está contido. Isto é, recuperação adicional dos demais minerais industriais contidos na rocha, como quartzo, feldspato, micas e minerais metálicos, como tantalita e cassiterita, se existirem.

REFERÊNCIAS

- AFGOUNI, K.; SILVA SÁ, J.H. Minério de Lítio no Brasil. *Mineração e Metalurgia*, Rio de Janeiro, n. 392, 1977. ISSN 0100-6908.
- BRAGA, P.F.A.; FRANÇA, S.C.A. *Lítio: um mineral estratégico*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. 41 p. Série Estudos e Documentos, 81. ISSN 0103-6319.
- CGEE-Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. *Usos e aplicações de terras raras no Brasil: horizonte 2012-2030*. 2013. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/documents/10182/734063/Terras_Raras_Web_9532.pdf>. Acesso em 12 de maio de 2015.
- CLARKE, G. Projects in the pipeline: advancing lithium projects and expansion room for two or twelve new players by 2020? *Industrial Minerals*, December, 2012. Disponível em: <<http://www.indmin.com/Article/3133565/Lithium-PricingNews/Projects-in-the-Pipeline-Advancing-lithium-projects-and-expansions-Room-for-two-or-twelve-new-players.html>>. Acesso em 12 de maio de 2015.
- GARCIA, I.J. Lítio. In: *Sumário Mineral*. Departamento Nacional da Produção Mineral/ MME: Brasília: DNPM/MME, 2015. Disponível em: <www.dnpm.gov.br> (no prelo).
- LOWRY, J. *Global lithium projection of supply and demand growth for the next ten years*. 2015. Disponível em: <<http://kirillklip.blogspot.com.br/2015/07/joe-lowry-global-lithium-projection-of.html>>. Acesso em 03 de junho de 2016.
- NOGUEIRA, E.B.; BARBOSA, S.; FILIPONE, S.M.N. Desafios para gestão socioambiental: o caso Nuclemon um passado no presente. In: *Congresso Nacional de Excelência em Gestão*, 5, 2009.
- RARE EARTH ELEMENTS. *Research*. Canadian Research Network. Disponível em: <<http://www.cim.org/en/RareEarth/Home/Research.aspx>>. Acesso em 12 de maio de 2015.
- YOSHIZUKA, K. et al. Performance evaluation of benchmark plant for selective lithium recovery from seawater. *Journal of Ion Exchange*, v. 18, n. 4, p. 450-453. 2007.

Água e energia na mineração

Fernando A. Freitas Lins

Centro de Tecnologia Mineral – CETEM

RESUMO

Há uma tendência de crescente dificuldade na produção mineral, com a lavra em maior profundidade, minérios com mais baixos teores (especialmente os metálicos) e mais impurezas, mineralogia mais complexa e mineração em locais remotos. Essas dificuldades, em geral, correspondem a maiores demandas de água e energia para uma mesma produção final. Daí a necessidade de avanços tecnológicos para melhorar a competitividade das empresas com sustentabilidade.

Palavras-chave Água na Mineração. Energia na Mineração. Sustentabilidade na Mineração.

INTRODUÇÃO

A água e a energia são dois temas transversais que crescerão em importância no curto, médio e longo prazos na agenda de prioridades das empresas de mineração, no Brasil e no mundo. São transversais porque impactam quase todos os processos das atividades de mineração, e utilizar esses recursos de forma mais sustentável passa primeiramente por conhecer o quanto e como são utilizados.

É bem estabelecida a tendência de uma crescente dificuldade na produção mineral: lavra em maior profundidade, minérios com mais baixos teores (especialmente os metálicos) e mais impurezas, mineralogia mais complexa e mineração em locais remotos. Essas dificuldades, em geral, correspondem a maiores demandas de água e energia para uma mesma produção final. Daí a necessidade de avanços tecnológicos para melhorar a competitividade das empresas.

A estiagem recente, o nível baixo dos reservatórios das hidrelétricas, a utilização mais frequente das termelétricas e a elevação do custo da energia apontam para um provável e necessário esforço no sentido de racionalizar seu uso, mesmo não sendo a mineração intensiva em água, como ocorre com a agricultura, e eletrointensiva, como é a metalurgia. Um ponto de partida para usar esses recursos de forma mais sustentável é saber o quanto e como é utilizado.

ÁGUA NA MINERAÇÃO

O Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos da ANA (2010) traz informações sobre captação e consumo de água na irrigação, na indústria de transformação e em

outras atividades, mas não sobre a mineração. Por outro lado, os relatórios anuais de lavra (RAL), que as empresas preenchem e enviam ao DNPM, contêm informações quantitativas, desde 2000, sobre a utilização de água. Esse acervo é uma rica fonte de dados que ainda está por ser explorada. Alguns países estão mais adiantados nesse conhecimento.

Os EUA, Austrália e Canadá, por exemplo, executam levantamentos a cada cinco anos. Os EUA iniciaram essa atividade em 1950 e a mineração passou a ser contabilizada separadamente a partir de 1985. O relatório (ANA, 2010) informa que 7,4 bilhões de metros cúbicos de água, 1,4% do total do país, foram captados para a mineração, aí incluída a extração de petróleo e gás. A mineração australiana (incluindo também P&G) consumiu em 2010 cerca 0,5 bilhão de metros cúbicos, equivalendo a 3,6% do consumo de água da Austrália. No Canadá, em 2009, a mineração (*stricto sensu*) captou 0,5 bilhão de metros cúbicos, cerca de 1,3% de todo o país. Assim, tem sido possível acompanhar os efeitos de políticas públicas, da adoção de novas tecnologias e de iniciativas das empresas ao longo de décadas.

Mas isso não significa que as mineradoras no país, ao menos uma parte delas, estejam indiferentes à questão. As informações divulgadas na mídia especializada e em eventos técnicos mostram evolução significativa, a exemplo da recirculação de água, havendo registros de elevação deste índice de 40%, vinte anos atrás, para mais de 80% na atualidade. Isso mostra um esforço na direção de uma melhor gestão dos recursos hídricos. O IBRAM também tem coordenado iniciativas nesse sentido, com troca de informações entre seus associados sobre indicadores e coeficientes técnicos de utilização da água (m^3/t de produto mineral).

No entanto, os efeitos das iniciativas para melhorar a gestão da água na mineração brasileira como um todo apenas serão percebidos com a realização de levantamentos periódicos. Se houver informações consolidadas a respeito do uso de água na mineração, a fração de água que é captada dos mananciais e aquela de origem subterrânea, o percentual de recirculação segundo o porte das empresas (pequena, média e grande) e conforme os grupos de minerais (ferrosos, não-ferrosos e não-metálicos), qualidade da água descartada, entre outras.

É necessário também identificar tópicos de P&D para a formatação de uma agenda de inovação tecnológica visando o melhor aproveitamento da água nas várias etapas da mineração (lavra, processamento mineral, transporte de minérios e tratamento e descarte de efluentes). O tema barragem, que pode envolver tecnologias de desaguamento, ganhou relevo recentemente com o acidente na Samarco, em Mariana.

Uma alternativa ao uso de barragens de rejeitos, para disposição de polpas minerais, é a produção de pasta mineral a qual pode ser manuseada como um rejeito sólido, contendo baixa umidade (~20%). A água pode então ser tratada e devolvida ao ambiente ou reutilizada no processo. A preferência por barragens se dá em função do baixo custo, porém com o recrudescimento das exigências legais para licenciamento e manutenção (especialmente após o acidente ambiental em Mariana, MG) de grandes barragens de rejeito, e o desenvolvimento tecnológico, a alternativa por pastas já está se tornando viável e tem sido empregada em alguns empreendimentos, inclusive com adaptação de barragens de polpa existentes para áreas de disposição de pasta.

As pesquisas devem incluir todos os aspectos teóricos de produção de pastas objetivando-se avanços tecnológicos que permitam reduzir os custos operacionais de produção, bem como reduzir os custos de capital envolvidos na aquisição de equipamentos de plantas de produção de pastas minerais. A filtragem aplicada a rejeitos também deve ser objeto de mais atenção, pois possibilita descartar o material com apenas 10% de umidade.

A crise de abastecimento que se configura é uma oportunidade para aprofundar o conhecimento sobre a água na mineração brasileira e aperfeiçoar as práticas de gestão nas empresas. E para a delicada comunicação com o público, o melhor instrumento ainda é a informação direta e clara sobre os resultados já obtidos, especialmente no relacionamento com as comunidades no entorno das minas e na região a jusante da rede hidrográfica.

ENERGIA ELÉTRICA

A produção de aço, ferro-ligas e alumínio, por exemplo, demanda, respectivamente, 500, 7.000 e 15.000 kWh/t. A fabricação de produtos não-metálicos, como o cimento e a cerâmica de revestimento, usa aproximadamente 100 kWh/t. A mineração, dependendo do tipo de minério e do grau de complexidade do beneficiamento empregado, apresenta consumo entre 3 e 30 kWh/t apenas. A produção de brita, bauxita e minério de ferro necessita, em média, de 3, 13 e 20 kWh/t, respectivamente. Os consumos específicos são relativamente baixos, mas as quantidades processadas na mineração são significativas, da ordem de dois bilhões de toneladas anuais de produção bruta (*run-of-mine*) no Brasil e entre 40 e 50 bilhões de toneladas ao ano em escala global.

A mineração brasileira consome 2,3% da energia elétrica do país, correspondendo a 15 milhões de MWh em 2013 (SGM/MME, 2014). Esse consumo inclui a pelotização de finos de minério de ferro (40 kWh/t). Portanto, vale o esforço para otimizar as operações para reduzir o consumo, ainda tendo em conta o atual período de baixa dos preços das *commodities*, com menores margens de lucro.

Nesse sentido, vale lembrar o lançamento da norma ISO 50001, em 2011, referente à gestão de energia. Há um grande potencial para sua disseminação, a exemplo das normas ISO 9001 e 14001. Os benefícios práticos que um sistema de gestão de energia pode trazer para uma empresa incluem a diminuição de custos pelo uso de menos energia elétrica e a redução (indireta) da emissão de gases de efeito estufa. Mas deve-se contabilizar também o ganho da percepção pública positiva pela adoção de práticas que podem ser mensuradas e auditadas. Até 2014, nove empresas brasileiras tinham obtido a certificação ISO 50001, entre elas uma siderúrgica, porém nenhuma de mineração. Em nível mundial também não é ainda comum. No Canadá, por exemplo, apenas uma empresa de mineração, produtora de ouro, obteve essa certificação até 2014.

A etapa de cominuição (britagem/peneiramento e moagem/classificação) responde por metade do consumo elétrico de uma usina de tratamento de minérios. E esse consumo vai crescer devido ao aumento da produção de minérios, seja para consumo interno, seja para exportação. Certamente essa etapa deve ser um alvo prioritário nos esforços de inovação e otimização.

Outras inovações poderão trazer redução de custos em energia. Enfim, são desafios que as empresas de mineração, fornecedores, consultores e instituições de ciência e tecnologia atuantes no setor mineral deverão enfrentar juntos.

REFERÊNCIAS

- ANA - Agência Nacional de Águas. *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil - Informe 2010*. 2010. Disponível em: <http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2010_inf.pdf>. Acesso em 12 de maio de 2015.
- MME - Ministério de Minas e Energia. *Sinopse da Mineração e Transformação Mineral - 2014, base 2013*. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM). 2014. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732837/SINOPSE-2013-2014_26.02.2015.pdf/849d14cb-2eec-4206-a89f-45325aa853e3>. Acesso em 12 de maio de 2015.

Tecnologias para a sustentabilidade ambiental

Fernando A. Freitas Lins

Andrea C. Rizzo

Claudia Duarte Cunha

Francisco Mariano Lima

Centro de Tecnologia Mineral – CETEM

RESUMO

São apresentados o estado da arte da tecnologia e as perspectivas de utilização da biotecnologia aplicada ao tratamento de ambientes contaminados, ou a biorremediação. Da mesma forma, sobre a recuperação de resíduos de construção e demolição (RCD) e a recuperação de metais de resíduos urbanos, ou seja, a “mineração urbana”.

Palavras-chave Biorremediação. Resíduos de Construção. Demolição. Resíduos Elétricos e Eletrônicos.

INTRODUÇÃO

O aproveitamento dos recursos minerais deve estar comprometido com os princípios de desenvolvimento sustentável (satisfazer as necessidades do presente sem prejuízo das futuras gerações), implicando, entre outros fatores, no aproveitamento racional dos recursos naturais, preservando-se o meio ambiente. Não bastasse isso, a população mundial deve se elevar dos atuais 7,5 para 9,5 bilhões de pessoas em 2050. A maior parcela desse aumento virá de países ainda apresentando um grande déficit de consumo de materiais, a julgar pelos padrões de consumo dos países desenvolvidos. Portanto, a pressão por mais mineração, ou seja, mais materiais, deverá continuar.

Todos os segmentos industriais, a mineração e a metalurgia incluídos, e de serviços estão diante do desafio da produção mais limpa, com a utilização contínua de uma estratégia preventiva integrada relativa a processos, produtos e serviços, visando aumentar a eficiência, minimizar o uso de água e de energia, e reduzir os riscos para a saúde humana e para o meio ambiente. Uma singularidade da mineração merece destaque, uma vez que, para se ter processos eficientes e mais limpos, é indispensável fazer P&D para cada minério. Em outros ramos da indústria, especialmente na indústria de transformação, é possível replicar um mesmo tipo de solução tecnológica para grande número de empresas, como em uma fábrica de automóveis ou de refrigerantes. Porém, no caso do processamento de substâncias minerais, as soluções são individuais para cada caso, em virtude da extrema variabilidade da natureza.

O beneficiamento de minérios não chega a ser uma fonte significativa de contaminação ambiental, em comparação com a agricultura (pelos fertilizantes químicos e, principalmente, defensivos agrícolas utilizados) e com outras atividades industriais, como a própria transformação dos minerais em metais e em produtos não-metálicos, mais intensivos em energia e na emissão de gases de efeito estufa. Porém, é inegável que o descarte de grandes volumes de rejeitos das usinas de beneficiamento pode eventualmente resultar num apreciável fator de poluição. Medidas preventivas ou corretivas são geralmente necessárias, especialmente, com rejeitos de minérios metálicos e da mineração do carvão. (Evidentemente que os cuidados com a segurança em barragens de rejeito devem ter prioridade, para se evitar os acontecimentos recentemente ocorridos em Minas Gerais, no município de Mariana.)

Há um interesse cada vez maior no aproveitamento de rejeitos de atividades minerais, como uma alternativa a outros materiais, a exemplo de areia artificial a partir de finos de brita, o emprego de rochas potássicas para uso como fertilizante, rejeitos de beneficiamento de minério de ferro para utilização em estradas em substituição à brita, entre vários outros casos. O mesmo raciocínio se aplica à crescente e inevitável tendência mundial de reciclagem de materiais e aproveitamento de resíduos industriais e urbanos. As tecnologias utilizadas para tal reaproveitamento são as tecnologias correntes de beneficiamento de minérios e de metalurgia extrativa, ou variantes dessas.

A biotecnologia aplicada ao tratamento de ambientes contaminados, ou a biorremediação, e a re-

cuperação de resíduos de construção e demolição (RCD) e de metais de resíduos urbanos, ou seja, a “mineração urbana” abrange o conjunto de tópicos a serem abordados nesta seção.

BIOTECNOLOGIA AMBIENTAL – FOCO NA BIORREMEDIAÇÃO

Os solos, águas superficiais e águas subterrâneas são alvos constantes de contaminação antrópica por uma infinidade de compostos que variam em composição e concentração, sendo os principais aqueles diretamente associados às atividades extrativas minerais e de petróleo. Os combustíveis líquidos, os hidrocarbonetos poliaromáticos e os metais pesados, como mercúrio, chumbo, cromo e cádmio, estão entre os mais comumente encontrados em todo o mundo, sendo, em sua maioria, provenientes de vazamentos acidentais e outras atividades industriais (CETESB, 2012; INEA, 2009).

Estas matrizes ambientais têm sido objeto de grande preocupação nas três últimas décadas em países industrializados, principalmente nos Estados Unidos e na Europa. No Brasil, esse problema ambiental torna-se mais grave em centros urbanos industriais como a Região Metropolitana de São Paulo e a do Rio de Janeiro. Dados da CETESB (2012) indicam que os postos de gasolina destacam-se com 76% dos registros de áreas contaminadas no Estado de São Paulo, seguidos de 15% provenientes das atividades industriais. Já no Rio de Janeiro, os postos de combustíveis representam 53% dos registros e as atividades industriais 41% (INEA, 2009). O encaminhamento de soluções para essas áreas contaminadas deve contemplar um conjunto de medidas que assegurem o conhecimento tanto de suas características e dos impactos por elas causados como das formas e níveis de intervenção mais adequados, sempre com o objetivo de minimizar os riscos à população e ao ambiente.

Neste cenário, destaca-se o desenvolvimento e aplicação de tecnologias para a remediação *in situ* e *ex situ* de solos multicontaminados por hidrocarbonetos e metais, baseadas no uso de processos biológicos (biorremediação), de forma a gerar novas alternativas tecnológicas para o abatimento de passivos ambientais, bem como no biotratamento de efluentes industriais. Os micro-organismos são bem conhecidos por representar papel importante em aplicações ambientais de descontaminação de solos e água.

Dentre as principais tecnologias empregadas na biorremediação de solos contaminados podem ser

citadas: *bioventing*, *biosparging*, fitorremediação, *landfarming*, biopilhas e os biorreatores. A elas podem se associar técnicas específicas visando o aumento da atividade microbiana como, por exemplo, o bioestímulo, o bioaumento, a adição de biossurfactantes e a incorporação de materiais estruturantes. Nas áreas até então registradas pela CETESB no Estado de São Paulo (2012), foram constatadas a aplicação de diversas dessas técnicas incluindo o *bioventing*, *biosparging*, biorremediação e atenuação natural monitorada, que vem a ser o monitoramento de áreas impactadas, sem que haja intervenção humana, somente para verificar a remediação promovida pela ação das comunidades microbianas presentes no sítio contaminado.

As principais vantagens da biorremediação, em relação aos demais tratamentos convencionais, incluem a alta eficiência, a minimização do uso de produtos químicos, dentre outras, além de serem consideradas ambientalmente apropriadas.

No mundo, o mercado por produtos e serviços relacionados à remediação de sítios contaminados deve alcançar US\$ 40 bilhões em 2015, com os Estados Unidos na liderança. Já os países desenvolvidos da Ásia apresentam um mercado crescente e em expansão para remediação de sítios contaminados, sendo que o mercado da China se apresenta como o de crescimento mais rápido e promissor de acordo com os dados divulgados pela McIlvaine Company em 2012.

Dentre os processos biológicos que vêm sendo estudados para o tratamento de efluentes industriais contendo metais, em especial para as Drenagens Ácidas de Mina (DAM), merece destaque a bioissorção e a aplicação de micro-organismos anaeróbicos utilizando biorreatores do tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor*). A bioissorção é um processo no qual existe a ligação passiva de espécies iônicas dos metais dissolvidos com uma biomassa morta (residual, em sua maioria), havendo a retenção dessas espécies iônicas nesse material bioissorvente. Muitos processos de bioissorção estão em desenvolvimento ou foram desenvolvidos e patenteados para aplicações comerciais, tais como: separação de urânio, remoção de contaminantes diversos, bioissorvente para ouro, processos de remoção de metais de efluentes industriais ou de minas, entre outros.

Instalações piloto e algumas unidades em escala comercial foram construídas nos EUA e no Canadá, tendo sido confirmada a aplicabilidade desta tecnologia, encontrando-se, porém, algumas limitações, como a dificuldade na obtenção de um suprimento significativo de biomassa de baixo custo e a possibilidade de regeneração e reutilização da mesma. Alguns

biossorventes têm sido comercializados como adsorventes para metais a partir de efluentes, a exemplo de AlgaSORB™, B.V. SorbexBiosorbent, AMT-Bioclaim™, Bio-Fix e RAHCO Bio-Beads (PARK et al., 2010).

Já o uso de biorreatores anaeróbicos apresenta-se como uma alternativa tecnológica promissora para o tratamento de efluentes industriais, podendo se tornar uma opção eficaz e economicamente viável na remoção de sulfato e precipitação de metais. Ambas as tecnologias já apresentam aplicação industrial mundial com êxito, principalmente na Europa e nos EUA (GAUR et al., 2013).

Os obstáculos a serem superados

Tendo como base o documento “Panorama da Biotecnologia no Mundo e no Brasil (ABDI - CGEE - 2008)” e a atuação do CETEM na área de biotecnologia (industrial e ambiental) nos últimos 20 anos, destaca-se como principal ponto crítico e gargalo em Biotecnologia no Brasil a dificuldade no *scale up* e comercialização das tecnologias envolvendo os bioprocessos. Em particular, a biorremediação é usualmente sítio específica, necessitando da aplicação de uma planta piloto no local, seguida da operação comercial, se for comprovada a viabilidade técnica e econômica.

Agenda tecnológica

A descoberta das interações dos micro-organismos com os contaminantes sustenta a importância dos mesmos em tornar a terra um ambiente adequado para todas as formas de vida. O estudo da interação do micro-organismo com o ambiente que o circunda é uma etapa crucial para o desenvolvimento de estratégias promissoras em todos os setores da biotecnologia, especialmente da biotecnologia ambiental. O uso da genômica, metagenômica, proteômica e metaproteômica, junto com a metabolômica, para estudar as respostas regulatórias que a comunidade microbiana utiliza para se adaptar a mudanças ambientais está em ampla expansão. Estas poderosas ferramentas, consideradas como tecnologias emergentes, permitirão analisar a comunidade microbiana como um sistema, determinando a extensão que cada grupo contribui para o processo, e como eles se adaptam para a manutenção do equilíbrio do mesmo.

Pelo uso destas novas tecnologias é possível descobrir novos micro-organismos não cultiváveis e explorar suas novas capacidades, que irão surgir a partir da interação dos genes, proteínas e outras macromoléculas com o ambiente. Nesse aspecto, um diferencial competitivo do Brasil é sua notável biodiversidade, apresentando um universo de oportunidades para a

inovação biotecnológica. Além disso, a distribuição regional diferenciada desta biodiversidade cria oportunidades para um desenvolvimento econômico que valoriza as especificidades locais, capaz de estruturar arranjos produtivos sustentáveis baseados em aplicações biotecnológicas.

A realização de investimentos necessários aos desafios tecnológicos anteriormente citados pode resultar:

- i) Na realização de projetos de pesquisa científica e tecnológica que visem ao desenvolvimento de produtos e processos biotecnológicos para minimizar ou solucionar problemas ambientais causados pela atividade humana, tais como resíduos industriais, domésticos, agropecuários, provenientes de mineradoras, da produção de petróleo e derivados, da produção de combustíveis, tratamento de esgoto e águas superficiais, subterrâneas e residuais, da indústria pesqueira, poluentes, entre outros;
- ii) Promoção da formação de recursos humanos na área;
- iii) Indução da transferência de tecnologia e licenciamento de produtos relacionados à solução de problemas ambientais na área de biotecnologia.

MINERAÇÃO URBANA: RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

O conceito de mineração urbana no Brasil vinculado à indústria da construção civil diz respeito à coleta e ao tratamento dos RCD como matéria-prima, para o mercado de agregados reciclados que consta do marco regulatório da resolução CONAMA 307 de 2002. Esta resolução, dentro dos princípios do Comando e Controle da Política de Gestão Ambiental, possibilitou aos municípios, na época responsáveis por estes resíduos, a coleta, a disposição e o uso incipiente destes, como base para pavimentação e para a formação de aterros. As preocupações naquele momento eram dirigidas para o Saneamento Ambiental. Os produtos típicos da reciclagem eram o rachão e a bica corrida.

Os dados da PNSB de 2008 indicam um número expressivo de municípios com serviços de manejo de resíduos de construção e demolição; cerca de 4.000 em um universo de 5.564 município brasileiros. O conjunto das empresas e mesmo autarquias que realizavam processamento do RCD eram ligados aos serviços públicos municipais.

Entretanto, foram nascendo, a partir da metade da década passada, um conjunto de empresas privadas

ligadas à cadeia da construção civil com produtos semelhantes aos agregados naturais. A viabilidade destas empresas atribui-se a dois importantes aumentos de custos na indústria, observados na disposição dos RCD e nos agregados naturais.

A nova Política Nacional de Resíduos Sólidos, substanciada na lei 2010, possibilitou o emprego de instrumentos econômicos para um mercado de agregados reciclados ainda nascente, na qual a maior parte dos resíduos de construção e demolição ainda não é reciclada. Institui-se o princípio do poluidor-pagador na gestão ambiental, ficando a cadeia da construção civil responsável pelos resíduos gerados. Formou-se uma indústria recicladora emergente, contando no momento com cerca de 310 empresas identificadas, segundo a ABRECON, a principal entidade representativa do setor.

As pesquisas quantitativas dos RCD gerados nas cidades encontram um valor médio de 0,5 t/hab/ano, totalizando 100 milhões de toneladas/ano (84 milhões de m³). Esta média é menor que a alcançada nos países que tem uma indústria recicladora madura, que apresentam um índice entre 0,8 e 1,2 t/hab/ano.

As pesquisas qualitativas mostram que as cidades brasileiras são muito heterogêneas no tocante à qualidade dos RCD, originários dos distintos processos de urbanização. No que diz respeito aos concretos e materiais equivalentes, as proporções são de 4% para Maceió, 17% para Macaé e 49% para São Paulo. Nas cidades alemãs e japonesas as proporções dos concretos são da ordem de 60% a 70%, com grande homogeneidade entre si.

A ABRECON monitora as atividades de 105 empresas e na última pesquisa divulgada aponta, para 2015, uma projeção de 21% dos RCD totais sendo reciclados. São Paulo abrange 54% destas empresas, enquanto outros Estados (RJ, RS e PR) têm 7% cada. O restante é pulverizado pelos outros Estados.

O principal desafio técnico é a variabilidade dos RCD, inclusive dentro de uma mesma fase. A engenharia civil e a mineral procuram reduzir esta variabilidade, cada uma com seu *modus operandi*. As pesquisas realizadas nas universidades do Sudeste avançaram e apresentam um acervo de resultados constantemente acessado pela indústria.

Nos dias de hoje uma área com grande número de pesquisas é da gestão dos RCD. Isso ocorre porque a indústria recicladora precisa difundir seus produtos. Não há ainda mão-de-obra qualificada porque o uso do agregado reciclado exige qualificação específica na construção civil. Do mesmo modo, inexistente um manual técnico brasileiro para os nossos RCD.

Ao longo das últimas três décadas, a autoria das pesquisas se deslocou da Europa e EUA para China, Malásia e Hong Kong, evidenciando a expansão da indústria da construção civil naqueles países. Nos países onde a indústria recicladora é madura, houve uma redução das pesquisas, estando voltadas para resíduos de classes C e D; no Brasil e em países de indústria recicladora emergente, ela se concentra ainda nos resíduos A e B.

MINERAÇÃO URBANA: RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS (REEE)

A rigidez locacional dos recursos minerais, forjada pela história geológica e pela distribuição geoquímica dos elementos, de certa maneira está mudando. Faz-se referência à acumulação de materiais valiosos como “minas urbanas”, e ao processo de extração desses materiais a partir de resíduos como “mineração urbana”. Ao contrário das jazidas minerais que se exaurem, as “reservas urbanas” crescem com o consumo e, como esperado, são mais ricas em conteúdo nos países e regiões com alta renda *per capita*. Aqui se está falando da riqueza do “sobressolo”.

A maior parte dos estoques de equipamentos em uso (seja em infraestruturas, fábricas, residências, escritórios ou de utilização pessoal) acumula-se principalmente nas cidades, onde se concentra a grande maioria da população. São vários os tipos de materiais que se acumulam e, cada um a seu tempo, se transformam em resíduos. Como exemplos, encontram-se as sucatas ferrosas e não-ferrosas, os resíduos de construção e demolição (RCD), abordado no item anterior, e os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE), em inglês denominados *e-waste* ou *e-scrap*.

Este item trata da reciclagem de metais de produtos cujo consumo vem crescendo exponencialmente devido ao estilo de vida contemporâneo, onde é significativa a presença de produtos *hi-tech*: os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Os REEE são classificados em várias categorias, incluindo a linha branca (geladeira, fogão, etc.), computadores, televisores, tablets, celulares, entre outros.

Um estudo da Universidade das Nações Unidas estimou que os REEE gerados em 2014 no mundo alcançaram 42 milhões de toneladas (Mt), com um valor contido de 48 bilhões de euros. Apenas 16% teriam sido reciclados oficialmente, seguindo padrões de governança, tecnologia, cuidados ambientais e comercialização.

Os REEE apresentam alta concentração de metais valiosos. O teor médio do ouro alcança 7 g/t. Um segmento dos REEE, placas de circuito impresso, pode chegar a 500 g Au/t. Note-se que o teor de um minério de ouro, típico de uma mina a céu aberto, varia entre 1 e 3 g/t. No caso do cobre, o teor médio nos REEE é de 4,5%, enquanto em um minério fica, geralmente, abaixo de 1%.

Os metais ouro e cobre, os materiais mais valiosos contidos nos REEE, correspondem a 300 t e 1,9 Mt, respectivamente, com base no volume de REEE de 2014. Isso equivale a cerca de 10% da produção primária de cada metal a partir de jazidas minerais. Juntos, os dois metais respondem por 44% dos €48 bilhões. Há diversos outros materiais valiosos, como prata, elementos de terras raras, plásticos etc.

O Brasil gerou 1,4 Mt de REEE em 2014 (7,0 kg/hab). A título de comparação, os EUA descartaram 7,1 Mt (22 kg/hab) e a China, 6,0 Mt (4,4 kg/hab). No Brasil cerca de 10 toneladas de ouro e 64 mil toneladas de cobre foram descartadas em 2014. Isso corresponde, respectivamente, a 15% da produção primária de ouro (igual à produção oficial dos garimpos) e a 25% do cobre refinado produzido no país, o que não é desprezível. Uma parte provavelmente está sendo recuperada (aparentemente os mesmos 16% da recuperação mundial).

Há uma variedade de tecnologias, em plena operação ou em fase de desenvolvimento, que permitem a recuperação de metais básicos (Cu, Zn, Pb ...) e metais preciosos (Au, Ag ...) dos REEE. Dentre as tecnologias mais usadas em escala industrial citam-se os processos pirometalúrgicos, assim como os processos oxidativos químicos e eletroquímicos.

Os processos pirometalúrgicos são praticados, via de regra, em unidades *smelters* e representam a tecnologia predominante na atualidade, em razão de apresentarem um fator de escala mais favorável para a economicidade do processo, principalmente em se tratando da recuperação de metais básicos. A maioria das unidades que utilizam essa tecnologia se concentra na Europa, a exemplo da Bélgica, na China e Japão.

Os processos biotecnológicos, entretanto, vêm sendo objeto de constante investigação e desenvolvimento, buscando se firmar como uma opção mais limpa, em comparação às tecnologias clássicas. Isso pode ser explicado pelo fato de apresentarem um custo de implantação e de operação mais baixo que os tradicionais, mas também por serem menos agressivos ao meio ambiente e, portanto, mais sustentáveis.

O CETEM tem dedicado atenção a esse tema. Espera-se, assim, no médio prazo viabilizar técni-

ca, econômica e ambientalmente o emprego desses processos biotecnológicos. A linha de pesquisa ora em curso tem foco na otimização dos processos de fragmentação e classificação por tamanhos das placas de circuito impresso, para então, após as etapas de cultura e adaptação dos micro-organismos, que foram pré-selecionados em etapa anterior de pesquisa realizada *in vitro*, utilizar a tecnologia de lixiviação em colunas estáticas, recheadas com os fragmentos das placas, para solubilizar e posteriormente recuperar das soluções os elementos de interesse.

Em síntese, as tecnologias de reciclagem dos REEE são adaptações da tecnologia mineral. Cada grupo ou subgrupo de REEE, assim como cada minério, faz uso de uma rota tecnológica distinta e apresenta questões ambientais particulares. A reciclagem desses materiais, levando-se em conta as quantidades envolvidas, precisa ganhar relevância nas políticas e programas de estímulo à inovação, visando o melhor aproveitamento das riquezas acumuladas no nosso “sobressolo”.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. *Biotecnologia*: iniciativa nacional de inovação, panorama de biotecnologia. Brasília: ABDI/CGEE, 137 p. 2008.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Áreas contaminadas*. São Paulo: CETESB. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas>>. Acesso em 04 de maio de 2015.
- GAUR, N. et al. A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals. *Environmental Science: Processes & Impacts*, Cambridge, v.16, p.180-193, 2014. DOI:10.1039/C3EM00491K
- INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Portal do licenciamento. São Paulo: INEA. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/Licenciamento/GestaodeRiscoAmbientaTec/AvaliacaodeAreasContaminadas>>. Acesso em 24 de abril de 2015.
- PARK, D; YUN, Y.-S.; PARK, J. M. The past, present, and future. Trends of Biosorption. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, New York, v.15, n.1, p.86-102, 2010. ISSN 1226-8372.
- THE MCILVAINE COMPANY. *News release*. Illinois. Disponível em: <<https://home.mcilvanecompany.com/index.php/component/article/7-news/376-nr1697>>. Acesso em 04 de maio de 2015.





IV

Matriz Energética e Recursos Minerais

Matriz energética brasileira e recursos minerais

José Goldemberg

Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo

RESUMO

A composição da matriz energética brasileira se distingue da matriz da maioria dos outros países pelo alto percentual de energias renováveis (42,4% em 2013) e se manteve relativamente estável desde 1990 até recentemente. Na matriz elétrica a participação de fontes renováveis (principalmente hidroelétrica) é ainda mais marcante (87% em 2011). Neste artigo são analisadas as projeções da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para 2030 e os riscos do aumento da dependência de combustíveis fósseis devido à eventual queda da participação de renováveis. As possíveis soluções técnicas para este problema e as correções de rumo necessárias na política energética do país são discutidas.

Palavras-chave Matriz energética. Renováveis. Reservatórios de hidroelétricas. Leilões. Modicidade tarifária.

INTRODUÇÃO

A principal característica da Matriz Energética Brasileira e que a distingue da matriz dos países industrializados é a elevada participação de fontes renováveis e a consequente baixa participação de hidrocarbonetos (carvão, petróleo e gás).

As renováveis representam 42,4% da energia produzida no Brasil, muito superior aos 9% de energia produzida nos Estados Unidos. A Figura 1 compara as matrizes energéticas dos dois países.

As principais contribuições à produção de energia renovável no Brasil em 2014 se originam em produtos da cana-de-açúcar (etanol e eletricidade) no montante de 15,7%, hidroeletricidade 11,5%, biomassa (lenha, carvão vegetal) 8,1% e outros (energia eólica, fotovoltaica e outras) 4,1%. A contribuição das fontes não renováveis é dominada pelo petróleo (39,4%), seguido pelo gás natural (13,5%) e carvão (5,7%). Energia nuclear contribui com 1,3%. Esta composição da matriz tem se mantido praticamente inalterada desde 1990 (Figura 2).

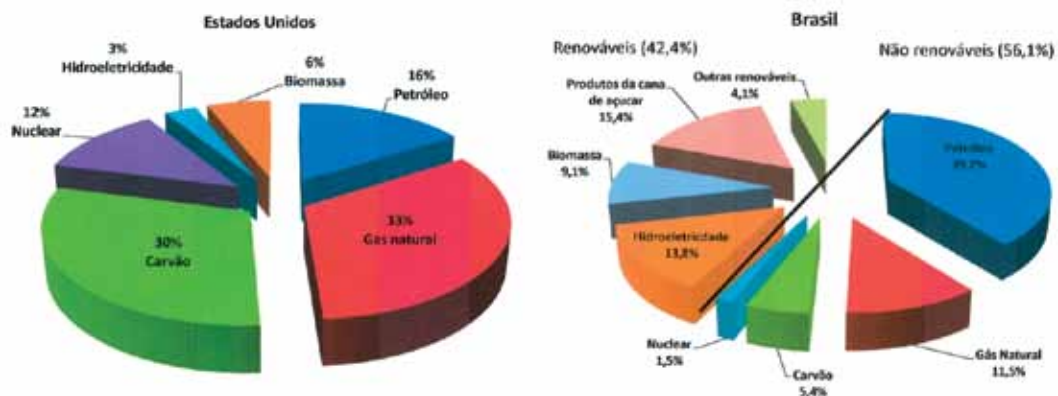


Figura 1 A Matriz Energética do Brasil e dos Estados Unidos (Fonte: EPE, 2013a).

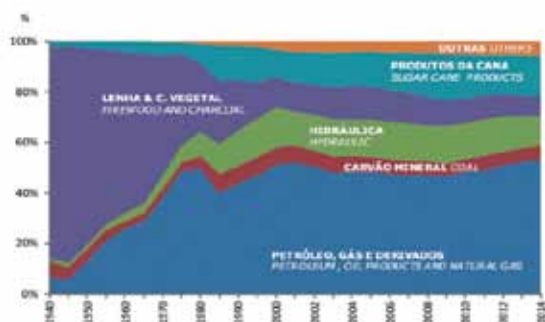


Figura 2 Oferta interna de energia no Brasil (Fonte: EPE, 2015).

Quando se analisa as fontes geradoras de eletricidade o que se verifica é que ela se origina predominantemente de energia hidroelétrica (65,2% em 2014) com uma pequena contribuição de usinas térmicas usando gás natural ou derivados de petróleo (Figura 3). Esta participação tem aumentado significativamente nos últimos anos devido problemas hidrológicos que reduziram a capacidade de geração das hidroelétricas.

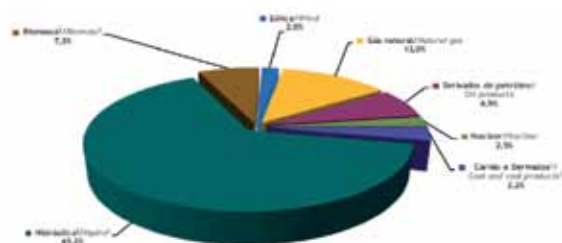


Figura 3 Geração elétrica por energético no Brasil (Fonte: EPE, 2015).
Notas: (1) inclui gás de coqueria; (2) inclui importação de eletricidade; (3) inclui lenha, bagaço de cana, lixívia, e outras recuperações.

O consumo de energia per capita no Brasil é de 1,457 tep/capita, bastante inferior ao consumo de países industrializados da Europa e Estados Unidos como se vê na Figura 4.

O consumo de energia per capita do Brasil é inferior ao da Argentina, Portugal, China e dos países

industrializados do Hemisfério Norte onde o clima é mais severo do que no Brasil. Os dados da Figura 4 sugerem que existe uma relação linear entre o Produto Nacional Bruto e o consumo de energia. A linearidade mencionada acima é usada frequentemente pelos setores de planejamento no Brasil para justificar grandes investimentos em novas fontes de energia. Esta premissa se revelou incorreta. Em muitos países estas duas variáveis estão “desvinculadas”, isto é, o produto bruto nacional tem crescido mais rapidamente que o consumo de energia. Há duas razões para tal:

- O enorme progresso de tecnologias de eficiência energética de modo que, com uma quantidade de energia menor é possível realizar a mesma tarefa. Muitas destas tecnologias se tornaram economicamente competitivas e foram introduzidas no setor produtivo sem interferência governamental, como lâmpadas fluorescentes compactas que substituíram as obsoletas lâmpadas com filamento de tungstênio. Em outros casos, Governos adotaram padrões de eficiência mínimos e excluíram do mercado produtos que não atendiam estes padrões. O Brasil dispõe de legislação adequada para adotar este caminho desde 2002 (Lei 10.295), os padrões mínimos têm sido introduzidos, com poucas exceções, como voluntários. Há uma resistência de setores industriais para que se tornem mandatórios.
- A importância crescente do setor de serviços (que são pouco intensivos no uso de energia) que está se tornando mais importantes para o crescimento econômico do que atividades industriais intensivas no uso de energia.

Para melhor analisar estes problemas costuma-se usar a intensidade energética (I) que é um indicador definido como:

$$I = \frac{E}{PIB}$$

Séries temporais de longo prazo da intensidade energética para diversos países tem mostrado que ela não é realmente constante, mas muda com o tempo, refletindo os efeitos combinados de mudanças na estrutura do produto econômico, incluído no PIB, assim como mudanças na composição das fontes de energia e na eficiência do seu uso (Figura 5).

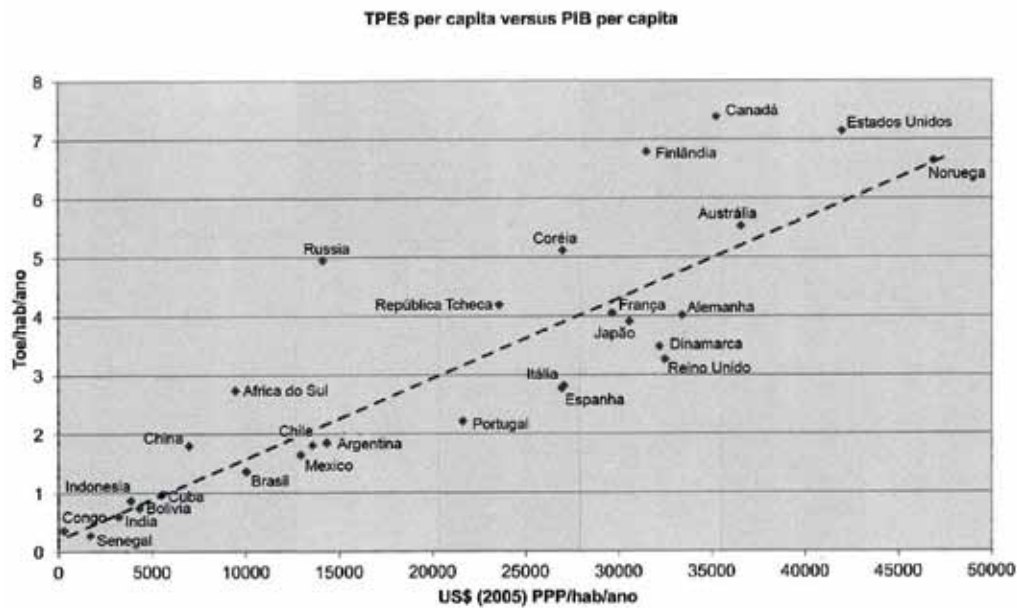


Figura 4 Consumo de energia per capita versus PIB per capita (Fonte: GOLDEMBERG; LUCON, 2008).

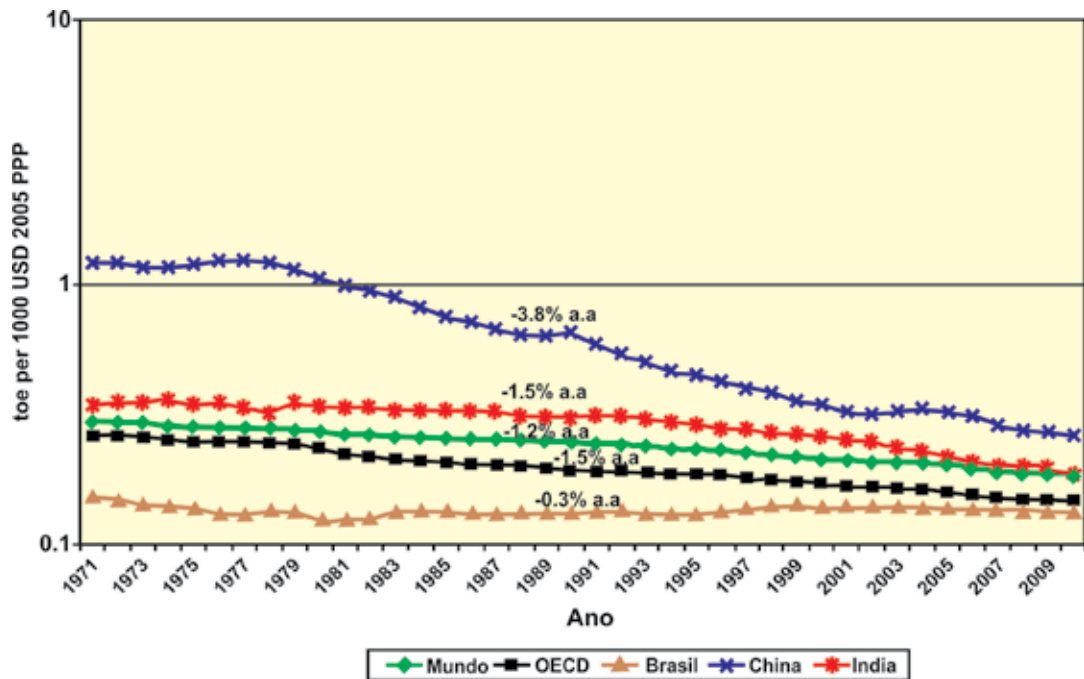


Figura 5 A evolução da intensidade energética – 1971 a 2009 (Fonte: GOLDEMBERG; PRADO, 2013).

Elasticidade energia (E) x PIB

É usual relacionar E e o PIB pela equação

$$E = k (\text{PIB})^\gamma, \text{ onde } k \text{ é uma constante}$$

A partir desta equação pode-se mostrar que:

$$\gamma = \frac{\frac{\Delta E}{E}}{\frac{\Delta (\text{PIB})}{\text{PIB}}}$$

γ é a elasticidade entre E e PIB

Se $\gamma = 1$, o consumo da energia cresce proporcionalmente ao PIB.

Se $\gamma < 1$, o consumo de energia cresce menos rapidamente do que o PIB.

Se $\gamma > 1$, o consumo de energia cresce mais rapidamente do que o PIB.

A intensidade energética do Brasil como se vê na Figura 4 é mais baixa do que a dos países industrializados e em países em desenvolvimento como China e Índia. Isto é devido ao fato que a atividade industrial (altamente intensiva no uso de energia) representa apenas cerca de 20% do PIB no Brasil e o restante do PIB se origina em serviços, agricultura e mineração que são pouco intensivos no uso de energia. Inquietante, porém é o fato de ter se mantido praticamente constante há cerca de duas décadas o que indica pequeno aumento de eficiência. No mundo como um todo ela está decrescendo a 3,8 por ano.

Para estimar as necessidades futuras de energia, o Ministério de Minas e Energia tem preparado regularmente um Plano Nacional de Energia (PNE 2030), o último dos quais, de 2007, faz previsões para 2030. A atualização deste Plano para 2050 está em preparação.

O PNE 2030 faz várias hipóteses para o crescimento do PIB e para a oferta interna de energia e de eletricidade o que dá origem a vários cenários: A1 com alto crescimento, C com baixo crescimento e B1, B2 com crescimento intermediário. A Tabela I dá as características destes cenários.

Tabela 1 Os quatro cenários do PNE 2030.

Cenários	Taxas de crescimento do PIB (2005-2020)
A1	5,1%
B1	4,1%
B2	3,2%
C	2,2%

(Fonte: MME, 2007).

A Tabela 2 mostra as taxas de crescimento do PIB e da oferta interna de energia para os vários cenários bem como a elasticidade entre eles.

Tabela 2 Taxa de crescimento do consumo de energia e do PIB (2004-2030).

Cenário	$\frac{\Delta E}{E}$ (energia)	$\frac{\Delta (\text{PIB})}{\text{PIB}}$	Elasticidade
A	4,2%	5,1%	0,82
B1	3,6%	4,1%	0,88
B2	3,0%	3,2%	0,94
C	2,3%	2,2%	1,05

(Fonte: MME, 2007).

Para os cenários A1, B1 e B2, a elasticidade é menor do que 1, isto é, o consumo de energia cresce menos rapidamente que o PIB e só se torna maior do que 1 no cenário C.

A Tabela 3 mostra a taxa de crescimento do PIB e da oferta interna de eletricidade. Para todos os cenários, a elasticidade é maior do que 1, isto é, o consumo de eletricidade cresce mais rapidamente que o PIB.

Tabela 3 Taxa de crescimento de consumo de eletricidade e do PIB (2005-2030)

Cenários	$\frac{\Delta E}{E}$ (eletricidade)	$\frac{\Delta (PIB)}{PIB}$	Elasticidade
A1	5,2	5,1%	1,02
B1	4,8	4,1%	1,17
B2	3,8	3,2%	1,18
C	3,1	2,2%	1,41

(Fonte: GOLDMBERG; PRADO, 2013).

A Figura 6 mostra as projeções de consumo final de energia e de eletricidade para 2030 nos quatro cenários considerados no PNE 2030.

É interessante comparar as hipóteses adotadas para o crescimento do PIB, consumo de energia no PNE 2030 com o que ocorreu realmente nos últimos 25 anos (1990-2013) (Figura 7).

O que os dados mostram é que:

- O PIB cresceu em média 2,67% por ano
- O crescimento da oferta de energia primária cresceu 3,77% por ano.
- A elasticidade de oferta de energia e PIB em média foi de 1,41
- O crescimento da oferta de energia elétrica foi de 3,82% por ano
- A elasticidade de energia elétrica e PIB em média foi de 1,45.

O crescimento anual do PIB de 1990 a 2013 de 2,67% por ano foi inferior ao adotado no cenário mais desfavorável do PNE 2030. O crescimento anual da oferta total de energia e de eletricidade foi próximo ao cenário B2. O PNE é claramente muito otimista.

A questão a investigar é como a energia e a eletricidade necessárias para 2030 serão produzidas.

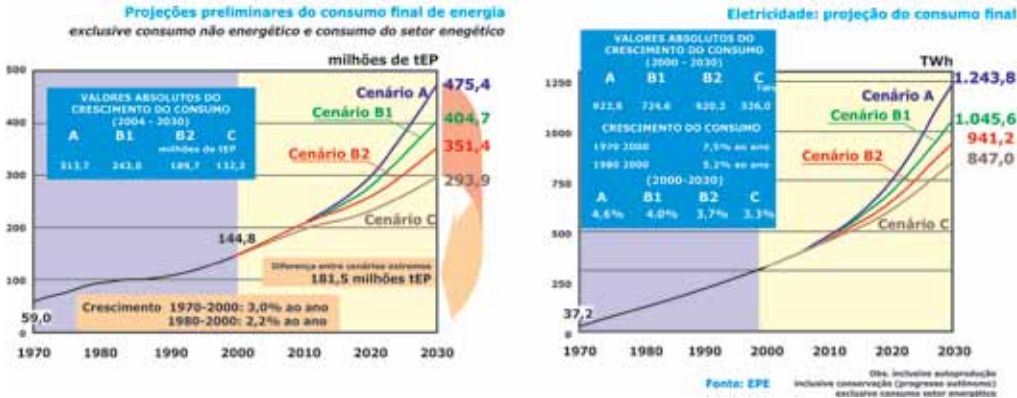


Figura 6 Projeções preliminares do consumo final de energia (Fonte: MME, 2007).

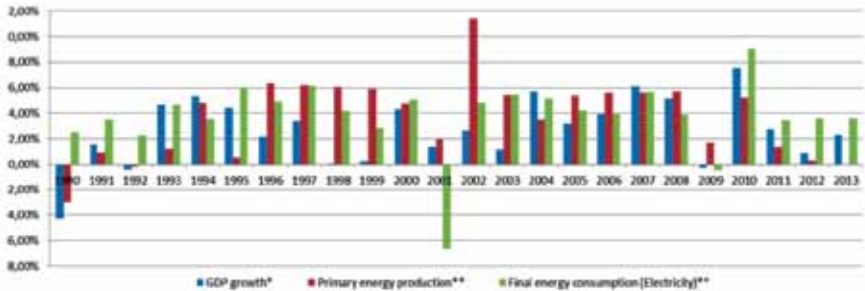


Figura 7 Brasil-Taxas de Crescimento do PIB, Produção de Energia Primária e Consumo Final de Eletricidade. (Fonte: WORLD BANK, 2013)

PETRÓLEO

Até 2011, praticamente toda a produção de petróleo no país se originava da Bacia de Campos e bastava para atender o consumo nacional de cerca de 2 milhões de barris por dia. Esta produção começou a declinar devido à exaustão progressiva de poços antigos e foi compensada pela produção de poços em grandes profundidades, que já é da ordem de 400 mil barris por dia. A Petrobras concentra seus esforços nestes depósitos chamados de pré-sal situados no oceano a grandes profundidades (mais de cinco quilômetros), abaixo de uma camada de sal de cerca de dois quilômetros de espessura. A produção esperada de petróleo para os próximos 20 anos encontra-se indicada na figura 8.

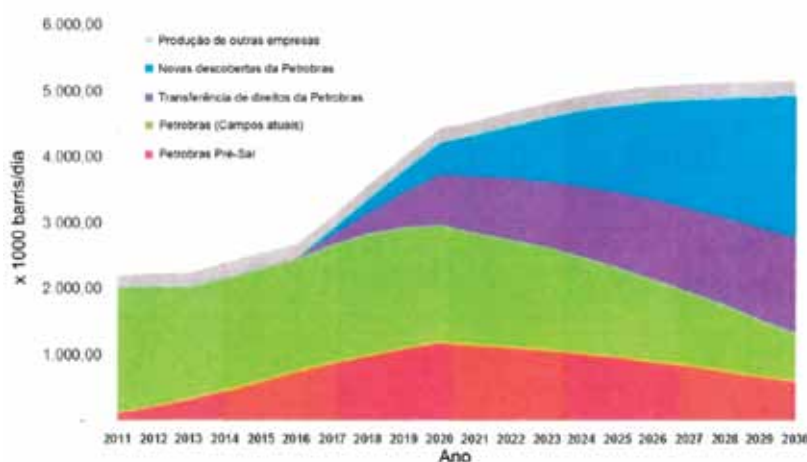


Figura 8 Projeções da produção de petróleo (Fonte: GOLDEMBERG et al., 2014).

Esta estratégia enfrenta vários desafios. Localizar petróleo nas profundezas do oceano é uma coisa, trazê-lo para a superfície e leva-lo até uma refinaria é outra. O otimismo permanente da Petrobras de que todos estes problemas vão ser resolvidos não ajuda muito, nem a falta de transparência sobre os custos do petróleo produzido. Estimativas não oficiais são de que eles seriam superiores a 50 dólares por barril produzido. Em comparação, o petróleo convencional custa menos de 10 dólares por barril para produzir e o fato de ser vendido a mais de 100 dólares por barril é consequência de acordos políticos e comerciais dos principais produtores que podem mudar.

Custos elevados na produção de petróleo não-convencional são o “calcanhar de Aquiles” nesta estratégia e podem, justamente, inviabilizá-la, porque tornam mais competitivas as alternativas ao petróleo.

Quais são estas alternativas?

A primeira delas – e a mais simples – é o aumento da eficiência dos motores usados na indústria automobilística. Tanto a União Europeia como os Estados Unidos fixam de tempos em tempos – desde 1980 – a quilometragem média por litro de combustível que os veículos automotores devem atingir. Por exemplo, nos Estados Unidos ela foi fixada em 10,6 quilômetros por litro em 1975, deveria atingir 16,6 quilômetros por litro em 2016 e deverá atingir 23 quilômetros por litro em 2025. Com isso, se a frota não aumentar muito, o consumo de derivados de petróleo diminui.

A segunda é a produção de biocombustíveis, como etanol da cana-de-açúcar no Brasil e de milho nos Estados Unidos. Hoje, eles substituem 3% do petróleo

que é consumido no mundo, mas esta percentagem poderá facilmente atingir 10%. Há aqui uma grande oportunidade para o Brasil exportar sua tecnologia de produção de cana de açúcar e de produção de etanol que já atingiu um elevado nível de produtividade. Até 2008, a produção de etanol aumentou cerca de 8% ao ano durante vários anos e substituiu cerca de 50% da gasolina que seria usada se a produção de etanol não existisse.

Sucede que o Governo Federal administra os preços de venda do diesel e gasolina e não tem permitido que eles acompanhem o aumento do custo de petróleo importado tendo se mantido congelado há mais de 5 anos.

A justificativa para tal política é a necessidade de combater a inflação, o que levou a Petrobrás a vender derivados de petróleo a preços inferiores aos que paga

por eles no exterior. O resultado foi um endividamento crescente e uma queda vertiginosa do valor das suas ações. Além disso, a Petrobras vem adquirindo grandes quantidades de gás natural liquefeito no mercado “spot” a preços mais altos que os dos fornecimentos normalmente para operar as termoeletricas que suplementam hoje a geração das hidroelétricas seriamente prejudicadas devido à seca que atinge o Sudeste do país.

Uma consequência colateral da política de preços artificiais da gasolina foi a “asfixia” da produção de etanol da cana-de-açúcar, uma vez que os preços de venda do produto são indexados aos da gasolina e se mantêm constantes desde 2007. Isso é totalmente irrealista, já que os outros insumos usados na produção do álcool (como fertilizantes) aumentaram de preço, acompanhando a elevação dos custos do petróleo no exterior.

A solução para estes problemas é adotar uma política realista de preços, que acompanhe o custo real do petróleo no exterior. As consequências inflacionárias destes aumentos – se forem reais – precisariam ser compensadas por outras medidas antinflacionárias que não levem à deterioração das contas da Petrobras e à destruição do Programa do Álcool.

Grandes empreendimentos em produção de petróleo não-convencional, como o pré-sal, têm grandes riscos. Alternativas existem e elas deveriam ser implementadas com a mesma energia e determinação com que a Petrobras procura retirar petróleo a grandes profundidades do oceano. O que a prudência recomenda é que a Petrobras deveria tentar reduzir os seus custos e dividir os riscos com outras empresas petrolíferas mundiais com experiência nesta área.

Contudo, o que estamos presenciando nas políticas adotadas pelo governo brasileiro na área de petróleo, desde 2008, é exatamente o oposto. A Petrobras ficou praticamente sozinha na exploração do pré-sal endividando-se enormemente a ponto de suas ações terem perdido cerca de 80 por cento do seu valor.

ENERGIA ELÉTRICA

O Brasil tem um potencial de geração de cerca de 250 milhões de quilowatts de eletricidade, dos quais um terço já está sendo utilizado. A capacidade instalada tem crescido cerca de 4 a 5 milhões de quilowatts por ano. Do ponto de vista técnico, é possível dobrar o potencial utilizado, o que permitiria para os próximos 20 anos manter a expansão da produção de energia hidroelétrica num nível satisfatório.

Há, portanto, ainda boas possibilidades de manter sua participação na matriz energética por algumas décadas. A expansão, contudo, deverá ocorrer na região Norte do país, principalmente na Amazônia, uma vez que a maioria dos aproveitamentos da região Sul-Sudeste do país já está sendo utilizado.

Na implantação de grandes empreendimentos hidroelétricos as populações ribeirinhas são afetadas e a construção de grandes reservatórios em muitos casos requer sua relocação, além dos problemas ambientais que origina, como está ocorrendo no caso de Belo Monte. O problema neste caso é que desde 1990 as usinas hidroelétricas estão sendo construídas com pequenos reservatórios a fim de minimizar a inundação de áreas, como se vê na Figura 9.

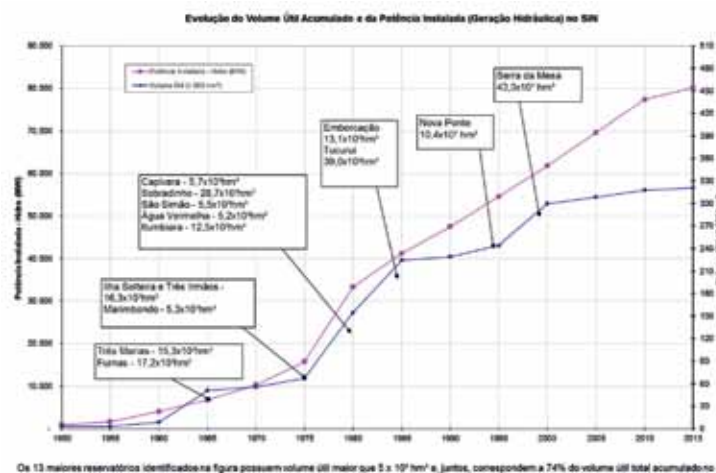


Figura 9 Evolução do volume útil acumulado e da potência instalada (geração hidráulica) no Sistema Interligado Nacional (Fonte: EPE, 2013b).

A construção de usinas afeta a população local. Frequentemente 10 ou 20 mil pessoas são afetadas e têm que ser deslocadas. Há também problemas ambientais decorrentes das obras realizadas e da indução da ocupação no entorno do empreendimento. Por outro lado, cada milhão de quilowatts instalado numa hidroelétrica gera eletricidade suficiente para atender às necessidades de pelo menos dois milhões de pessoas, que em geral vivem a milhares de quilômetros da usina geradora.

Se tomarmos o exemplo de Belo Monte, a formação de um reservatório de 500.000 hectares afetará cerca de 5 mil pessoas. No entanto, a eletricidade gerada de 10 milhões de kW médios beneficiará cerca de 16 milhões de habitantes que vivem a grandes distâncias do local onde a usina foi construída¹. A inundação de 500.000 hectares é aproximadamente igual à área que é desmatada anualmente na Amazônia pela expansão

da fronteira agrícola. Há aqui um claro conflito e a necessidade de tomar decisões difíceis que a sociedade brasileira vai ter que enfrentar. Sucessivos governos se revelaram incapazes de resolver estes problemas.

BIOMASSA

A contribuição de biomassa, seja através da produção de etanol ou da geração de eletricidade, está em crescimento e há boas perspectivas de que ele se torne ainda mais importante do que é hoje. Por exemplo, novos desenvolvimentos tecnológicos provavelmente permitirão dobrar a quantidade de etanol que pode ser produzido por hectare.

Uma das consequências positivas da expansão da produção de etanol é o uso do bagaço de cana para geração de eletricidade. Estima-se que seria possível produzir cerca de 15.000 MW de eletricidade nos períodos de safra (de abril a outubro) justamente no período seco do ano complementando assim a geração de eletricidade como indicado na Figura 10.

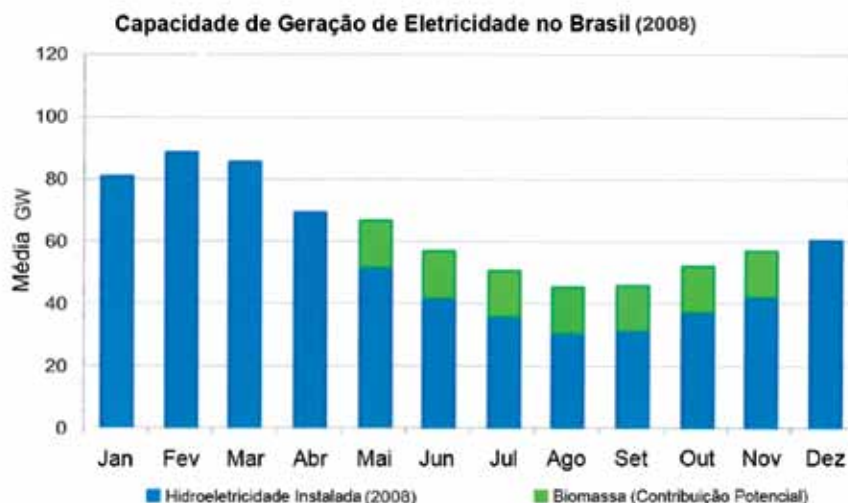


Figura 10 Capacidade de geração de eletricidade no Brasil (2008) (Fonte: Moreira¹, com. pes., 2015).

¹ Comunicação pessoal. Prof. Dr. José Roberto Moreira (rmoreira69@hotmail.com)

ENERGIA NUCLEAR

No Brasil, o uso da energia nuclear sempre foi cercado de discussões, muitas vezes prejudicadas pelo viés ideológico que assumiam, como ocorre, aliás, na maioria dos países do mundo. A primeira usina a entrar em operação, Angra I, de 657 MW, foi um projeto contratado, na forma turn-key, à Westinghouse, que apresentou, durante um certo período, performance operativa deficiente. Hoje, opera com um fator de disponibilidade superior a 80%. A segunda usina, Angra II, com 1.350 MW, decorreu do Acordo Brasil-Alemanha, firmado em junho de 1975. A terceira usina nuclear Angra III, também decorrente do mesmo acordo, está em construção com término previsto para 2018.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2015), o urânio representa 1,35% da oferta interna de energia primária do país e a energia nuclear 2,5% da oferta interna de eletricidade. O Brasil detém uma das maiores reservas global do mineral, ainda que a prospecção esteja em fase incipiente. Além disso, domina todo o ciclo de fabricação do combustível nuclear, ainda que algum investimento complementar seja demandado para iniciar-se o enriquecimento no país. De acordo com a Indústrias Nucleares do Brasil – INB, os estudos de prospecção e pesquisas geológicas objetivando o urânio foram realizados em apenas 25% do território nacional. Ainda assim, as reservas do mineral evoluíram de 6,3 mil toneladas de U3O8, conhecidas em 1973, para pouco mais de 309 mil toneladas em 2004.

O fato de apenas 25% do território nacional ter sido objeto de prospecção de urânio e a expressiva elevação das reservas no final dos anos 70, decorrente dos investimentos em prospecção então realizados, sugere que o tamanho das reservas brasileiras de urânio pode ser ampliado com novos trabalhos de prospecção e pesquisa mineral. Há mesmo indicações de recursos adicionais que são estimados de 800 mil toneladas de U3O8 e que, se confirmados, quadruplicariam as reservas conhecidas. Assim, do ponto de vista das reservas do mineral, não há restrições relevantes para a geração nuclear no país.

Para uso em reatores nucleares é preciso, contudo, “enriquecer” o urânio no isótopo U235, o que demanda um complexo processo industrial e elevados investimentos. O Brasil domina a tecnologia de enriquecimento usando ultracentrifugas e a unidade situada em Resende deverá produzir até 2016 cerca de 60% do urânio enriquecido necessário para as três centrais nucleares do país (Angra I, II e III). A prospecção, exploração, produção e enriquecimento de urânio são

um monopólio da União e somente pode atuar nesta área a empresa estatal INB, cujos atuais dirigentes se manifestaram recentemente pela manutenção do monopólio, o que limita a expansão das atividades nucleares no país.

Existem propostas de ampliação do número de reatores nucleares no país de 3 para 7 unidades até 2030, mas não há ainda decisões governamentais sobre sua implementação. Estas propostas têm dado origem a controvérsias devido aos custos elevados da energia nuclear quando comparados com outras opções, como a hidroelétrica, ainda não inteiramente aproveitadas no país. Além disso, as preocupações com segurança nuclear resultantes de grandes acidentes nucleares como o de Fukushima no Japão são fatores que devem ser levados em conta quando se discute a expansão do parque nuclear do país.

CARVÃO MINERAL E COQUE

Carvão mineral e coque representaram em 2014, 5,7% da oferta interna de energia, num total de 17,6 milhões de toneladas equivalentes de petróleo, metade para carvão vapor para produção de eletricidade e a outra metade para carvão metalúrgico não ferrosos.

De acordo com os dados da EPE, o setor siderúrgico consumiu, em 2014, 94% do carvão mineral e coque e o restante foi destinado a setores como ferro-ligas, não ferrosos e mineração e pelotização (EPE, 2015). O carvão usado no setor metalúrgico é quase que integralmente importado devido à baixa qualidade do carvão mineral nacional.

A demanda de carvão vapor tem sido suprida em sua quase totalidade pela produção local. A maior parcela do carvão vapor é destinada à geração termelétrica, sendo o restante consumido para geração de calor no setor industrial.

A projeção da demanda de carvão mineral e coque está associada ao cenário de expansão da siderurgia, enquanto que a projeção de carvão vapor é em função da geração termelétrica esperada ao longo do período decenal que tem aumentado devido a necessidade de acionar as usinas térmicas para a produção de eletricidade devido a crise hídrica atual.

CONCLUSÕES

Problemas conjunturais foram criados nos últimos anos por decisões políticas. Eles precisam ser resolvidos para permitir que os problemas estruturais possam

ser melhor equacionados. Os principais problemas na área energética são os leilões para construção de novas usinas para geração de eletricidade, a renovação das concessões e a administração dos preços de venda de derivados do petróleo. Desde 2004, o Governo Federal, através da EPE (Empresa de Pesquisa Energética), tem feito leilões para a construção de novas usinas geradoras com a finalidade de expandir o sistema.

Por opção política, foi adotada a regra de fazer com que todas as formas de energia (hidroelétrica, térmica, eólica, biomassa) competissem em igualdade de condições nos leilões com um preço máximo (para o quilowatt/hora) fixado pela EPE. A justificativa para tal procedimento é aparentemente beneficiar o consumidor, já que competição levaria à queda de preços, garantindo a “modicidade tarifária”.

Na prática, o resultado é que todas as fontes alternativas às hidroelétricas foram excluídas da competição. Só mais recentemente fontes de energia eólica começaram a competir devido ao fato de haver um excesso de oferta de equipamentos e uma redução na demanda de equipamentos devido à crise econômica global.

O procedimento usado pela EPE não se justifica porque não é possível produzir energia elétrica sem atentar para suas especificidades tecnológicas locais e operacionais. Como as tecnologias envolvidas são diferentes, resultam em impactos socioambientais diferentes. O procedimento correto seria a realização de leilões regionais e estabelecer preços máximos diferentes para cada fonte (eólica, biomassa, gás etc.). Gradativamente estes preços máximos deveriam cair para os leilões realizados a cada ano, encorajando a competição e abrindo espaço para energias renováveis. As novas fontes, mais limpas, precisam de subvenções em seus estágios iniciais de maturação. Essa é uma forma mais racional de se aplicar recursos públicos, comparativamente à ênfase nos combustíveis fósseis.

Outro problema conjuntural foi a decisão do Governo Federal por meio da Medida Provisória 579/2012, de antecipar a renovação das concessões de usinas hidroelétricas previstas para os próximos anos, desde que a tarifa de venda de energia ao consumidor fosse reduzida em 20%. A medida foi considerada demagógica e levou as empresas do sistema Eletrobrás à insolvência, sendo necessários recursos do Tesouro Nacional para viabilizá-las. No fundo, a população em geral (através dos impostos) pagou pelos descontos que os consumidores recebiam, favorecendo claramente as indústrias intensivas no consumo de eletricidade.

O procedimento correto deveria ter sido esperar que as concessões se esgotassem (geralmente num prazo de 30 anos) e que o governo as licitasse novamente,

estimulando a concorrência entre os atuais detentores das concessões e novos competidores. Isso certamente levaria à redução permanente das tarifas.

Os estabelecimentos comerciais são a interface entre as fábricas que produzem todo o tipo de produtos e a população. Todos os produtos consumidos passam por algum tipo de estabelecimento comercial. Mais ainda com a Lei Nacional de Resíduos Sólidos em vigor atualmente os produtos duráveis devem retornar aos fabricantes atingida sua vida útil. Daí a importância de boas práticas ambientais do setor comercial em todas suas atividades que vão desde o uso de sacolas recicláveis para acondicionamento de alimentos, economia de água e eletricidade e disposição adequada dos resíduos.

Boas práticas no setor comercial são um instrumento poderoso de educação ambiental para toda a população.

REFERÊNCIAS

- EPE-Empresa de Pesquisa Energética. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2013*. Ano base 2012. Rio de Janeiro, 2013a.
- EPE- Empresa de Pesquisa Energética. *Reservatórios*. Rio de Janeiro, 2013b.
- EPE- Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional 2015*: Ano base 2014. Rio de Janeiro, 2015.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. S. *Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento*. 3ª edição, EDUSP, 400 p. 2008.
- GOLDEMBERG, J.; PRADO, L.T. The decline of sectorial components of the world's energy intensity. *Energy Policy*, v. 54, p. 62-65. 2013.
- GOLDEMBERG, J.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A.; LUCCHESI, R. Oil & Natural Gas Prospects in South American: Can the Petroleum Industry Pave the Way for Renewables in Brazil?. *Energy Policy*, v. 64, p. 58-70. 2014.
- MME-Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília, 2007
- WORLD BANK. *The World Bank Data – GDP*. 2013. Disponível em: <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?order=wbapi_data_value_2012+wbapi_data_value+wbapi_data_value-last&sort=asc>. Acesso em 21 de maio de 2015.

O petróleo no Brasil

Claudio Riccomini

Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo
Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo
Bolsista Produtividade do CNPq, Brasil

Lucy Gomes Sant'Anna

Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo
Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo

Colombo Celso Gaeta Tassinari

Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo
Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo
Bolsista Produtividade do CNPq, Brasil

Fábio Taioli

Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo
Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo

RESUMO

As bacias sedimentares brasileiras atualmente produtoras de petróleo (óleo e gás natural) convencional são dos tipos intracratônica, *rift* interior e margem passiva. Nessas bacias, os folhelhos são as rochas geradoras mais comuns. Domina folhelho marinho devoniano nas bacias intracratônicas e folhelho lacustre neocomiano nos *rift* interiores e neocomiano a aptiano na margem passiva. Folhelho marinho aptiano a neocretáceo e rocha carbonática marinha albiana também são geradores nas bacias da margem passiva. O petróleo gerado nas bacias brasileiras acumulou em rochas reservatórios de composições e idades distintas. Arenitos depositados em ambientes continentais a transicional são os principais reservatórios nas bacias intracratônicas e *rift* interiores. Além dos arenitos, conglomerados de ambiente transicional, arenitos marinhos, rochas carbonáticas continentais a marinhas, e rochas ígneas e metamórficas fraturadas também são reservatórios importantes nas bacias da margem continental. A produção brasileira de óleo ocorre principalmente em campos petrolíferos da Bacia de Campos situados na região marinha (*offshore*), vizinha ao Estado do Rio de Janeiro. Em 2014, a produção de gás natural contou com uma diversidade maior de bacias sedimentares, incluindo as bacias de Campos, Santos, Solimões e Camamu, e, assim, um número maior de Estados da federação. A produção nacional de petróleo tem mantido uma tendência de crescimento no período de 2000 a 2014 e a participação do petróleo extraído das rochas reservatórios do pré-sal é crescente.

Palavras-chave Hidrocarbonetos. Pré-sal. Reservatórios de óleo e gás. Bacias petrolíferas brasileiras. Cretáceo.

INTRODUÇÃO

Este capítulo traz uma visão geral da distribuição do petróleo (óleo e gás natural convencionais) no Brasil. As jazidas são relacionadas aos diferentes tipos de bacias sedimentares. É apresentado um quadro das rochas geradoras e reservatórios nas bacias produtoras, sintetizadas por tempo geológico e ambiente sedimentar, bem como dados recentes de produção. São apresentadas, também, as características gerais dos reservatórios do pré-sal, localizados em águas profundas e ultraprofundas, e considerados como a maior descoberta petrolífera mundial dos últimos 50 anos.

BACIAS SEDIMENTARES E SISTEMAS PETROLÍFEROS NO BRASIL

Os hidrocarbonetos são compostos orgânicos que contêm o hidrogênio (H) e o carbono (C) em sua estrutura. O petróleo é uma mistura complexa de hidrocarbonetos de ocorrência natural (LEVORSEN, 2001). Embora existam ocorrências de petróleo na superfície terrestre, a maior parte da produção mundial se dá em formações rochosas encontradas no interior de bacias sedimentares, onde se situam desde alguns metros a até mais de dez mil metros de profundidade. Bacias sedimentares são regiões da crosta terrestre que apresentam subsidência, isto é, afundam lentamente gerando espaço para a acumulação de sedimentos. As bacias sedimentares apresentam subsidência prolongada, normalmente por até dezenas de milhões de anos, permitindo a acumulação de pacotes de sedimentos que podem atingir milhares de metros de espessura.

As bacias sedimentares podem ser classificadas em cinco tipos principais, em função do seu contexto na tectônica de placas: bacias intracratônicas, bacias *rift*, bacias de margem passiva, bacias de antepaís e bacias transcorrentes. As acumulações de óleo e gás natural que sustentam a produção brasileira ocorrem principalmente em bacias *rift*, com evolução para bacias de margem passiva, e secundariamente em bacias intracratônicas.

As bacias *rift* são alongadas e estreitas, da ordem de centenas a até poucos milhares de quilômetros de comprimento por dezenas a centenas de quilômetros de largura. Elas possuem espessuras de rochas sedimentares que variam de centenas a alguns milhares de metros. Essas bacias são limitadas por falhas profundas e formadas em limites divergentes de placas, ou seja, em limites entre placas tectônicas que se afastam. Por se encontrarem em limites divergentes de placas, as bacias *rift* podem evoluir sucessivamente para bacias de margem passiva e para bacias oceânicas. As bacias intracratônicas, também conhecidas como bacias cratônicas interiores ou sinéclises, desenvolvem-se no interior das placas tectônicas e frequentemente apresentam conexão com um mar durante a sua evolução. As bacias intracratônicas apresentam grande extensão em área, que pode atingir centenas de milhares a alguns milhões de quilômetros quadrados, e espessuras de rochas sedimentares e vulcânicas da ordem de até pouco mais de uma dezena de quilômetros.

O Brasil possui larga extensão de seu território coberta por bacias sedimentares de diferentes tipos, tais como bacias *rift* (por exemplo, Tacutu, Araripe, Jatobá, Tucano, Recôncavo, Taubaté), bacias da margem passiva (Espírito Santo, Campos, Santos, Pelotas, dentre

outras), e bacias intracratônicas (Solimões, Amazonas, Parnaíba, São Francisco, Paraná). As bacias de Santos e Campos têm chamado atenção recente em função das expressivas reservas de hidrocarbonetos descobertas nas rochas do denominado pré-sal e que tendem a colocar o Brasil, em médio prazo, entre os principais países produtores mundiais de óleo e gás natural.

Em função de sua natureza, as bacias sedimentares apresentam maior ou menor potencial petrolífero. As bacias sedimentares com jazidas de petróleo (óleo ou gás natural) são geralmente chamadas de províncias petrolíferas (MAGOON; DOW, 1994).

A compreensão dos processos formadores de acumulações de hidrocarbonetos em bacias sedimentares passa pelo estudo da origem das rochas que os contêm. Isso envolve a investigação dos processos de erosão, transporte e deposição dos sedimentos que se acumulam numa bacia sedimentar, e também dos processos que compõem a diagênese como a compactação, cimentação, diminuição da porosidade e permeabilidade intergranular. Esses processos de sedimentação e diagênese estão diretamente relacionados com a idade de formação, contexto tectônico e história térmica da bacia sedimentar.

No interior das bacias sedimentares, a existência de uma acumulação de petróleo (óleo ou gás) depende de elementos e processos geológicos considerados essenciais. Os elementos essenciais são quatro: rocha-fonte ou rocha-geradora, rocha reservatório, rocha-selante e soterramento. Quando as rochas selantes cobrem as rochas reservatórios elas compõem uma manta impermeável, que impede o escape dos hidrocarbonetos e, em consequência, pode favorecer a formação de um campo de óleo ou gás natural.

Dois processos são também fundamentais: formação de uma trapa (ou armadilha) e a geração-migração-acumulação de hidrocarbonetos (MAGOON; BEAUMONT, 1999). A esse conjunto constituído pela acumulação de petróleo, elementos e processos essenciais dá-se o nome de sistema petrolífero (MAGOON; DOW, 1994). A identificação de um sistema petrolífero engloba o reconhecimento de uma porção de rocha-geradora ativa e todas as acumulações de óleo e gás geneticamente relacionadas (MAGOON; BEAUMONT, 1999). Cada sistema petrolífero possui um limite estratigráfico, uma extensão geográfica e uma idade geológica. Em um sistema petrolífero, várias trapas podem ser viáveis economicamente para a produção de petróleo, com a tecnologia disponível naquele momento, sendo então denominadas de campo petrolífero (MAGOON; DOW, 1994).

Em síntese, ao ocorrer geração e migração de hidrocarboneto a partir da rocha-geradora é necessário que este encontre armadilha ou trapa já formada, com geometria adequada das rochas reservatório e selante, para que possa haver uma acumulação. Depois da investigação geológica e avaliação econômica de uma acumulação, esta poderá ser considerada como uma jazida e tornar-se um campo de óleo ou de gás natural, desde que economicamente viável com a tecnologia disponível para produção. O campo de óleo ou gás é representado por uma área geográfica, na superfície, correspondente à projeção da rocha reservatório limitada pela trapa.

BACIAS SEDIMENTARES PRODUTORAS NO BRASIL E SEUS SISTEMAS PETROLÍFEROS

No Brasil, as bacias sedimentares produtoras de óleo e gás natural são essencialmente de três tipos: bacias intracratônicas (sinéclises), *rifts* interiores e bacias da margem passiva, em ordem crescente de importância. As sinéclises e os *rifts* interiores encontram-se na área continental emersa, enquanto que as bacias da margem passiva distribuem-se ao longo da margem atlântica, essencialmente na área submersa.

Doze bacias sedimentares brasileiras foram produtoras de óleo e/ou gás no ano de 2014 (Figura 1). Quatro delas, as bacias do Solimões, Parnaíba, Tucano e Recôncavo, possuem suas áreas atuais de ocorrência limitadas exclusivamente à parte continental emersa do território brasileiro, sendo as duas primeiras sinéclises e as duas últimas *rifts*. As bacias do Ceará, Potiguar, Alagoas, Sergipe e Espírito Santo desenvolvem-se nas áreas emersa e submersa, sendo apenas Potiguar um *rift* e as demais bacias de margem passiva. E as bacias de Camamu, Campos e Santos ocorrem unicamente na área submersa como bacias de margem passiva.

Em 2014, as principais bacias sedimentares produtoras de óleo no Brasil foram as bacias de Campos e Santos, responsáveis por 90,4% da produção nacional. Em ordem decrescente de importância, as bacias Potiguar, Recôncavo, Sergipe, Espírito Santo, Solimões, Ceará, Alagoas e Camamu totalizaram 9,6% da produção nacional de óleo. Quanto ao gás natural, neste mesmo ano, as maiores produções foram obtidas nas bacias de Campos, Santos e Solimões, que somadas atingiram 70,6% da produção brasileira, e foram sucedidas pelas bacias do Espírito Santo, Camamu, Parnaíba, Sergipe, Recôncavo, Alagoas, Potiguar, Ceará e Tucano Sul, que juntas responderam por 29,3% do total de gás natural produzido (Figura 2 e 3) (ANP, 2014a).

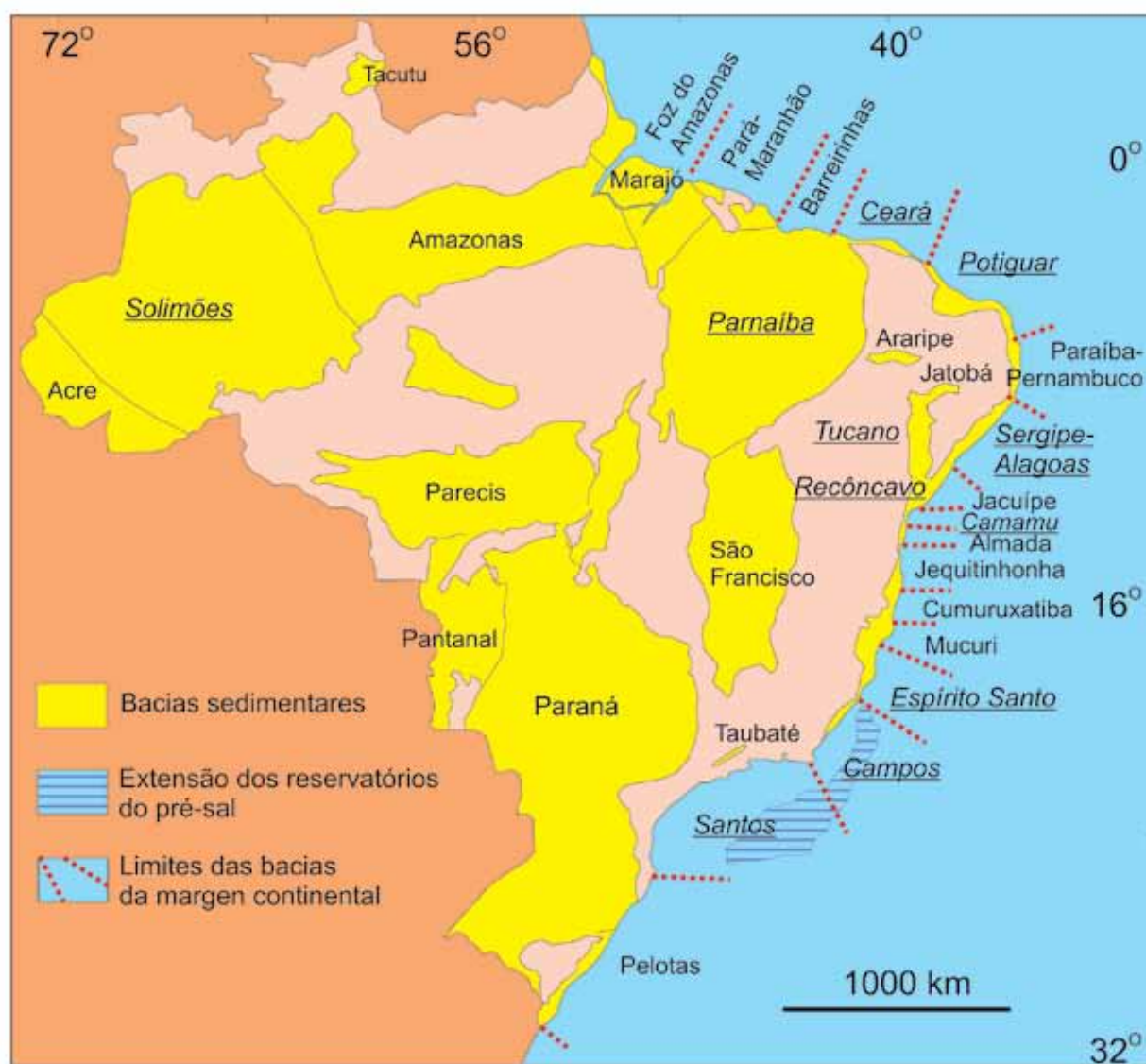


Figura 1 Principais bacias sedimentares brasileiras; em itálico, grifado, estão assinaladas as bacias produtoras em 2014 (Fonte: MILANI; ARAÚJO, 2003, modificado)..

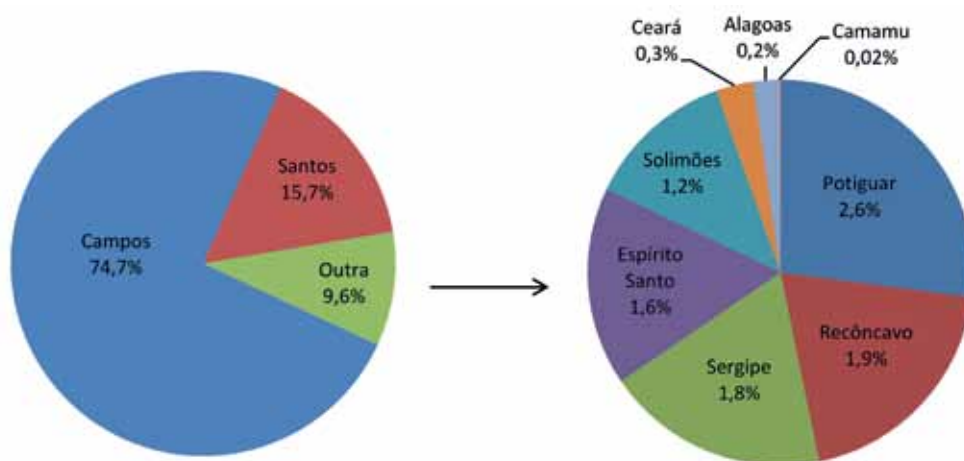


Figura 2 Produção de óleo por bacia sedimentar brasileira em 2014 (Fonte: ANP, 2014a).

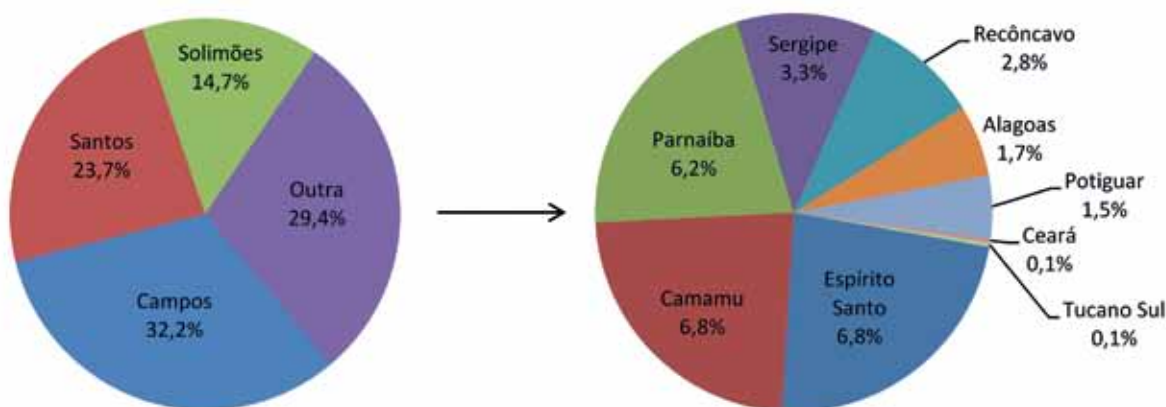


Figura 3 Produção de gás natural por bacia sedimentar brasileira em 2014 (Fonte: ANP, 2014a).

Os sistemas petrolíferos dessas bacias estão sintetizados nas Tabelas 1 a 4, as quais também destacam as litologias e os ambientes deposicionais das rochas geradoras e reservatórios.

Nas bacias intracratônicas do Solimões e Parnaíba os sistemas petrolíferos produtores (Tabela 1) possuem rochas geradoras e reservatórios de idade paleozoica, cuja origem relaciona-se à história do paleocontinente Gondwana. Nessas duas bacias, as rochas geradoras são folhelhos marinhos devonianos denominados

de Formação Jandiatuba na Bacia do Solimões e de Formação Pimenteiras na Bacia do Parnaíba (PEREIRA et al., 2007). As principais rochas reservatórios são arenitos flúvio-deltáicos e eólicos (Formação Juruá) (CAPUTO; SILVA, 1990) de idade neocarbonífera na Bacia do Solimões e arenitos meso-neodevonianos depositados em ambiente transicional marinho raso a continental (Formação Cabeças) (GÓES; FEIJÓ, 1994) na Bacia do Parnaíba.

Tabela 1 Bacias intracratônicas produtoras de petróleo em 2014: SPP – sistema petrolífero principal; PCO – principal campo produtor de óleo; PCG – principal campo produtor de gás; G – rochas geradoras; R – rochas reservatórios. Para a formação geológica sublinhada é apresentado o intervalo de tempo da rocha geradora ou reservatório. Para a formação geológica não sublinhada é apresentado o intervalo de tempo total abrangido pela formação.

Tempo geológico			Bacias intracratônicas	
Era	Período	Época	Solimões	Parnaíba
			SPP: Jandiatuba - Juruá	SPP: Pimenteiras-Cabeças
			PCO: Leste do Urucu	PCO: Gavião Real
			PCG: Leste do Urucu	PCG: Gavião Real
Paleozoico	Permiano	Neo		
		Eo		
	Carbonífero	Neo	R (Fm. Juruá)	
		Eo		
	Devoniano	Neo	G (Fm. Jandiatuba)	G (Fm. Pimenteiras) R (Fm. Cabeças)
		Meso		

● Folhelho marinho ● Arenito continental ● Arenito transicional

(Fonte: CAPUTO; SILVA, 1990; PEREIRA et al., 2007; WANDERLEY FILHO et al., 2007; ANP, 2015a, b, c).

As bacias *rift* interiores (Tabela 2) existentes na área emersa próxima à linha de costa atual do Brasil foram formadas durante o estágio inicial de ruptura do supercontinente Pangea. Alguns desses *rifts*, como o Recôncavo e Tucano, são braços abortados da junção tríplice, cuja evolução não progrediu para a abertura de um oceano, no caso, o Oceano Atlântico. Devido à vinculação com o início da ruptura do Pangea, essas bacias *rift* possuem rochas geradoras eocretáceas. Predominam folhelhos lacustres de idade neocominiana, denominados de Formação Pendência na Bacia Potiguar (MILANI; ARAÚJO, 2003), de Membro Tauá da Formação Candeias na Bacia Tucano Sul (COSTA et al., 2007) e de Membro Gomo da Formação Candeias na Bacia do Recôncavo (SANTOS et al., 1990; SILVA et al., 2007). Folhelho de ambiente sedimentar transicional e idade aptiana, denominado Formação Alagamar, também é gerador na Bacia Potiguar. O petróleo gerado por esses folhelhos migrou para rochas reservatórios

de idades distintas, mas com predomínio de unidades eocretáceas nesses *rifts* interiores. Na Bacia Potiguar, os reservatórios são formados por arenitos intercalados nas próprias unidades geradoras (formações Pendência e Alagamar/Mb. Upanema) e arenitos flúvio-eólicos albianos da Formação Açu (BERTANI et al., 1990; MILANI; ARAÚJO, 2003; PESSOA NETO et al., 2007). Na Bacia Tucano Sul, as rochas reservatórios são arenitos flúvio-eólicos de idade neojurássica (Fm. Aliança/Mb. Boipeba e Fm. Sergi) e eocretácea neocomiana (Formação Água Grande), além de arenito deltáico lacustre neocomiano da Formação Candeias (COSTA et al., 2007). Na Bacia do Recôncavo as rochas reservatórios são arenitos flúvio-eólicos do Neojurássico (Formação Sergi) e Neocomiano (Formação Água Grande), bem como arenitos lacustres eocretáceos de natureza turbidítica (Formação Candeias) e deltáica (formações Marfim e Pojuca do Grupo Ilhas) (SANTOS et al., 1990, MILANI; ARAÚJO, 2003, SILVA et al., 2007).

Tabela 2 Bacias rift interiores produtoras de petróleo em 2014: SPP – sistema petrolífero principal; PCO – principal campo produtor de óleo; PCG – principal campo produtor de gás; G – rochas geradoras; R – rochas reservatórios. Para a formação geológica sublinhada é apresentado o intervalo de tempo da rocha geradora ou reservatório. Para a formação geológica não sublinhada é apresentado o intervalo de tempo total abrangido pela formação.

Tempo geológico				Rifts interiores							
Era	Período	Época	Idade	Potiguar		Tucano Sul		Recôncavo			
				SPP: Pendência-Açu		SPP: Candeias-Candeias		SPP: Candeias-Sergi			
				PCO: Canto do Amaro		PCO: Fazenda Santa Rosa		PCO: Araçás			
				PCG: Ubarana		PCG: Conceição		PCG: Miranga			
Mesozoico	Cretáceo	Neo	Cenomaniano	R (Fm. Açu)							
		Gálico	Albiano								
			Aptiano	G (Fm. Alagamar/Mb. Galinhos)							
				R (Fm. Alagamar/Mb. Upanema)							
			Eo	Barremiano							
		Hauteriviano		G (Fm. Pendência)	R (Fm. Pendência)					R (Fm. Pojuca)	
										R (Fm. Marfim)	
		Valanginiano									
			Neocomiano	Berriasiano						R (Fm. Candeias/ Mb. Gomo)	R (Fm. Candeias)
		R (Fm. Água Grande)					R (Fm. Água Grande)				
		Jurássico	Neo				R (Fm. Sergi)		R (Fm. Sergi)		
							R (Fm. Aliança/Mb. Boipeba)				

● Folhelho lacustre ● Folhelho transicional ● Arenito continental ● Arenito transicional

(Fonte: MILANI; ARAÚJO, 2003; PESSOA NETO et al., 2007; MAGNAVITA et al., 2012; MME/EPE, 2012; ANP, 2015a, b, c).

As bacias sedimentares da margem passiva constituem *rifts* que progrediram para a abertura de bacias oceânicas. Em 2014, as províncias petrolíferas, de norte para sul, foram as bacias do Ceará, Alagoas, Sergipe, Camamu, Espírito Santo, Campos e Santos (Tabelas 3 e 4). Todas essas bacias possuem rocha geradora de idade eocretácea. A Bacia de Santos contém ainda rocha geradora de idade neocretácea. Predomina rocha-geradora constituída por folhelho lacustre com idade neocomiana a barremiana nas bacias de Alagoas, Sergipe, Camamu e Espírito Santo, idade barremiana a aptiana nas bacias de Campos e Santos (CHANG et al., 2008; ESTRELLA et al., 2008), e idade aptiana na Bacia do Ceará. Em algumas bacias também ocorre geradora composta por folhelho marinho de idades aptiana nas bacias de Alagoas e Sergipe, albiana na Bacia do Espírito Santo, e neocretácea na Bacia de Santos. O folhelho marinho dessas bacias é geralmente calcífero e está associado a rochas carbonáticas (calcilitos, margas). Os nomes das formações dados a esses folhelhos em cada bacia sedimentar são apresentados nas tabelas 3 e 4.

O petróleo dessas unidades migrou para rochas reservatórios de composições e idades distintas. Arenito é a rocha reservatório predominante nas bacias do Ceará, Alagoas, Sergipe e Camamu, com idades neojurássica (formações Serraria, Aliança e Sergi), neocomiana (formações Penedo, Barra de Itiúba e Morro do Barro), barremiana (formações Coqueiro Seco e Rio de Contas/Mb. Mutá), aptiana (formações Paracuru e Taipus-Mirim/Mb. Itacaré) e senoniana (Formação Calumbi) (Tabela 3). O ambiente deposicional dessas rochas é variado: o arenito da Formação Calumbi foi depositado em ambiente marinho, o arenito da Formação Paracuru originou-se em ambiente transicional, e as rochas arenosas das demais formações foram depositadas em ambientes sedimentares continentais. As bacias Alagoas e Sergipe se distinguem das demais por também conterem acumulações de hidrocarbonetos em conglomerado aptiano depositado em ambiente transicional (Membro Carmópolis da Formação Muribeca) e em fraturas nas rochas ígneas e metamórficas pré-cambrianas que constituem o embasamento dessas bacias.

Devido ao contexto paleogeográfico das bacias do Espírito Santo, Campos e Santos no cretáceo, o petróleo formado em suas rochas geradoras migrou para arenitos e rochas carbonáticas. Arenitos dominam na Bacia do Espírito Santo e nas formações mais jovens (neocretáceas a cenozoicas) das bacias de Campos e Santos. Rochas carbonáticas constituem os reservatórios eocretáceos das bacias de Campos e Santos

(Tabela 4). Adicionalmente, na tabela 4 pode-se notar que os reservatórios sedimentares mais antigos que as unidades evaporíticas (sal), isto é, os reservatórios que constituem o chamado “pré-sal”, foram depositados em ambientes sedimentares transicionais a continentais. Por outro lado, os reservatórios sedimentares mais novos do que as unidades evaporíticas, isto é, os reservatórios que constituem o chamado “pós-sal”, foram depositados em ambientes sedimentares marinhos.

A camada evaporítica (formações Mariricu/Mb. Itaúnas, Retiro e Ariri, Tabela 4) se estende na região oceânica do sudeste e sul do Brasil, entre os Estados do Espírito Santo e Santa Catarina (BARBASSA, 2007). A faixa de sal apresenta 800 km de comprimento e até 200 km de largura (Figura 1) e situa-se abaixo do fundo marinho, sob uma lâmina d’água com profundidade de 1.500 a 3.000 m, somada a uma pilha de rochas com 3.000 a 4.000 m de espessura. O espesso pacote de sal atinge até 2,5 km de espessura (CHANG et al., 1990) e é composto essencialmente de halita (NaCl) e intercalações de anidrita, carnalita e traquidrita (GAMBOA et al., 2008). O sal foi depositado em um cenário de um golfo estreito e alongado, muito semelhante ao do atual Mar Vermelho, a partir da água do mar vinda do sul e com alta salinidade, sob clima quente e altas taxas de evaporação. Tanto a camada de sal como rochas argilosas atuaram como selante para as rochas reservatórios que estão debaixo dessa extensa camada evaporítica. Esses reservatórios são encontrados na área geográfica das bacias de Santos e Campos, talvez adentrando a extremidade sul da Bacia do Espírito Santo. As rochas carbonáticas reservatórios do pré-sal são calcários com coquinas e calcários microbialíticos. As coquinas lacustres recebem a designação de Grupo Lagoa Feia/Formação Coqueiros na Bacia de Campos (WINTER et al., 2007) e de Formação Itapema na Bacia de Santos (CHANG et al., 2008). Os calcários microbialíticos transicionais são denominados de Grupo Lagoa Feia/Formação Macabu na Bacia de Campos (ESTRELLA et al., 2008; WINTER et al., 2007; DOROBEEK, 2012) e de Formação Barra Velha na Bacia de Santos (MOREIRA et al., 2007; CHANG et al., 2008) (Tabela 4). Os calcários microbialíticos podem ter na sua origem a contribuição de um sistema tufa-travertino, um reservatório complexo tendo em vista a ampla variação lateral e vertical das rochas desse sistema (RICCOMINI et al., 2012). Basaltos fraturados e vesiculados de idade neocomiana, produzidos pelos eventos vulcânicos que acompanharam a ruptura do supercontinente Pangea e abertura do Oceano Atlântico Sul, são também reservatórios do pré-sal nas bacias de Campos e Santos (Tabela 4).

Tabela 3 Bacias da margem continental (Ceará a Camamu) produtoras de petróleo em 2014: SPP – sistema petrolífero principal; PCO – principal campo produtor de óleo; PCG – principal campo produtor de gás; G – rochas geradoras; R – rochas reservatórios. Para a formação geológica sublinhada é apresentado o intervalo de tempo da rocha geradora ou reservatório. Para a formação geológica não sublinhada é apresentado o intervalo de tempo total abrangido pela formação.

Tempo geológico				Bacias da margem passiva			
Era	Período	Época	Idade	Ceará	Alagoas	Sergipe	Camamu
				SPP: Mundaú-Paracuru	SPP: Barra de Itiúba-Carmópolis	SPP: Barra de Itiúba-Carmópolis	SPP: Morro do Barro-Morro do Barro
				PCO: Atum	PCO: Pilar	PCO: Carmópolis	PCO: Manati
				PCG: Atum	PCG: Pilar	PCG: Piranema	PCG: Manati
Mesozóico	Cretáceo	Neo	Maastrichtiano				
			Campaniano		R (Fm. Calumbi)	R (Fm. Calumbi)	
			Santoniano				
			Coniaciano				
			Turoniano				
			Cenomaniano				
		Gálico	Albiano				
				R (Fm. Paracuru)	G (Fm. Muribeca/Mb. Iburá)	G (Fm. Muribeca/Mb. Iburá)	
			Aptiano	G (Fm. Mundaú)	R (Fm. Muribeca/Mb. Carmópolis)	R (Fm. Muribeca/Mb. Carmópolis)	R (Fm. Taipus-Mirim/Mb. Itacaré)
			Barremiano			R (Fm. Coqueiro Seco)	R (Fm. Rio de Contas/Mb. Mutá)
		Eo					
			Hauteriviano		G (Fm. Barra de Itiúba)	R (Fm. Barra de Itiúba) G (Fm. Barra de Itiúba)	G (Fm. Rio de Contas/Mb. Ilhéus)
						R (Fm. Penedo)	
			Valanginiano				G (Fm. Morro do Barro/Mb. Jiribatuba)
							R (Fm. Morro do Barro)
			Berriasiano				
	Jurássico	Neo				R (Fm. Serraria)	R (Fm. Sergi)
							R (Fm. Aliança)
Pré-Cambriano					R (Rochas graníticas fraturadas)	R (Rc metamórficas fraturadas)	

● Rochas ígneas e metamórficas ● Folhelho lacustre ● Folhelho marinho ● Conglomerado transicional ● Arenito continental ● Arenito transicional ● Arenito marinho

(Fonte: LANA, 1998; MILANI; ARAÚJO, 2003; PESSOA NETO et al., 2007; CAMPOS NETO et al., 2007; CAIXETA et al., 2007; SCOTCHMAN; CHIOSSI, 2009; MME/EPE, 2012; ANP, 2015a, b, c).

Tabela 4 Bacias da margem continental (Espírito Santo, Campos e Santos) produtoras de petróleo em 2014: SPP – sistema petrolífero principal; PCO – principal campo produtor de óleo; PCG – principal campo produtor de gás; G – rochas geradoras; R – rochas reservatórios. Para a formação geológica sublinhada é apresentado o intervalo de tempo da rocha geradora ou reservatório. Para a formação geológica não sublinhada é apresentado o intervalo de tempo total abrangido pela formação.

Tempo geológico				Bacias da margem passiva					
Era	Período	Época	Idade	Espírito Santo		Campos		Santos	
				SPP: Cricaré-Mucuri		SPP: Lagoa Feia-Carapebus		SPP: Guaratiba-Guarujá	
				PCO: Golfinho		PCO: Roncador		PCO: Lula	
				PCG: Peroá		PCG: Roncador		PCG: Lula	
Cenozóico	Neógeno	Mioceno		<u>R (Fm. Urucutuca)</u>		<u>R (Fm. Ubatuba)</u> <u>R (Fm. Carapebus)</u>		<u>R (Fm. Marambaia)</u>	
		Oligoceno							
	Paleógeno	Eoceno							
		Paleoceno							
Mesozóico	Cretáceo	Neo	Maastrichtiano	<u>R (Fm. São Mateus)</u>		<u>R (Fm. Quissamã)</u>		<u>R (Fm. Santos)</u>	
			Campaniano						
			Santoniano						
			Coniaciano						
			Turoniano						
			Cenomaniano						
		Gálico	Albiano	G (Fm. Regência)		R (Fm. Namorado)		R (Fm. Juréia)	
								R (Fm. Guarujá)	
				Fm. Mariricu/Mb. Itaúnas		Fm. Retiro		Fm. Ariri	
			Aptiano	R (Fm. Mariricu/Mb. Mucuri)		R (Fm. Itabapoana)	R (Fm. Gargaú)	R (Fm. Macabu)	R (Gr. Guaratiba/Fm. Barra Velha)
						R (Fm. Itabapoana)	G (Gr. Lagoa Feia / Fm. Coqueiros)	R (Gr. Lagoa Feia / Fm. Coqueiros)	G (Gr. Guaratiba/Fm. Itapema)
						G (Gr. Lagoa Feia / Fm. Atafona)		G (Gr. Guaratiba/Fm. Itapema)	
			Barremiano	<u>G (Fm. Cricaré)</u>				G (Gr. Guaratiba/Fm. Piçarras)	
			Hauteriviano			R (Fm. Cabiúnas – basalto fraturado e vesiculado)		R (Fm. Camboriú – basalto fraturado)	
			Valanginiano						
			Berriasiano						

- Basalto
 ● Folhelho lacustre
 ● Folhelho marinho
 ● Arenito continental
 ● Arenito transicional
● Arenito marinho
● Rocha carbonática lacustre
● Rocha carbonática transicional
● Rocha carbonática marinha
● Evaporito

(Fonte: DIAS et al., 1990; MILANI; ARAÚJO, 2003; FRANÇA et al., 2007; WINTER et al., 2007; CHANG et al., 2008; MME/EPE, 2012; ANP, 2015a, b, c).

CAMPOS PRODUTORES

A identificação do sistema petrolífero permite a delimitação de campos produtores de óleo e gás natural. Tanto no ambiente marinho quanto no continente, a produção de óleo e/ou gás natural é realizada a partir de campos petrolíferos, que são áreas delimitadas no interior das bacias sedimentares. A delimitação do campo petrolífero corresponde à área economicamente viável para produção de óleo ou gás com a tecnologia disponível.

Nas bacias sedimentares brasileiras, a produção de óleo e gás natural ocorre em campos situados principalmente na região marinha (*offshore*) e secundariamente no continente (*onshore*) (ANP, 2014b).

Os principais campos produtores de petróleo encontram-se na Bacia de Campos, em área oceânica vizinha ao Estado do Rio de Janeiro, o que tem garantido a esse Estado o posto de maior produtor brasileiro de hidrocarbonetos. Nessa bacia, os campos de Roncador, Marlim Sul, Marlim e Lula responderam por 38,4% da produção nacional em 2014 (ANP, 2014b).

Já a produção de gás natural em 2014 contou com campos produtores situados em uma diversidade maior de bacias sedimentares e, assim, incluindo um número maior de Estados da federação. Foram os principais produtores, respondendo por 35,9% da produção nacional, o campo Lula na Bacia de Campos, o campo Mexilhão na Bacia de Santos, o campo Leste do Urucu na Bacia do Solimões e o campo Manati na Bacia de Camamu (ANP, 2014c).

Assim, a produção nacional de petróleo tem mantido uma tendência de crescimento no período de 2000 a 2014, alimentada essencialmente pelo Estado do Rio de Janeiro e, em seguida, pelos Estados do Espírito Santo, Rio Grande do Norte, Bahia, Sergipe, Amazonas, Ceará, São Paulo e Alagoas (ANP, 2014b).

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2015d) a produção de petróleo no Brasil em agosto de 2015 foi de 2,547 milhões de barris/dia (bbl/d) e a produção de gás natural foi de 99,2 milhões de metros cúbicos/dia, num total de 3,171 milhões de barris de óleo equivalente/dia. A participação do petróleo extraído das rochas reservatórios do pré-sal é crescente na produção nacional (Figura 4). Em julho de 2015 o pré-sal respondeu por 33,6% da produção nacional, com 1,064 milhão de barris/dia de óleo equivalente, sendo 859,8 mil barris/dia de petróleo e 32,5 milhões de metros cúbicos/dia de gás natural, provenientes de 54 poços nos campos de Lula, Sapinhoá e Atapu na Bacia de Santos, Jubarte, Baleia Azul, Barracuda/Caratinga, Marlim Leste, Baleia

Franca, Marlim Voador, Pampo/Trilha/Linguado/Badejo e Pirambu na Bacia de Campos. Em agosto de 2015 a produção no campo de Lula (368 Mbbl/d) superou a de Roncador (363 Mbbl/d), até então o maior produtor.

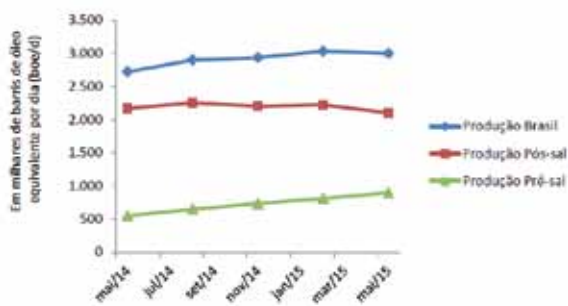


Figura 4 Evolução da produção nacional de petróleo (Fonte: ANP, 2015b).

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Projeto Temático, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Técnicas Analíticas Aplicadas à Exploração de Petróleo e Gás, processo #2008/5786-70), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (processos #307871/2010-0 e #302962/2010-7), e do Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo. Esta é a contribuição de número 9 do Núcleo de Apoio à Pesquisa “Geodinâmica de Bacias Sedimentares e implicações para o potencial exploratório - GEO-SEDEX”, financiado pela Universidade de São Paulo.

REFERÊNCIAS

- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis/ Banco de Dados de Exploração e Produção. 2014a. *Produção de Petróleo e Gás Natural por Campo* - 2014. Disponível em: <<http://www.bdep.gov.br/?id=441>>. Acesso em 27 de julho de 2015.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis/ Banco de Dados de Exploração e Produção. 2014b. *Produção de Petróleo – 2000 a 2014*. (<http://www.bdep.gov.br/?id=574>). Acesso em 27 de julho de 2015.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis/ Banco de Dados de Exploração e Produção. 2014c. *Produção de Gás Natural – 2000 a 2014*. Disponível em: <<http://www.bdep.gov.br/?id=574>>. Acesso em 27 de julho de 2015.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis/ Superintendência de Dados Técnicos/Superintendência de Tecnologia da Informação/Banco de Dados de Exploração e Produção. 2015a. *Produção de Petróleo, Gás Natural e Água por Campo*. Fevereiro 2015. Disponível em: <<http://www.bdep.gov.br/?id=441>>. Acesso em 27 de julho de 2015.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis/Superintendência de Desenvolvimento e Produção. 2015b. *Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural*, n. 57, p. 26. Maio 2015. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=76362&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&1438013544349>>. Acesso em 27 de julho de 2015.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis/Superintendência de Desenvolvimento e Produção. 2015c. *Campos na etapa de produção da Fase de Produção – Julho 2015*. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=60591&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&1438013631775>>. Acesso em 27 de julho de 2015.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis/Superintendência de Desenvolvimento e Produção. 2015d. *Notas à imprensa*. Novembro 2015. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=77835&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&1443729979899>>. Acesso em 01 de outubro de 2015.
- BARBASSA, A.G. *Fato Relevante, Análise da área de Tupi*. Petrobrás. 2007. Disponível em: <<http://siteempresas.bovespa.com.br/consbov/ArquivosExibe.asp?site=&protocolo=140478>>. Acesso em 06 de setembro de 2015.
- BERTANI, R.T.; COSTA, I.G.; MATOS, R.M.D. Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e hábitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: RAJA GABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J. *Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, Petróleo Brasileiro S.A., p. 291-310. 1990.
- CAIXETA, J.M.; MILHOMEM, P.S.; WITZKE, R.E.; DUPUY, I.S.S.; GONTIJO, G.A. Bacia de Camamu. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v.15, p. 455-461. 2007.
- CAMPOS NETO, O.P.A.; LIMA, W.S.; CRUZ, F.E.G. 2007. Bacia Sergipe-Alagoas. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v.15, p. 405-415. 2007.
- CAPUTO, M.V.; SILVA, O.B. Sedimentação e tectônica da Bacia do Solimões. In: RAJA GABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J. (Eds.). *Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, Petróleo Brasileiro S.A., p. 169-193. 1990.
- CHANG, H.K.; KOWSMANM, R.O.; FIGUEIREDO, A.M.F. Novos conceitos sobre o desenvolvimento das bacias marginais do leste brasileiro. In: RAJA GABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J. (Eds.). *Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, Petróleo Brasileiro S.A., p. 269-289. 1990.
- CHANG, H.K.; ASSINE, M.L.; CORRÊA, F.S.; TINEN, J.T.; VIDAL, A.C.; KOIKE, L. Sistemas petrolíferos e modelos de acumulação de hidrocarbonetos na Bacia de Santos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38 (suplemento), p. 29-46. 2008.
- COSTA, I.P.; MILHOMEM, P.S.; BUENO, G.V.; LIMA E SILVA, H.S.R.; KOSIN, M.D. Sub-bacias Tucano Sul e Central. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v.15, p. 433-443. 2007.
- DIAS, J.L.; SCARTON, J.C.; GUARDADO, L.R.; ESTEVES, F.R.; CARMINATTI, M. Aspectos da evolução tectono-sedimentar e a ocorrência de hidrocarbonetos na Bacia de Campos. In: RAJA GABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J. (Eds.). *Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, Petróleo Brasileiro S.A., p. 333-360. 1990.
- DOROBOK, S.; PICCOLI, L.; COFFEY, B.; ADAMS, A. Carbonate rock-forming processes in the pre-salt “sag” successions of Campos Basin, offshore Brazil: evidence for seasonal, dominantly abiotic carbonate precipitation, substrate controls, and broader geologic implications. In: AAPG Hedberg Conference Microbial Carbonate Reservoir Characterization. Houston, AAPG. 2012.
- ESTRELLA, G.O.; AZEVEDO, R.L.M.; FORMIGLI FILHO, J.M. Pré-sal: conhecimento, estratégia e oportunidades. In: VELOSO, J.P.R. (Coord.). *Teatro mágico da cultura, crise global e oportunidades do Brasil*. Rio de Janeiro, José Olympio, p. 67-78. 2009.
- FRANÇA, R.L.; DEL REY, A.C.; TAGLIARI, C.V.; BRANDÃO, J.R.; FONTANELLI, P.R. Bacia do Espírito Santo. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v.15, p. 501-509. 2007.
- GAMBOA, L.A.P.; MACHADO, M.A.P.; SILVA, D.P.; FREITAS, J.T.R.; SILVA, S.R.P. Evaporitos estratificados no Atlântico Sul: interpretação sísmica e controle tectono-estratigráfico na Bacia de Santos. In: MOHRIAK, W.U.; SZATMARI, P. ANJOS, S.M.C. (Eds.). *Sal: geologia e tectônica*. São Paulo, Beca, p. 340-359. 2008.
- GÓES, A.M.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 8, p. 57-68. 1994.
- LANA, M.C. Bacia de Sergipe-Alagoas: uma hipótese de evolução tectono-sedimentar. In: RAJA GABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J. (Eds.). *Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, Petróleo Brasileiro S.A., p. 311-332. 1990.
- LEVORSEN, A.I. *Geology of Petroleum*. Tulsa, AAPG Foundation, 724 p. 2001.
- MAGNAVITA, L.P.; SZATMARI, P.; CUPERTINO, J.A.; DESTRO, N.; ROBERTS, D. The Recôncavo Basin. In: ROBERTS, D.G.; BALLY, A.W. (Eds.). *Regional Geology and tectonics: Phanerozoic Rift Systems and Sedimentary Basins*. Amsterdam, Elsevier. 2012.

-
- MAGOON, L.B.; DOW, W.G. The petroleum system. In: MAGOON, L.B.; DOW, W.G. (Eds.). *The petroleum system - from source to trap*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, Tulsa, v. 60, p. 3-24. 1994.
- MAGOON, L.B.; BEAUMONT, E.A. Petroleum Systems. In: BEAUMONT, E.A.; FORSTER, N.H. (Eds.). *Exploring for Oil and Gas Traps, Treatise of Petroleum Geology, Handbook of Petroleum Geology*. Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, p. 3.1-3.34. 1999.
- MILANI, E.J.; ARAÚJO, L.M. Recursos Minerais Energéticos: Petróleo. In: BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. (Eds.). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*. Brasília, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, p.541-576. 2003.
- MME/EPE - Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. *Zoneamento Nacional de Recursos de Óleo e Gás*, Atualização 2011. Brasília, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 437 p. 2012.
- MOREIRA, J.L.P.; MADEIRA, C.V.; GIL, J.A.; MACHADO, M.A.P. Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 15, p. 531-549. 2007.
- PEREIRA, E.; CARNEIRO, C.D.R.; BERGAMASCHI, S.; ALMEIDA, F.F.M. Evolução das sinéclises paleozoicas: províncias Solimões, Amazonas, Parnaíba e Paraná. In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; ALMEIDA, F.F.M.; BARTORELLI, A. (Eds.). *Geologia do Brasil*. São Paulo, Beca, p. 374-394. 2007.
- PEREIRA, M.J.; FEIJÓ, F.J. Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 8, p. 219-234. 1994.
- PESSOA NETO, O.C.; SOARES, U.M.; SILVA, J.G.F.; ROESNER, E.H.; FLORENCIO, C.P.; SOUZA, C.A.V. Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 15, p. 357-369. 2007.
- RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L.G.; TASSINARI, C.C.G. Pré-sal: geologia e exploração. *Revista USP*, v. 95, p. 33-42. 2012.
- SANTOS, C.F.; CUPERTINO, J.A.; BRAGA, J.A.E. Síntese sobre a geologia das bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá. In: RAJA GABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J. (Eds.). *Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, Petróleo Brasileiro S.A., p. 235-266. 1990.
- SCOTCHMAM, J.; CHIOSSI, D. Kilometre-Scale Uplift of the Early Cretaceous Rift Section, Camamu Basin, Offshore North-East Brazil. *AAPG Search and Discovery* Article 50183, 26 p. 2009.
- SILVA, O.B.; CAIXETA, J.M.; MILHOMEM, P.S.; KOSIN, M.D. Bacia do Recôncavo. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, p. 423-431. 2007.
- WANDERLEY FILHO, J.R.; EIRAS, J.F. Bacia do Solimões. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v.15, p. 217-225. 2007.
- WINTER, W.R.; JAHNERT, R.J.; FRANÇA, A.B. Bacia de Campos. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 15, p. 511-529. 2007.

O pré-sal e a geopolítica e hegemonia do petróleo face às mudanças climáticas e à transição energética

Ildo Luís Sauer

Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo

RESUMO

A apropriação social da energia cumpriu uma função essencial nas revoluções sociais da Humanidade: a revolução agrícola, mediante a transição de caçadores e coletores para agricultores sedentários, se fez mediante a domesticação da fotossíntese; a revolução industrial propiciou a intensificação da produtividade social do trabalho mediante a utilização dos recursos fósseis, de estoque, inicialmente o carvão, seguido do petróleo em motores de combustão interna e dos sistemas elétricos. A segunda fase da revolução industrial, que, substancialmente, moldou a estrutura urbano-industrial atualmente hegemônica, produziu também uma dependência do petróleo como fonte de energia, especialmente para mobilidade de cargas e pessoas. Este capítulo examina as condições e os processos que conduziram à hegemonia do petróleo face às demais alternativas. São examinadas também as consequências vinculadas a este desdobramento. No campo ambiental, são analisadas as dificuldades da transição para fontes renováveis, requeridas para mitigação dos efeitos decorrentes da emissão de gases de efeito estufa. No campo geopolítico e econômico são revisadas as contradições e interesses antagônicos em torno da disputa pelo controle do acesso aos recursos petrolíferos e pela apropriação da renda petroleira. Neste contexto, o capítulo foca os desafios e oportunidades associados à descoberta dos recursos do pré-sal brasileiro concluindo pela necessidade de um exame crítico sobre a atual estratégia nacional, no que diz respeito à identificação, caracterização e quantificação das reservas e à definição do ritmo de produção e exportação em coordenação com a OPEP e demais países exportadores, o que implica na revisão do regime regulatório vigente, com o objetivo de garantir geração de recursos a serem investidos, de acordo com um plano nacional de desenvolvimento econômico e social. Nem o modelo de concessão, nem o de partilha se ajustam para garantir a hegemonia do interesse público, configurando-se a contratação direta da Petrobras, autorizada pela lei vigente, como a mais adequada por permitir a flexibilidade semelhante à dos contratos de serviços, onde prevalece o comando do Estado sobre a produção e exportação do petróleo.

Palavras-chave Pré-sal. Estratégia nacional. Transição energética. Mudanças climáticas.

INTRODUÇÃO

Recentemente os países integrantes do G7 (Grupo dos sete países mais desenvolvidos) anunciaram o objetivo de abolir o uso de combustíveis fósseis no decorrer deste século, como resposta às ameaças das mudanças climáticas. O Brasil, com a descoberta dos recursos do Pré-Sal, tornou-se um ator potencialmente relevante como produtor e exportador de petróleo, e aposta na geração de excedente econômico associado ao desenvolvimento e extração do petróleo para investimentos sociais capazes resgatar as graves assimetrias sociais que acometem o Povo brasileiro. Dadas as suas especificidades, o petróleo tem sido fonte de disputas pela apropriação de excedente econômico oriundo da diferença entre preço de mercado e custo de produção. Por isso uma das questões fundamentais está vinculada aos mecanismos de formação do preço do petróleo, cuja compreensão tem-se revelada precária e revestida de especulações destituídas de fundamentação teórica ou revestidas de simplificações inspiradas no senso comum. O preço e sua manutenção tem impacto decisivo sobre a geração e apropriação de excedente econômico, objeto de disputa dentro do sistema capitalista, como motor do processo de acumulação, essencial ao modo de produção capitalista. O preço do petróleo também funciona como balizador que sinaliza as possibilidades de novas fontes, especialmente as renováveis, menos impactantes sobre as mudanças climáticas, com efeito positivo sobre a descentralização da produção e a ampliação do acesso emprego, virem a ocupar espaço mais relevante, ou mesmo predominante, como requer o objetivo anunciado de eliminar o uso de combustíveis fósseis. No começo do século XX, a mobilidade

individual baseada em veículos elétricos disputou o espaço *pari-passu* com os veículos movidos a motor de combustão interna, e, para estes, o etanol disputou o espaço com os derivados do petróleo que acabaram por prevalecer. Nesta contenda, parâmetros relevantes foram os custos e preços relativos de combustíveis e dos veículos. Uma das respostas aos choques dos preços do petróleo da década de 1970 e de 2000 foi a tentativa de reintroduzir os veículos elétricos.

O presente trabalho revisa as condições que conduziram o petróleo a posição hegemônica como fonte de energia do modo de produção da atual estrutura urbano-industrial, e examina as possibilidades e consequências de sua eventual substituição em escala global e seus reflexos para o País. Busca recuperar o referencial teórico sobre a apropriação de recursos naturais no processo produtivo e na geração de riqueza, tanto do ponto vista da economia política quanto da análise baseada nos balanços líquidos para mobilização das fontes de energia, isto é, do retorno em energia por energia investida para obtê-la, conhecida pela sigla EROI (Energy Return on Energy Investment). Finalmente, a luz deste enfoque, o quadro mundial atual relativo ao papel do petróleo e os conflitos de interesse estratégicos e geopolíticos são examinados, inclusive para oferecer parâmetros de reflexão para o debate sobre o petróleo no Brasil.

A GÊNESE DA HEGEMONIA DO PETRÓLEO

A apropriação social da energia desempenhou um papel essencial na garantia do modo de produção de todas as formações sociais da Humanidade, estando

subjacente às duas revoluções sociais: na Revolução Agrícola, a energia do sol capturada via fotossíntese foi “domesticada” pela seleção de plantas e animais, com os caçadores e coletores nômades dando lugar a agricultores sedentários; na Revolução industrial, mediante o ataque aos estoques acumulados em escala geológica: primeiro, o carvão para vapor de indústrias, trens e navios, e em seguida, óleo como combustível para motores de combustão interna que aumentaram a mobilidade flexível, acompanhados pelos sistemas de energia elétrica para apoiar uma nova estrutura urbano-industrial.

A História da humanidade guarda profundos vínculos com o processo de apropriação social da energia. O *homo sapiens* tem cerca de 200 mil anos e na maior parte desse tempo viveu caçando e coletando aquilo que a fotossíntese, a energia do sol apropriada pela natureza, oferecia. O desenvolvimento da agricultura foi uma revolução que, há cerca de 12 mil anos, passou a controlar a fotossíntese, auxiliada pelo ciclo hidrológico, também movido pelo sol. Foram selecionados plantas e animais que se alimentavam de plantas para proporcionar a alimentação, transporte e trabalho humanos. Surgiram as sociedades agrárias que em uns poucos milênios se espalharam por todos os continentes. Mas eram sociedades bem limitadas, que utilizavam amplamente o trabalho escravo. Dependiam da natureza e do trabalho físico humano e de alguns animais para garantir a produção dos meios necessários à sua existência.

Uma nova e profunda transformação começou a ocorrer no final do século XVII com a Revolução Inglesa e consolidou-se por volta do final do século XVIII, com as Revoluções Americana e Francesa. Sua base energética foi o aproveitamento do carvão, com sua queima para o aquecimento de água e a produção de vapor para acionar êmbolos e mover máquinas - teares, trens, navios. Essa nova base técnica foi essencial para o desenvolvimento do modo de produção capitalista, que se aproveitou de um novo regime de trabalho, com mão de obra assalariada. O trabalhador, em geral camponês expulso do campo que não tinha mais os meios de produção e passou a trabalhar com os meios de produção do patrão, passou a ter uma produtividade muito maior. Porque ao valor novo que agrega às mercadorias com seu trabalho vivo, soma-se - num tempo agora muito mais curto, em função da velocidade das máquinas - o valor do trabalho morto, do trabalho mecânico e desgaste dessas máquinas, equipamentos e edificações de propriedade do dono da fábrica. Finalmente, essa nova base técnica e o próprio sistema capitalista passaram por um aprofundamento, uma es-

pécie de segunda fase da Revolução, no final do século XIX, quando surgiram as telecomunicações, o gerador, o motor e transmissão elétricos e, principalmente, o motor de combustão interna à base de gasolina e de óleo diesel, que substituiu os cavalos e as carruagens e deu origem à indústria automobilística, flexibilizando a mobilidade individual e a circulação de mercadorias, até então sujeitas à rigidez dos trens e navios movidos pelo vapor produzido com a combustão do carvão.

Do ponto de vista social, é a fase em que o capitalismo se monopolizou, formaram-se os cartéis, associados ao sistema financeiro. E ocorreu uma intensificação extraordinária da produção de bens e mercadorias, e sua circulação e consumo numa escala e velocidade sem precedentes, graças ao petróleo. Também ocorreu a intensificação da mobilidade das pessoas, em termos de velocidade e distância. A Tabela 1 sintetiza os principais fatos e eventos relevantes para a trajetória de consolidação de hegemonia do petróleo como fonte energética.

Tabela 1 Fatos, eventos e marcos na consolidação da hegemonia do petróleo.

1859	Coronel Edwin Drake descobre petróleo em Titusville, Pennsylvania
1870	A gasolina já entrava na competição que se estabelecia entre carvão, querosene e óleos vegetais e animais como combustíveis para produzir luz artificial
1882	Constituída a Standard Oil Trust
1908	Descoberto petróleo na Pérsia; cria-se a Anglo Persian (posteriormente, BP)
Até 1910	A gasolina era obtida pela destilação do petróleo bruto
1911	A divisão da Standard Oil Trust é ordenada pela Suprema Corte
1915	I guerra. Na Alemanha milhares de motores foram rapidamente modificados e adaptados para funcionar com álcool
1917	União Soviética nacionaliza o petróleo
1922	Criação da YPF Argentina (Mosconi); embate com Standard Oil e Royal Dutch Shell
1928	Tratado de Achnacarry entre as “sete irmãs”
1935	O consumo de álcool na Europa alcançou os 550 milhões de litros
1937	Bélgica, outorgada patente a G. Chavanne : descrito o uso de ésteres etílicos de óleo de palma como diesel combustível.
1938	México nacionaliza companhias estrangeiras de petróleo

1942	Craqueamento Catalítico Fracionado (FCC), conduzido pela Standard Oil Company de New Jersey.
1950	Aramco - Arábia Saudita
1951	Nacionalizada a Anglo Iranian Oil Company
1956	Descoberto petróleo na Argélia e Nigéria
1960	OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) é fundada em Bagdá
1972	Iraque nacionaliza a Iraq Petroleum Concession
1973	Irã nacionaliza a propriedade do petróleo

(Fonte: Elaborada pelo autor).

O petróleo tornou-se a principal fonte de energia dessa fase, do modo de vida urbano-industrial, que persiste até agora. É a mais flexível, a que mais facilita a produção e o consumo. Permite mover máquinas sem depender de redes estruturadas e caras. A sua apropriação social permitiu uma intensificação extraordinária da produtividade do trabalho. Daí seu enorme valor. O valor excedente que sua introdução no processo social de produção e de circulação, é enorme quando comparado com o custo de produzi-lo.

A DISPUTA GEOPOLÍTICA E ESTRATÉGICA PELO CONTROLE DOS RECURSOS E PELO EXCEDENTE ECONÔMICO OU RENDA PETROLEIRA

Pelo pacto celebrado em Achnacarry, Castelo na Escócia, em 17 de setembro de 1928, as sete grandes empresas de petróleo do mundo se associaram em forma de cartel para definir o controle entre elas, tanto volumétrica quanto geograficamente, do mercado do petróleo, da produção à distribuição em todo mundo. Estas sete empresas, que dominaram o mercado entre 1911 e 1960, foram conhecidas como as Sete Irmãs: 1. Standard Oil of New Jersey (Esso), formada pela fusão com a Mobil ExxonMobil (EUA); 2. Royal Dutch Shell (anglo-holandesa); 3. Anglo-Iranian Oil Company (AIOC), mais tarde conhecida como British Petroleum (BP) (Reino Unido); 4. Standard Oil de Nova York, mais tarde conhecido como Mobil, fazendo parte hoje da ExxonMobil (EUA). 5. Standard Oil da Califórnia, então conhecido como Chevron, mais tarde se fundiu com a Texaco para formar ChevronTexaco, com nome atual de Chevron Corporation (EUA); 6. Gulfoil Corporation, que em 1985 foi adquirida pela Chevron quase completamente, enquanto a outra parte das ações foi para a BP (EUA); 7. Texaco, que se fundiu com a Chevron em 2001, fusão conhecida por algum tempo

como ChevronTexaco, e em 2005, novamente Chevron, sendo Texaco agora uma marca registrada da Chevron Corporation (EUA). A consolidação da hegemonia das Sete Irmãs foi processo geopolítico e estratégico, com o apoio dos Governos de origem das empresas, alicerçado no exercício de enorme influência sobre os Governos dos Países onde operavam. A confluência de interesses entre empresas petrolíferas e Governos dos Países de origem estava ancorada na geração e apropriação de excedente econômico, que as companhias integradas verticalmente poderiam alocar em qualquer das etapas: na exploração e produção ou no refino e logística de distribuição e comercialização. Para os países e elites consumidores ficava o benefício do incremento da produtividade e aumento do bem estar decorrentes do acesso aos derivados do petróleo. Este fato concorreu para aprofundar o que passou a ser reconhecido como a dialética da dependência entre os países centrais e os da periferia do sistema econômico mundial, acentuando o contraste entre riqueza e pobreza.

O processo de descolonização e independência de países da África e Ásia, tendo como fundo a Primeira Guerra Mundial, a crise de 1929 e a Segunda Guerra Mundial, foi impulsionado pela decadência da Europa e pela Carta da ONU, que, em 1945, reconheceu o direito dos povos colonizados à autodeterminação, e desencadeou também o sentimento nacionalista, reforçado pela Conferência de Bandung (1955), Indonésia. Muitos países detentores de recursos petrolíferos passaram a reivindicar e buscar maior participação na riqueza gerada pela produção e uso do petróleo. Neste contexto, em 1960 é criada a Organização dos Países Exportadores de Petróleo e são reforçados os processos de nacionalização dos recursos e a criação de empresas nacionais de petróleo, conforme registra a Tabela 1.

A Indústria do Petróleo hoje comporta companhias, ditas “internacionais” ou “independentes” (IOCs – International Oil Companies), de capital privado e cotadas em bolsa, e empresas com controle pelos Estados Nacionais, de capital total ou maioritariamente público, ditas “nacionais” (NOCs – National Oil Companies). As NOCs produzem cerca de 75% do petróleo global e detêm cerca 90% das reservas provadas. Arábia Saudita, Argélia, Angola, Emirados Árabes, Equador, Irã, Iraque, Kuwait, Líbia, Nigéria, Qatar, Venezuela **são países membros da OPEP, cuja** indústria petrolífera está a cargo NOCs, sendo as operações conduzidas exclusivamente pelas mesmas ou em associação com outras companhias. Fora da OPEP, Statoil na Noruega, Petrobras no Brasil, Gazprom e Rosneft na Rússia, Sinopec, CNPC e CNOOC na China, ONGC na Índia, Petronas na Malásia, são NOCs.

A Indústria compreende atividades coordenadas, desde a exploração e desenvolvimento de recursos geológicos de petróleo e/ou gás natural, extração, transporte, refino, armazenamento, logística e até distribuição para consumo final de combustíveis e produtos químicos, constituindo as atividades de *upstream*, *midstream* e *downstream*. Os diversos segmentos estão a cargo de diferentes operadores, independentes ou integradas verticalmente. Das empresas que exploram o segmento do refino, duas dezenas detêm metade da capacidade instalada mundial, ficando 25% a cargo de ExxonMobil, Shell, Sinopec, BP, Valero e PDVSA. Na Ásia-Pacífico a Sinopec, CNPC, ExxonMobil, Nippon Oil & Energy, Shell, IndianOil, ReliancePetroleum detêm 14 Mb/d; na América do Norte a Valero, Phillips, ExxonMobil, BP, Marathon, Shell, somam 10 Mb/d; na Europa a Total, Shell, ExxonMobil, AgiPetro, BP, Repsol somam 8 Mb/d. A principal diferença entre os segmentos é que *upstream* (exploração e produção) tem estrutura de acesso restrita, pelo controle sobre os recursos, ensejando a extração de rendas diferenciais e absolutas, o que o torna extremamente atrativo pela rentabilidade, conquanto o *midstream* e *downstream* operam em ambientes competitivos, auferindo lucros médios, compatíveis com os demais setores da Economia.

Tanto as NOCs quanto as IOCs são instrumentos de política nacional e internacional pela sua presença, abrangência de atividades e volume de negócios. As NOCs geram, em alguns países, a maior parte do PIB e são responsáveis pela balança comercial e receita no orçamento do Estado. Neste caso, evidente na Arábia Saudita e demais países da OPEP, política empresarial e governamental se confundem. Os grandes complexos petrolíferos exercem enorme influência econômica e financeira.

Quando a OPEP foi fundada em 1960, o controle de reservas de petróleo foi a seguinte: 85% por companhias internacionais de petróleo (IOCs); 14% pela URSS; e apenas 1% as empresas petrolíferas nacionais (NOCs). Esse baixo nível de controle sobre os recursos podem ser uma das razões pelas quais os choques petrolíferos de 1973 e 1979 não conseguiram sustentar preços e gerar excedente estável para esses países. Em 2010, a situação do controle de reservas foi substancialmente revertida: apenas 6% eram das IOCs; 6% dos russos e 88% com NOCs. Em razão do grau de controle de reservas, segundo o Financial Times (HOYOS, 2007), atualmente as novas “sete irmãs” são todas estatais: Saudi Aramco; (Arábia Saudita), Gazprom (Rússia), CNPC (China), NIOC (Irã), PDVSA (Venezuela), Petrobras (Brasil), Petronas (Malásia).

Essa nova condição, juntamente com a coesão interna dos membros da OPEP em conjunto com a Rússia, pode muito bem ter desempenhado um papel relevante para a escalada do preço do petróleo em 2005 e sustentada até 2014. A Figura 1 apresenta a situação atual das reservas provadas de petróleo.

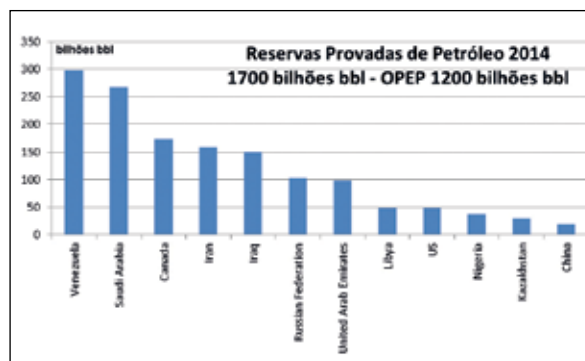


Figura 1 Reservas provadas de Petróleo 2014 (Fonte: BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2015).

Apesar da crise que vem afetando a economia mundial o volume de produção mundial cresceu quase que regularmente, e a contribuição da OPEP manteve-se quase estável, e o setor de refino registrou incremento na capacidade instalada, consolidando a tendência de leve crescimento do consumo global, apesar da queda em 2009, associada ao choque de 2008-09.

A Figura 2 apresenta o quadro atual e projetado da produção e demanda de petróleo até 2030. A produção mundial de petróleo em 2014 foi de 89 Mbbl/dia, dos quais 53 Mbbl/dia foram provenientes dos países exportadores não pertencentes à OPEP. Os campos existentes, atualmente em produção, em razão de seu declínio natural da capacidade de produção situado entre 5 e 6% ao ano, estarão produzindo, em 2030, 31 milhões de barris por dia. Ao mesmo tempo, estima-se que a demanda global por petróleo será, em 2030, de 106 milhões de barris por dia. A diferença (aproximadamente 75 milhões) entre a produção esperada com base nos campos atuais e a elevada demanda deverá ser suprida por: incorporação de novas descobertas; petróleo não convencional (*shale oil* ou *tight oil*); fontes alternativas de energia (como os biocombustíveis); maior eficiência energética. A redução da demanda por derivados de petróleo também poderia resultar em decorrência da mudança no paradigma da mobilidade, especialmente a individual, pela penetração da mobilidade elétrica, cujo progresso técnico tem sido beneficiado pelo desenvolvimento das baterias de íons de lítio, reduzindo o peso e incrementando a autonomia dos veículos.

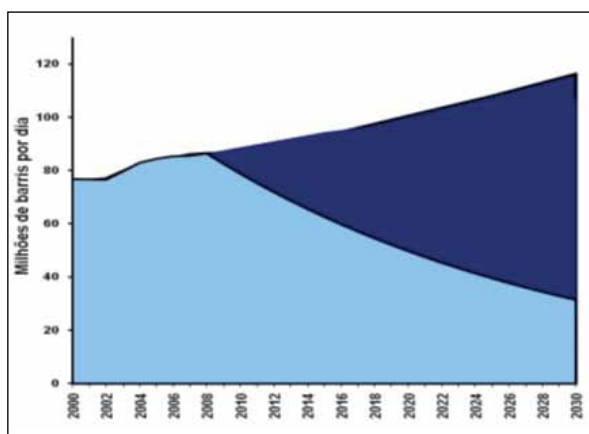


Figura 2 Quadro atual e projeção da produção e demanda de petróleo até 2030. A linha inferior é a produção de campos atuais e a linha superior será a produção de novas descobertas e petróleo não convencional (Fonte: IEA, 2008; EIA, 2009).

Entre os produtores de petróleo (Figura 3) estão os EUA, 12,3% (que em 2015 assumiram a posição de maior produtor mundial), rivalizando com a Arábia Saudita, 12,9%, a Rússia, 12,7%, seguidos por Canadá, 5%, China, 5%, Emirados Árabes, 4%, Irã, 4%, Iraque, 3,8%, Kuwait, 3,6%, Venezuela, 3,3%, México, 3,2%, Brasil, 2,9% e Nigéria, 2,7%. Da produção global diária, cerca de 92 Mb/d, 65 Mb/d são de petróleo convencional, que há três décadas assegurava essencialmente a totalidade do consumo mundial. Agora cerca de 27 Mb/d do petróleo provém de recursos não convencionais – extrapesados, *offshore* profundo e ultra profundo, polar e, recentemente desde 2005, também *shale oil* e *tight oil*, além de biocombustíveis. O incremento da produção de petróleos não convencionais e, em menor escala, os biocombustíveis têm suprido o declínio progressivo da produção convencional.

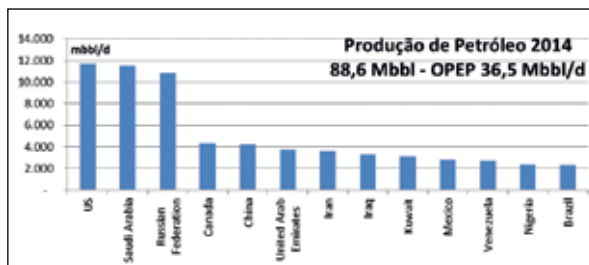


Figura 3 Produção de petróleo por países, 2014 (Fonte: BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2015).

Dez países consomem (Figura 4) cerca de 60% dos derivados de petróleo e bicomcombustíveis líquidos (etanol e biodiesel), destacando-se os EUA com 20%, China 12,4%, Japão 4,7%, Índia 4,3%, Rússia, 3,5%, Brasil, 3,4%, Arábia Saudita, 3,4% Coréia do Sul, 2,6% Canadá, 2,4% e México, 2%. Os países da OECD produziram 22 Mb/d e consumiram 45 Mb/d, quase metade do consumo mundial.

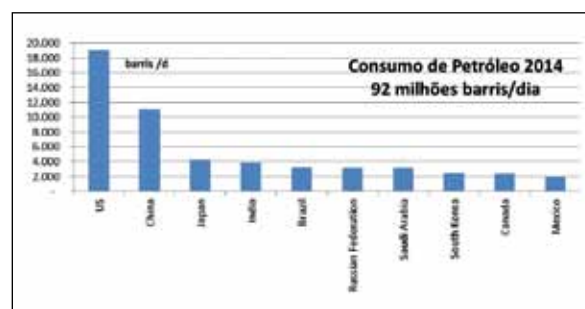


Figura 4 Consumo de petróleo por países, 2014 (Fonte: BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2015).

Apesar da produção por muitos países, poucos são exportadores com peso no comércio mundial, o que os coloca em posição de relevância em termos de controle potencial sobre fluxos e assim dos preços. Poucos países são autossuficientes, e a maioria é importadora. Em 2014, a OPEP e a Rússia controlavam a maior parte das exportações de petróleo. Da produção mundial de petróleo e biocombustíveis, de 92 Mb/d (milhões de barris por dia), 35,3 Mb/d são produzidos e consumidos domesticamente nos países produtores, exportadores ou não. As transações internacionais atingem 37,7 Mb/d de petróleo bruto e 19,0 Mb/d de derivados. Os países da OPEP produziram, em 2014, 36,6 Mb/d, consumindo internamente cerca de 7,6 Mb/d e exportando cerca de 29,1Mb/d. Os maiores exportadores de petróleo bruto são a Arábia Saudita (7,5 Mb/d), Rússia, Emirados, Iraque, Nigéria, Kuwait, Canadá, Venezuela, que conjuntamente asseguram dois terços do mercado internacional. Destes, somente Rússia e Canada não integram a OPEP. Os maiores importadores são a Europa (9,3 Mb/d), China, EUA, Índia e Japão, que conjuntamente absorvem três quartos do mercado. Desde 1995 a produção global tem mantido tendência ascendente com incremento anual médio de quase 1 Mb/d (1 milhão de barris por dia). Desde 2005 a OPEP manteve um nível de produção estável em torno de 30 Mb/d, limite de produção convencional pela Organização. Na Rússia, demais países da Eurásia, Ásia Oriental Pacífico e América Latina o nível de

produção se manteve estável. Mas a produção subiu substancialmente na América do Norte (cerca de 5 Mb/d), cujo maior incremento está associado ao *boom* do petróleo não convencional, o chamado *shale oil*, e caiu acentuadamente na Europa (cerca de 3 Mb/d).

Conforme demonstra a Figura 5, depois do fracasso dos choques de 1973 e 1979, o preço do petróleo se estabilizou e iniciou uma escalada em 2000 que depois acelerou até a oscilação em 2008-09, quando caiu de 140 para \$ 40/b (dólares por barril); retomou o movimento ascendente até um pouco acima de 100, aí oscilou de 2011 até meados de 2014, quando iniciou uma nova queda gradual até ao início de 2015, passando então a oscilar entre 50 e 60 \$/b.

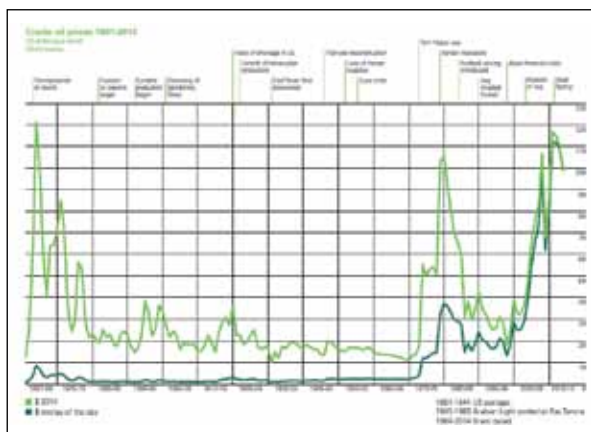


Figura 5 Evolução dos preços do petróleo, em US\$ correntes e de 2014 (Fonte: BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2015).

A formação oscilação dos preços do petróleo constitui um objeto de análise fundamental pela sua importância para o sistema econômico mundial e pelas suas repercussões. Hoje, o petróleo se produz a um custo direto, incluindo somente capital e trabalho, de 1 a 15 dólares o barril equivalente. E o seu valor no mercado oscilou nos últimos anos entre 50 e 150 dólares o barril. Um excedente enorme, de mais de 40 dólares por barril. Surge daí a renda, disputada no campo econômico, político e ideológico pelas grandes empresas e Estados. O sistema econômico mundial consome cerca de 32 bilhões de barris anuais (BP, 2015), permitindo a geração de um excedente econômico da ordem de 1,5 a 3 trilhões de dólares anuais, que é apropriado sob a forma de lucros, dividendos, impostos e transferências, alimentando o processo de acumulação. A redução dos preços do petróleo implica na transferência desse excedente aos consumidores. Como parâmetro de comparação, o excedente econômico mundial pode

ser estimado em cerca de 8 trilhões de dólares, aproximadamente 10% do valor bruto mundial produzido, da ordem de 80 trilhões de dólares.

A progressiva escalada dos preços do petróleo, entre 2000 e 2014, tem engendrado uma disputa estratégica e geopolítica entre os blocos com interesses antagônicos quanto ao preço do petróleo. Os discursos, de um lado OECD mais a China, sob a liderança dos EUA e de outro, a OPEP mais Rússia, deixam transparecer a disputa subjacente pelo excedente econômico. O primeiro grupo buscando maximizar a geração de excedente econômico através do controle do preço e da manutenção da hegemonia do petróleo, e o segundo grupo, buscando o acesso ao petróleo a preços menores de forma a apropriar os benefícios para os consumidores, incrementando a geração de riqueza e bem estar nestes países.

O documento do Governo dos EUA, “*Blueprint for a Secure Energy Future*” (THE WHITE HOUSE, 2011), divulgado em 31 de Março 2011, apresenta sete iniciativas: ampliar o desenvolvimento – que já está em curso há mais de 30 anos – do chamado *shale oil* e *shale gas* americano, que teve oportunidade de expansão, acompanhando a escalada dos preços do petróleo a partir de 2005; exportar esta iniciativa para o mundo inteiro, especialmente para a China, que tem os maiores recursos, para a América Latina e Europa; incentivar a produção de biocombustíveis no mundo inteiro, em parceria com o Brasil; ampliar a produção de petróleo nos EUA por meio da plataforma continental americana; ampliar as negociações com o México para que a parte mexicana do Golfo do México seja aberta, pois na parte americana há muita produção; cooperação dos EUA com o Brasil, negociada entre Obama e Rousseff, para promover o desenvolvimento e acelerar a produção dos recursos do pré-sal na plataforma continental brasileira como “interesse comum entre os dois países”; e, trabalhar pela redução do consumo para o uso de mais eficientes, como carros e equipamentos.

Coincidentemente, em iniciativa com sentido semelhante de fazer frente à OPEP, discutia-se na China uma proposta de criar uma organização de importadores de petróleo. A intenção subjacente ao “*Blueprint for a Secure Energy Future*” parece ser minar o equilíbrio entre oferta e demanda controlado pela OPEP, através da aceleração da oferta via produção em novas fronteiras e modalidades, fora do controle da OPEP, e assim buscar afetar a coesão interna da organização, de forma a desequilibrar as bases da sustentação do preço do petróleo. Atribui-se o fracasso das tentativas dos choques de 1973 e 1979 a um conjunto de fatores: o baixo controle sobre as reservas, então majoritaria-

mente sob controle das IOCs (quadro agora revertido); o elevado volume de petróleo oriundo da União Soviética, que dependia da sua exportação para gerar divisas necessárias à importação de componentes sensíveis e estratégicos; as exportações do México; o descumprimento e falseamento das cotas de exportação assignadas aos próprios integrantes da OPEP.

No contexto emergente no final de 2014, de queda dos preços em cerca de 50%, a expectativa era a da redução do teto da produção OPEP, de 30 Mb/d. Todavia, sob a liderança da Arábia Saudita, a decisão da OPEP em sua 166ª. Conferência, de Novembro de 2014, foi manter *status quo*, retendo o teto e continuando a produção no patamar de 29,1 Mb/d, sob o argumento de que era necessário “manter o atendimento da demanda”. O Ministro saudita do petróleo, Ali Naimi, (OPEC, 2015) expôs a posição do País afirmando que “esta política foi tentada nos anos 1980 e não teve sucesso”. Disse ainda que não reagiria de forma instintiva a flutuações de curto prazo, mantendo uma visão de longo prazo, aguardando pelo equilíbrio entre oferta e demanda. Sobre as teorias atribuindo o poder de colusão ou conspiração da OPEP, ele afirmou: “teorias abundam, mas estão todas erradas”, “a OPEP não está morta, nem está travando uma guerra contra o *shale oil* dos EUA”. Sintomaticamente, porém, afirmou que a “Arábia Saudita estava aberta ao estabelecimento de laços firmes com países produtores fora da OPEP”. Venezuela e Arábia Saudita promoveram reuniões recentes com a Rússia e México e o Ministro fez um apelo aos países produtores não membros da OPEP para contribuir para o equilíbrio do mercado, dizendo que Arábia não deveria subsidiar os produtores de custo elevado, e que “não faz sentido que os produtores mais eficientes devessem cortar produção, quando representam apenas 30% da produção.” Reafirmou que Arábia Saudita não agiria isoladamente, em que “em cooperação com vários países, tem moderado os níveis de produção para melhorar a situação do mercado. Mas agora a situação é diferente. Precisamos que todos os países com produção relevante cooperem”.

Não obstante o discurso do Ministro há interpretações de que a passividade da Arábia Saudita esteja vinculada a um conjunto de objetivos: enfraquecer as finanças de países com quem mantém certa rivalidade, como o Irã, apoiado pela Rússia; gerar um ambiente de incerteza para os investimentos em óleo não convencional e, de forma contundente, os biocombustíveis, outras fontes renováveis, e, também, para a emergente alternativa da mobilidade elétrica, concorrente para reduzir a demanda por petróleo.

DESAFIOS PARA UMA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

No começo do século XX o tipo de veículo, elétrico ou de motor de combustão, assim como o combustível, derivado de petróleo ou álcool, era uma questão em aberto. Em 1900 havia 2.370 automóveis em New York, Chicago e Boston: 1.170 a vapor; 800 elétricos; 400 a gasolina. Em 1908, foram lançados pela Ford o Modelo T e o Modelo A, ambos projetados para funcionar com álcool, gasolina ou com uma mistura de álcool e gasolina. Prosperava a retórica da esperança do equilíbrio rural-urbano, alicerçado no desenvolvimento do álcool combustível, tanto nos Estados Unidos quanto na Alemanha, que, já em 1899, produzia tratores agrícolas a álcool, e na França, onde o Automobile-Club, em 1902, organizou o congresso de aplicações do álcool. Rudolf Diesel registrou a patente de seu motor-reator em 1897, desenvolvido originalmente para trabalhar com óleo de origem vegetal.

Caraterísticas intrínsecas e fatores físicos e econômicos complementares contribuíram decisivamente para a consolidação da hegemonia do petróleo: sua densidade energética, em termos de conteúdo por unidade de peso e volume; o balanço de energia líquida, em termos de energia investida por energia obtida (EROI) (HALL et al., 2009) e, os baixos custos de obtenção, em comparação com outras alternativas para obtenção de combustíveis líquidos, como por exemplo o etanol ou carvão liquefeito. Um fator decisivo foi o processo de craqueamento catalítico desenvolvido pela Standard Oil of New Jersey (Esso), em 1942, permitindo otimizar a produção de derivados e ajustá-los às especificações dos motores.

Um parâmetro para comparar a qualidade relativa de combustíveis ou fontes de energia é o balanço de energia líquida disponível, também conhecido como EROI – *Energy Return on Investment*. Em 1930, o EROI do petróleo nos Estados Unidos foi de 100 barris por cada barril de petróleo investido, em 1970 declinou a 30:1, e em 2000 chegou a (11 a 18):1. Mas deve-se ver o problema desse custo cada vez maior, comparativamente. A fonte alternativa ao petróleo mais competitiva hoje, o etanol brasileiro, tem uma relação de 1 para 8. E o biodiesel, o óleo diesel produzido a partir de vegetais, de 1 para 1. Para o *shale gas* os resultados são de 1:5. E conversão direta do sol em eletricidade, a fotovoltaica, tem uma relação semelhante. Estas caraterísticas se refletem também em vantagem econômica em termos de custos de produção, permitindo, em determinadas condições, a geração de excedente econômico, sob a forma de renda petroleira.

ca, com a matriz carbonizada da economia mundial, e as tentativas de busca de novas fontes de energia que permitam substituir o petróleo em função de sua exaustão e, também, visando às reduções de emissões gases de efeito estufa.

Mesmo assim, quando se observa a estrutura social de produção, a persistência do modelo de desenvolvimento urbano industrial surgido da Revolução Industrial, tem que se aceitar que o papel do petróleo é ainda extraordinário. Há duas razões para a necessidade da transição energética para fontes. A solução simultânea dos dois problemas exige investimento em ciência e tecnologia para amenizar os impactos que esta substituição vai ter na estrutura de produção e de consumo. Não é que seja desnecessária uma mudança de modelo de desenvolvimento social, das sociedades atuais para outras, que usem muito menos o automóvel como meio de transporte individual, por exemplo. Mas, para que haja essa mudança de padrão não basta apenas vontade: é preciso desenvolver as forças produtivas, investir nas novas tecnologias, para que elas elevem sua produtividade. E, ao mesmo tempo, trabalhar para que ocorra uma mudança de modelo social.

Na atual estrutura produtiva, com sete bilhões de habitantes no planeta e cerca de 200 milhões de habitantes no Brasil, o sistema hegemônico permite que essas pessoas sobrevivam, ainda que grande parte delas de maneira desigual. Há uma assimetria entre países e dentro das sociedades: concentração do acesso aos bens, serviços em favor de elites. A maioria vive em condições precárias no mundo inteiro e também no Brasil. O trilema que Humanidade enfrenta é: como reduzir as emissões de gás carbônico abdicando do petróleo, que enseja maior produtividade do trabalho social e, ao mesmo tempo, produzir mais e distribuir melhor a produção para atender as necessidades de grande parte da população, fazendo uso de fontes de energia menos impactantes, que reduzem a produtividade do sistema econômico, reduzindo o acúmulo de excedentes. A solução deste trilema passa pela alteração do padrão de consumo, pelo aumento e melhor distribuição da produção, isso implica na necessidade do aumento da produtividade do trabalho e do capital, e pelo uso de fontes como o petróleo, geradores potenciais de excedentes, e também pelos investimentos em tecnologia e ciência requeridos para avançar o processo de produção com uso fontes menos impactantes. O petróleo terá ainda um enorme valor enquanto persistirem as características básicas do atual modelo de desenvolvimento urbano industrial e um papel central na viabilização da mudança do paradigma de produção e consumo existente e da própria transição

energética. Mantidas estas condições, o petróleo tem grandes possibilidades de manter seu elevado valor por longo tempo, três ou quatro décadas, no mínimo.

A DESCOBERTA DOS RECURSOS DO PRÉ-SAL E O POTENCIAL DO BRASIL DIANTE DE ESTRATÉGIAS ALTERNATIVAS DE APROPRIAÇÃO E INSERÇÃO INTERNACIONAL

Está caracterizada a disputa estratégica e geopolítica entre produtores exportadores e importadores consumidores em torno do controle do acesso aos recursos e apropriação da renda do petróleo, alinhando de um lado os integrantes da OECD e China, sob a liderança dos EUA, e, de outro, os países da OPEP e Rússia. Este contexto reforça a importância de refletir sobre a estratégia e o papel do Brasil, de modo particular em relação aos recursos do pré-sal. O posicionamento do País, em primeiro lugar, requereria o dimensionamento dos recursos. As reservas formalmente anunciadas para 2014 colocam o Brasil com entre 16,2 bilhões de barris (BP, 2015) e 19,1 bilhões de barris (LIMA, 2015) em posição sem grande relevância no contexto internacional, como potencial exportador.

Todavia, o fato de não ter reservas formalmente declaradas não diminui a importância do papel do Brasil, face ao que já foi divulgado em termos de recursos, com diferentes graus de conhecimento, após a formulação e consolidação do modelo geológico de pré-sal que levou a comprovação da existência de uma nova província geológica do pré-sal, descoberta mais relevante para a indústria do petróleo, em escala mundial, das últimas décadas. O modelo adotado até o momento, de outorgar contratos de partilha (como anteriormente os de concessão) por bloco, não permite uma visão sistêmica global, pois cada contrato é tratado como operação isolada. Assim, a primeira questão é a necessidade de promover o dimensionamento, com maior grau de confiança. Isso poderia ser obtido através de cerca de 100 poços exploratórios e alguns testes de longa duração, a um custo estimado de cinco a dez bilhões de dólares, obviamente fora do alcance e escopo deste projeto de pesquisa, pois trata-se de decisão de caráter estratégico e político de Governo e Estado. Sem este conhecimento torna-se difícil organizar o ritmo de produção para as próximas décadas. Porém é possível realizar estimativas sobre o volume dos recursos e o grau de confiabilidade. Ao contrário de outros países produtores de petróleo como os Estados Unidos, Canadá, Grã Bretanha e Noruega, a

agência reguladora de petróleo do governo (ANP) não publica estimativas de potenciais recursos do Brasil, provavelmente pela ausência de estudos sistemáticos.

A descoberta do pré-sal foi fruto de uma decisão da Petrobras, enunciado nos Planos Estratégicos da empresa em 2003 e anos seguintes, de consolidar a corporação como uma empresa integrada de energia, com base em três pilares: ênfase em Exploração e Produção; valorização do gás natural como substituto do petróleo no mercado interno, visando liberar o petróleo, *commodity* de curso internacional, para exportação, reserva ou evitar importação; investimento em fontes renováveis, principalmente biocombustíveis, eólica e solar, como forma de preparar a empresa para a transição energética. O pilar principal em exploração e produção guardava vínculo com a compreensão de que a fase de maior retorno é a descoberta de recursos, pelo potencial de geração de renda, em comparação com os demais segmentos da Indústria, submetidos a regimes competitivos. Esta estratégia estava baseada na valorização da capacitação longamente construída na empresa em geofísica e geologia, capaz de permitir acesso a descobertas no País e no exterior em padrão de excelência internacional.

Em julho de 2005, a Petrobras encontrou em águas profundas, depois de cerca de 300 metros camada de sal, petróleo no campo de Parati (MME, nd; PETROBRAS, 2005; SAUER, 2011; SAUER et al., 2010). Estas evidências foram relevantes para motivar a Diretoria Executiva da Petrobras a aprovar a proposta da Área de Exploração e Produção de promover a reentrada no bloco BM-S-11 que havia atingido a camada de sal, sem sucesso, com objetivo de testar, face aos avanços geofísicos recentes, o chamado modelo geológico (do pré-sal), que vinha sendo objeto de formulações teóricas, estudos e análises havia tempo. A um custo de aproximadamente 254 milhões de dólares a camada de sal foi perfurada e, em julho de 2006, a Petrobras comunicou à ANP a descoberta de petróleo no campo de Tupi (que foi rebatizado de “Lula”, em 2010), na bacia de Santos. Após o sucesso da perfuração de um novo poço, extensão no campo de Tupi, para confirmar a descoberta, indicando volumes recuperáveis entre 5 e 8 bilhões de barris de petróleo e gás natural (MME, nd; SAUER, 2011), a descoberta foi comunicada à ANP e ao Governo. O Governo foi informado permanentemente sobre o andamento do processo de exploração e avisado também do impacto estratégico potencial da descoberta bem como da necessidade rever a política para o petróleo no País. Este teve uma atitude dúbia, até mesmo em outubro de 2007, quando anunciou a descoberta, buscando assumir um protagonismo

no que seria “um passaporte para o futuro pela descoberta”. Ao invés de cancelar leilão da 9ª. Rodada e rever o modelo regulatório, o Governo, com medo da reação dos investidores privados, apenas concordou em promover a retirada de cerca de quarenta blocos no entorno de Tupi. A área confirmava a possibilidade de uma grande quantidade de óleo leve recuperável, depois da camada de sal, entre 5 e 8 bilhões de barris (MME, nd; SAUER, 2011; SAUER et al., 2010). Em 2007, os novos depósitos de petróleo foram encontrados nos campos de Caxaréu e Pirambu, na Bacia de Campos, e de Carioca e Caramba, na Bacia de Santos. Foi também em 2007 que a Petrobras tornou pública a confirmação de quantidades sem precedentes de petróleo e gás, depois da camada de sal, no Espírito Santo, Campos e bacias de Santos (MME, sd). Em 2008, novas descobertas de petróleo ocorreram na região do pré-sal (Júpiter, Bem-Te-Vi, Guará, Iara, Baleia Franca, Baleia Azul, Jubarte e Cachalote) e a Petrobras iniciou a produção do pré-sal no campo de Jubarte (MME, nd; SAUER, 2011). Nos anos seguintes, foram anunciadas várias descobertas, entre elas os campos chamados Libra, Franco, Florim, Tupi Nordeste, Cernambi, Sapinhoá, Pau-Brasil, Peroba e Guará Sul. Além disso, a existência de petróleo nos últimos depósitos encontrados começou a ser confirmada e os volumes a serem estimados. Havia estimativas que indicam potenciais reservas de cerca de 100 bilhões de barris (MME, nd; SAUER, 2011). A tabela 2 sumariza a cronologia da descoberta dos recursos do pré-sal.

Tabela 2 Cronologia da Descoberta dos Recursos do Pré-Sal.

Formulação do Modelo Geológico (mais de uma década)
Agosto de 2005: Primeiros indícios de óleo no pré-sal, Campo de Parati, Bacia de Santos
TESTE DO MODELO
Bloco Original: BM-S-11 (adquirido no BID 2: 14/09/2000)
POÇO 1-RJS-628A (Tupi)
Início Perfuração: 30/09/2005
Conclusão da Perfuração (1a. fase, seco, até o sal): 13/10/2005
Reentrada no poço: 02/05/2006
Notificação de Descoberta (Óleo): 10/07/2006
Conclusão de Reentrada: 12/10/2006
Envio do Plano de Avaliação para ANP: 31/08/2006
Prazo Final do Plano de Avaliação: 31/12/2010
POÇO 3-RJS-646 (Extensão de Tupi) - Área do PA do 1-RJS-628A
Início da Perfuração: 07/05/2007

Notificação de Descoberta (Óleo): 08/08/2007
Conclusão da Perfuração: 28/09/2007 (estimativa: 5-8 bilhões de barris)
Início de Produção do Teste de Longa Duração: 01/05/2009
2007: descobertas de Caxaréu, Pirambu (BC) Carioca, Caramba (BS)
2008: descobertas de Júpiter (8bi), Bem-Te-Vi, Iara (3-4 bi), Guará. BES: óleo no pré-sal sob pós-sal: Baleia Franca, Baleia Azul, Cachalote e Jubarte, que estende produção ao pré-sal.

(Fonte: SAUER; ESTRELLA¹, com. pes., 2008).

No presente, a produção de petróleo está em andamento e a produção do pré-sal já ultrapassou 650.000 barris por dia, o que é cerca de um quarto da produção total do Brasil (ANP, 2015). De acordo com os dados de produção de petróleo da autoridade reguladora, a partir de dezembro de 2014 (ANP, 2015), Lula é o segundo campo mais produtivo no país, produzindo uma média de 234 mil barris por dia. Da mesma forma, Jubarte é o quinto campo mais produtivo, com uma média de 187 mil barris por dia. Na verdade, a confirmação

da província do pré-sal revelou não apenas recursos valiosos, mas a capacidade técnica da empresa pública brasileira para explorar águas ultra profundas, uma nova fronteira para a produção de petróleo. No entanto, a indústria do petróleo foi trazida para novos desafios, não só em termos de capacidade de investimento, mas também em matéria de políticas regulatórias.

Os anúncios de descobertas do pré-sal permitem estimar que estejam assegurados cerca de 100 bilhões de barris recuperáveis. Pode-se acreditar na sua duplicação ou mesmo triplicação, o que colocaria o Brasil ao lado da Venezuela e Arábia Saudita, como os maiores detentores de recursos. Paulo César Ribeiro Lima (2015), e em estudos complementares, avalia que uma estimativa conservadora seria de 62,8 bilhões de barris, somente considerando os anúncios já realizados, sumarizados na Tabela 3, e de 143,1 bilhões de barris, com base em avaliação potencial dos campos já explorados, porém sem divulgação pública, de Carcará, Júpiter, Gato do Mato, Tartaruga Verde, Gávea e Pão de Açúcar, e em áreas com potencial substantivo e ainda não exploradas (outras áreas do pré-sal, Pau Brasil, Peroba, Saturno, e fora do pré-sal, outras áreas de Sergipe-Alagoas, Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Barreirinhas, Ceará).

1 ESTRELLA, G. de O. e Assistentes (Diretoria de Exploração e Produção da Petrobras). Comunicação pessoal. 2008.

Tabela 3 Recursos já anunciados pela Petrobras, como reservas estimadas.

Bilhões de barris de petróleo	Reservas anunciadas pela Petrobras por regime e com fator de recuperação super conservador: 25%			Total por campo		
	Concessão	Cessão Onerosa	Partilha de Produção	Com fator de recuperação super conservador de 25%	Com fator de recuperação mais realista, de 50% (1)	Reservas de petróleo "in situ"
Campos do Pré-Sal com reservas já estimadas						
Tupi e Iracema (campo de Lula)	8,3	-	-	8,3	16,6	33,2
Sul de Tupi (campo de Sul de Lula)	-	0,128	-	0,128	0,256	0,512
Nordeste de Tupi (campo de Sêpia)	-	0,428	0,6	1,028	2,056	4,112
Florim (campo de Itapu)	-	0,467	0,4	0,867	1,734	3,468
Iara	3,5	-	-	3,5	7	14
Entorno de Iara	-	0,6	3,25	3,85	7,7	15,4
Sul de Sapinhoá	-	0,319	-	0,319	0,638	1,276
Sapinhoá	2,1	-	-	2,1	4,2	8,4
Franco (Búzios)	-	3,056	8,25	11,306	22,612	45,224
Libra	-	-	10	10	20	40
Carioca (Lapa)	0,459	-	-	0,459	0,918	1,836
Área de Moita Bonita (não é Pré-Sal)	0,993	-	-	0,993	1,986	3,972
Volumes recuperáveis por regime no Pré-Sal	15,352	4,998	22,5	42,9	85,7	171,4
	Reservas nacionais anteriores ao Pré-Sal			19,9	19,9	19,9
	Total já calculado (bilhões de barris)			62,8	105,6	191,3

(Fonte: LIMA, com. pes., em 13 de agosto de 2015; LIMA, 2015). Nota: (1) Atual Diretora de Exploração e Produção afirma que a empresa está objetivando alcançar uma média de 60% nos campos do Pós-Sal da Bacia de Campos, em campos de qualidade geralmente inferior ao Pré-Sal.

Em recente estudo, publicado no 14º. Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Jones e Chaves (2015), utilizando o software GeoX® para modelar o processo exploratório e empregando o método de simulação de Monte Carlo para os valores dos parâmetros utilizados no cálculo do número de acumulações ainda por descobrir, sua dimensão, e base total de recursos de óleo e gás recuperáveis, estimaram em 119 bilhões de barris, com grau de confiança de 90%, e em 216 bilhões de barris, com grau de confiança de 10%, o total das acumulações recuperáveis.

Estas estimativas, ainda que com grau especulativo, reforçam, por um lado, a necessidade de trabalhos e análises sobre quantidade e qualidade dos recursos, e, por outro, permitem realizar um exercício exploratório sobre a riqueza potencial envolvida. Podem ser adotadas as seguintes hipóteses: 40 anos de produção; Preço do petróleo - US\$ 65,00/bbl; Custo direto - US\$15,00/

bbl (somente capital & trabalho, sem transferências); Excedente - US\$ 50,00/bbl. A tabela 4 apresenta os resultados da simulação, para extrair durante 40 anos o petróleo em cenários de recursos hipotéticos de 100, 200 ou 300 bilhões de barris, respectivamente.

Tabela 4 Simulação de resultados de excedente econômico para três cenários.

Cenário Recursos (bilhões de bbl)	Produção diária (milhões bbl/d)	Produção anual (109 bbl)	Excedente anual (US\$ bilhões)
100	6,85	2,5	125
200	13,70	5,0	250
300	20,55	7,5	375

(Fonte: Elaborada pelo autor).

Os resultados potenciais de US\$125, 250 ou 375 bilhões de dólares anuais, a serem apropriados pelo Estado, por várias modalidades (*royalties*, venda de petróleo, imposto, participação especial, participação nos resultados da Petrobras), ou pelas empresas e acionistas (lucros e dividendos), indica a importância de reavaliar a política e a estratégia do País em relação aos recursos do pré-sal. Basta comparar os três resultados com a receita pública anual total da ordem US\$ 700 bilhões (cerca de 35% do PIB), da qual somente pequena parcela, inferior a 10% é investida em projetos de transformação produtiva e resgate das assimetrias econômicas e sócias do País, pois a maior parte está comprometida com o custeio da máquina de Governo e com a dívida pública. Confirma também a importância da atuação estratégica junto com os produtores para garantir a maximização do excedente via manutenção de preços elevados, pois com os preços do petróleo a 100 dólares por barril, vigentes ainda em 2014, os resultados para o excedente anual atingiriam o dobro.

A hipótese adotada no exercício de custo direto de US\$15/barril é conservadora, ao se considerar que a diretora de Exploração e Produção da Petrobras, Solange Guedes, apresentou uma visão geral do pré-sal em sua palestra intitulada *“Pre-Salt: What has been done so far and what is coming ahead”*, em 05 de maio, na 2015 Offshore Technology Conference in Houston, nos EUA. Guedes mostrou evolução desta nova fronteira, os desafios que foram superados e a previsibilidade dos resultados obtidos, bem como enfatizou a viabilidade financeira do pré-sal. “Podemos garantir que o pré-sal é viável com um custo de produção de US \$ 9 por barril. Se considerarmos que duas unidades de produção ainda não estão produzindo em sua capacidade total, o custo de produção será ainda menor. A nossa eficiência operacional de cerca de 92% tem contribuído significativamente para o nosso alcance desses custos baixos”, disse ela. A produção média de petróleo na camada pré-sal da Bacia de Santos está agora em mais de 25.000 barris por dia (b/d). Cinco poços produzem mais de 30 mil bpd. Os campos de Sapinhoá e Lula têm poços cuja média de produção pode chegar a 40 mil b/d (GUEDES, 2015).

Outra questão merecedora de profunda análise é a necessidade de controlar o ritmo de produção para permitir a coordenação com a OPEP e demais países exportadores, visando o controle do preço e maximização da geração de renda, e também o modelo regulatório adotado, pois dele dependerá a repartição da destinação do excedente econômico. Nem o modelo de partilha nem o de concessão tem a flexibilidade para impor este controle estratégico. Ambos os regimes

outorgam contratos de natureza microeconômica que buscam a aceleração da produção para geração de caixa. Não está na alçada dos consorciados nesses contratos a preocupação estratégica e geopolítica, obrigação do Estado. Porém, a contratação direta da Petrobras, para preservação do interesse nacional, também está contemplada na legislação e esta modalidade permite flexibilidade semelhante a dos contratos de serviço, onde o comando e controle do Governo sobre o ritmo de produção é absoluto.

Nota: Texto concluído em maio de 2015.

REFERÊNCIAS

- ANP-Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural*. Dezembro de 2014. Publicado em 01/02/2015. Disponível em: <<http://anp.gov.br/?pg=71248&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebu st=1405346021066>>. Acesso em 13 de agosto de 2015.
- BP-British Petroleum. *BP Statistical Review of World Energy*. June 2015. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>>. Acesso em 13 de agosto de 2015.
- EIA-Energy Information Administration. *International Energy Outlook 2009*. U.S. Department of Energy, Washington DC. 2009. Disponível em: <[http://www.eia.gov/forecasts/archive/ieo09/pdf/0484\(2009\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/archive/ieo09/pdf/0484(2009).pdf)>. Acesso em 13 de agosto de 2015.
- GUEDES, S. Pre-Salt: What Has Been Done So Far and What is Coming Ahead. In: *2015 Offshore Technology Conference*. Houston, EUA. 05 mai 2015.
- HALL, C.A.S.; BALOGH, S.; MURPHY, D.J. What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? In: *Energies*, v.2, p. 25-47. 2009.
- HALL, C.A.S.; HANSEN, D. (Eds.). *New Studies in EROI* (Energy Return on Investment). Sustainability. Special Issue. 2011.
- HALL, C.A.S.; The EROI Study Team. *Provisional Results from EROI Assessments*. The Oil Drum. 2008. Disponível em: <<http://www.theoil drum.com/node/3810>>. Acesso em 13 de agosto de 2015.
- HOYOS, C. The new Seven Sisters: oil and gas giants dwarf western rivals. *Financial Times*, Londres. 11 mar 2007.
- IEA-International Energy Agency. *Resources to Reserves 2013*. Paris, França. 2013. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Resources2013.pdf>>. Acesso em 13 de agosto de 2015.
- IEA-International Energy Agency. *World Energy Outlook 2008*. Paris, França. 2013. Disponível em: <<http://www.worldenergyoutlook.org/media/weo website/2008-1994/WEO2008.pdf>>. Acesso em 13 de agosto de 2015.
- JONES, C.M.; CHAVES, H.A.F. Assessment of yet-to-find-oil in the Pre-Salt area of Brazil. In: *14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. 03-06 ago 2015.
- LIMA, P.C.R. *A situação econômica, financeira e operacional da Petrobras*. Consultoria Legislativa. Câmara Federal, Março de 2015.
- OPEC. *World Oil Outlook*. 2012. Disponível em: <http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/WOO2012.pdf>. Acesso em 13 de agosto de 2015.
- OPEC. *Naimi defends OPEC's actions on production, sees prices stabilizing*. Bulletin n. 3, 2015. p. 4-5. Disponível em: <http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/OB032015.pdf>. Acesso em 13 de agosto de 2015.
- RICO, J.A.P. *Biocombustíveis, Alimentos e Petróleo: Uma Análise Retrospectiva da Experiência Brasileira*. Tese (Doutorado). Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2013.
- SANTOS, T. *El Nuevo Carácter de la Dependencia*. Santiago, Centro de Estudios Sócio-económicos da Universidade do Chile (CESO). 1967.
- SAUER, I.L. *Pré-sal brasileiro: uma nova independência?* Interesse nacional, São Paulo, p. 40-52, 01 fev 2010.
- SAUER, I.L. Prefácio. In: LIMA, P.C.R. *Pré-Sal: o novo marco legal e a capitalização da Petrobras*. Rio de Janeiro: Synergia. 2011.
- SAUER, I.L.; AMADO, N.B.; MERCEDES, S.S.P. Energia, recursos naturais e desenvolvimento. In: *AEPET 50 Anos pelo Brasil, Petrobras e seu Corpo Técnico*. AEPET, Rio de Janeiro. p. 181-195. 2011.
- SAUER, I.L.; SEGER, S. O pré-sal e o futuro. *Versus*, v. 6, p. 28-36. 2011.
- THE WHITE HOUSE. *Blueprint for a Secure Energy Future*. Washington, EUA. 30 Mar 2011. Disponível em: <https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/blueprint_secure_energy_future.pdf>. Acesso em 13 de agosto de 2015.

Gás não convencional: uma alternativa energética possível para o Brasil

Colombo Celso Gaeta Tassinari

Claudio Riccomini

Fábio Taioli

Instituto de Energia e Ambiente e Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo

RESUMO

O petróleo é uma substância natural orgânica composta por grandes moléculas de H e C e ocorre ocupando os espaços vazios entre grãos das rochas sedimentares. Para formar um sistema petrolífero deve ocorrer uma deposição de sedimentos finos e de matéria orgânica para gerar rochas sedimentares enriquecidas em matéria orgânica. O lento soterramento desses sedimentos provoca o aumento da pressão e temperatura formando rochas sedimentares com matéria orgânica, que são denominadas de folhelhos negros, e também modificando a matéria orgânica em querogênio e depois em óleo e gás, constituindo a rocha geradora. Quando existem condições de migração, o óleo/gás gerados irão migrar ascendentemente para rochas de maior permeabilidade até encontrarem estruturas geológicas que irão permitir o acúmulo deste óleo formando os reservatórios. O petróleo contido nas rochas permeáveis é chamado de óleo e gás convencional enquanto que o contido no folhelho é denominado de não convencional. No Brasil, têm-se camadas de folhelhos negros importantes em várias bacias sedimentares, que segundo estimativas da ANP, teriam uma reserva de 414 tcf de gás não convencional recuperável (EUA = 665 tcf), a maior parte dele no sul-sudeste do país. Em termos econômicos, a produção de gás não convencional é bastante vantajosa já que seu preço é inferior ao do gás convencional. Neste caso, além do decréscimo do custo da energia, a produção de gás não convencional proporciona o surgimento de grande quantidade de indústrias periféricas. A extração de gás de folhelho gera preocupações ambientais em relação às emissões de CO_2 e de CH_4 , ao volume de água e de reagentes químicos utilizados nos processos de fraturamento, à possibilidade de contaminação de águas subterrâneas, à competição no uso de terras em áreas densamente povoadas e a efeitos sísmicos induzidos. Esses riscos podem ser controlados empregando-se boas práticas da engenharia, monitoramento em tempo real e regulamentação adequada. A humanidade necessitará de petróleo por vários anos e o gás natural, dentre os derivados de petróleo, é o produto mais limpo e o que emite a menor quantidade de gases que produzem o efeito estufa. Neste cenário, o gás não convencional que possui baixo custo de produção, é uma alternativa energética importante para o Brasil e poderá servir para uma transição mais limpa e segura entre a era do carvão para a das fontes de energia renováveis.

Palavras-chave Gás não convencional. Viabilidade no Brasil. Produção. Impactos. Fraturamento hidráulico.

INTRODUÇÃO

Neste texto são abordados os combustíveis fósseis não convencionais, com destaque para o gás. Inicialmente são apresentados alguns conceitos, em seguida os processos formadores, como podem ser explorados, quais os problemas inerentes à produção e quais as soluções para transformar este importante recurso natural em uma fonte energética possível para o Brasil, tendo como referência uma produção melhor, econômica e sustentável.

O petróleo é uma substância natural orgânica composta majoritariamente por grandes moléculas de H e C (~90%), S (até 5%), O, N, e traços de outros elementos (como Ni, V etc). Ocorre principalmente ocupando os espaços vazios entre grãos das rochas sedimentares, cavidades produzidas por dissolução em rochas carbonáticas e em fraturas, ou em vesículas resultantes de resfriamento de rochas vulcânicas, principalmente basaltos. Pode ocorrer no estado líquido (óleo ou óleo cru), no estado gasoso (gás natural) e no estado sólido (betume ou asfalto). Para formar um sistema petrolífero é necessário que ocorra uma deposição, em ambiente lacustre ou marinho, de matéria orgânica normalmente composta por minúsculos organismos planctônicos (algas e animais), associada com sedimentos finos que vão originar rochas sedimentares de granulação fina enriquecida em matéria orgânica. O lento soterramento desses sedimentos provoca o aumento da pressão, o que leva a compactação e geração da fissilidade, estruturando a rocha em folhas ou lamelas, assim como um aquecimento gradual. Quando estas rochas sedi-

mentares apresentam mais de 5% de matéria orgânica e fissilidade são denominadas de folhelhos negros.

Ao atingir a temperatura de 30° C a matéria orgânica é modificada em querogênio; quando atinge 90° C é modificada para o estado líquido, chamado de óleo, e quando a temperatura eleva-se para aproximadamente 130° C é modificado para gás. Portanto, a partir dos folhelhos negros é formado o petróleo e esta rocha é chamada de rocha geradora. Quando existem condições de migração, como fraturas e intercomunicação entre os poros das rochas sedimentares, o óleo e o gás gerados irão migrar ascendentemente, normalmente para rochas mais jovens e de maior permeabilidade até encontrarem estruturas, como dobras e falhas geológicas, que coloquem rochas impermeáveis como barreiras, impedindo a continuidade da migração do petróleo. Nessas condições estes irão se acumular nas rochas permeáveis, formando os reservatórios de óleo e gás. Estas rochas porosas e permeáveis, principalmente arenitos e rochas carbonáticas, são denominadas de rochas reservatório. O petróleo e gás extraído das rochas reservatório são aqueles que normalmente são retirados, por exemplo, dos campos petrolíferos da plataforma continental brasileira e são chamados de óleo e gás convencionais. Por outro lado, o gás e o óleo contidos nos folhelhos negros (rochas geradoras) são denominados de óleo e gás não convencionais, pois estão em rochas de muito baixa permeabilidade, sendo necessário submeter essas rochas a processos de fraturamento para a retirada do hidrocarboneto (óleo e gás) através das fraturas então geradas.

ESTIMATIVAS DE RECURSOS NO BRASIL

Na avaliação da quantidade de hidrocarboneto existente e/ou recuperável de um determinado reservatório têm que ser levados em consideração vários fatores, dentre os quais a extensão da rocha portadora de hidrocarboneto, sua porosidade, a saturação de gás e óleo e o conteúdo médio de hidrocarboneto por unidade de volume, assim como o fator de recuperação. O volume do reservatório é calculado com base em mapas geológicos e de isópacas (que mostram a espessura das camadas de rochas sedimentares). A porosidade e a saturação de hidrocarboneto (proporção do espaço poroso ocupado por óleo e gás) são estimadas com base nos perfis elétricos e o fator de recuperação, que é a porcentagem do hidrocarboneto total que pode ser retirado do reservatório, é estimado com base em ensaios de laboratório e também na porcentagem de recuperação de reservatórios similares.

Para estimar o potencial de um reservatório para hidrocarboneto pode-se calcular o recurso e a reserva de óleo e gás. O termo recurso refere-se à quantidade total de óleo e gás que se acredita existir fisicamente dentro do reservatório considerado. O termo reserva refere-se à quantidade de óleo e gás que técnica e economicamente pode ser produzido a partir do reservatório estudado (MCGLADE, 2013). No Brasil ainda não se dispõe de estudos técnicos detalhados que permitam estimar os recursos e as reservas disponíveis de hidrocarbonetos não convencionais. Os dados atualmente disponíveis são apenas estimativas feitas a partir dos volumes médios de folhelhos existentes nas bacias sedimentares brasileiras e com valores médios de teor de matéria orgânica contida nestes folhelhos com base em analogias com outras formações geológicas produtoras de óleo e gás de folhelho.

No Brasil, têm-se camadas de folhelhos negros importantes em diferentes formações geológicas de várias bacias sedimentares paleozoicas e mesozoicas. Por analogia com o campo Barnett, no Texas (USA), a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível – ANP (2012) elaborou a seguinte estimativa apenas para gás não convencional recuperável para as bacias sedimentares continentais: Bacia do Paraná = 226 tcf (trilhões de pés cúbicos); Bacia do São Francisco = 80 tcf; Bacia do Recôncavo = 20 tcf; Bacia do Parnaíba = 64 tcf; Bacia dos Parecis = 124 tcf; sugerindo uma estimativa de 414 tcf de gás não convencional recuperável no país. Comparado com as estimativas elaboradas pela agência de Administração de Informação de Energia – AEI dos Estados Unidos (2013) para a China, de 1115 tcf, para os Estados Unidos, de 665

tcf e para a Argentina, de 802 tcf, podemos considerar que o Brasil tem um bom potencial para a produção de gás não convencional.

MÉTODOS DE EXTRAÇÃO E PRODUÇÃO DE GÁS DE FOLHELHO

Para que uma determinada camada de folhelho negro tenha condições de ser produtora de gás não convencional é necessário caracterizar que a rocha objeto de estudo tenha boa prospectividade. Para isto, além da avaliação do volume de folhelho negro presente, deve-se considerar alguns outros critérios tais como, o ambiente de deposição do folhelho, a profundidade da camada, o teor médio de matéria orgânica total presente na rocha e a maturidade termal.

A caracterização do ambiente deposicional do folhelho, ou seja, se é marinho ou lacustre/lagunar é importante no sentido que folhelhos depositados em ambientes marinhos possuem tendência a conter menos argilo-minerais e maior quantidade de minerais mais rúpteis, como quartzo e carbonatos, que tornam a rocha mais fácil de quebrar nos processos de fatramento hidráulico.

A definição da profundidade do topo e da base da camada de folhelho é necessária uma vez que camadas situadas a profundidades entre 1000 e 3000 metros têm maior favorabilidade para gás não convencional, visto que camadas situadas a profundidades inferiores a 1000 metros apresentam pressão de reservatório mais baixa, tornando mais difícil a recuperação tanto do óleo como do gás, além de ter maior facilidade de perda de gás para a superfície por meio de fraturas e falhas pré-existentes. Em adição, em menores profundidades, há a tendência de ocorrer maiores quantidades de água preenchendo as fraturas. Por outro lado, as camadas situadas a profundidades maiores do que 3000 metros possuem permeabilidade reduzida e custos de perfuração e completação de poços mais elevados.

Como a matéria orgânica (C orgânico), em especial microrganismos e plantas, é essencial para o provimento de carbono, oxigênio e hidrogênio necessário para a geração de óleo e gás natural, a medida do teor total de carbono orgânico (TOC) é fundamental para avaliar o potencial do folhelho para geração de óleo e gás. Para uma camada de folhelho ter boa prospectividade para gás não convencional é necessário, entre outras coisas, que a rocha tenha uma média de TOC da ordem de mais de 2%.

Outro fator importante para a definição da camada de folhelho negro como potencial produtora de gás não

convencional é a medida de maturidade termal (R_o), que indica o quanto a camada de folhelho tem sido exposta à temperatura necessária para transformar a matéria orgânica em hidrocarbonetos. A refletância ($R_o\%$) de certos tipos de materiais/minerais, como a vitrinita, por exemplo, é usada como indicadora dessa maturidade termal. Normalmente a maturidade termal de uma área com boa prospectividade para óleo tem R_o maior que 0,7%, enquanto para gás natural é necessário ter R_o entre 1,0% e 1,3%. Áreas sem gás normalmente tem R_o maior do que 1,3%.

Após a seleção das áreas favoráveis para extração de gás não convencional e antes da realização das perfurações de poços devem ser efetuados estudos das características petrofísicas (porosidade em meso, micro e nanoescala, permeabilidade, saturação de água), propriedades mecânicas das rochas e estudos do padrão de fraturas em meso e microescalas nas rochas. Outro aspecto importante é a avaliação do passivo ambiental da área selecionada antes das atividades de perfuração e produção dos poços.

A extração de gás não convencional em folhelho se inicia com a perfuração de um poço vertical (normalmente de 1500 a 3000 metros) até atingir as proximidades da camada da rocha portadora do gás. Esse poço é revestido por tubos de aço, que são conectados uns aos outros, e o espaço entre a parede exterior dos tubos e a parede do furo é preenchido por cimento, a fim de estabilizar as rochas ao redor do poço e de impedir que os fluidos de perfuração e gases contaminem as rochas e aquíferos atravessados pela perfuração. Quando essa perfuração atinge a camada de folhelho portadora de gás, o poço é gradativamente desviado para uma perfuração sub-horizontal por mais 1500 metros aproximadamente. Essa seção horizontal do poço também é revestida de cimento. A partir da finalização da perfuração e completação do poço inicia-se o processo denominado de “fraturamento hidráulico”, que já é usado largamente na indústria do petróleo para melhorar a recuperação de óleo e gás em reservatórios com baixa permeabilidade. Este processo consiste no bombeamento para dentro do poço de um fluido, que pode ser água, dióxido de carbono, nitrogênio ou propano, com uma pressão maior do que a resistência do folhelho fazendo com que sejam criadas ou reativadas diversas pequenas fraturas no reservatório, tornando-o mais permeável para estimular a produção de óleo e gás. O processo de fraturamento é realizado empregando-se pequenos aparatos explosivos que são ativados sequencialmente do final da perfuração horizontal para o início. Durante o fraturamento, o conjunto é pressurizado para

propagar as fraturas através da camada de folhelho. O fluido mais utilizado para pressurizar o poço e fraturar as rochas é constituído em média por 90% de água, 9% de areia e em torno de 1% de produtos químicos. A areia tem como função manter as fraturas abertas (impedindo que se fechem por ação da carga das camadas de rochas sobrejacentes) e a permeabilidade ao longo do arranjo de fraturas. A composição dos aditivos químicos varia em função das características do poço e das rochas a serem fraturadas, mas em um procedimento normal pode conter mais de uma dezena de produtos. Cada componente possui uma finalidade específica dentro do projeto, incluindo, por exemplo, os produtos redutores de atrito, para permitir que uma maior injeção de fluido seja feita com menor pressão; os biocidas, para impedir o crescimento de microrganismos (bactérias) para impedir incrustação biológica nas fraturas diminuindo a permeabilidade; os produtos anticorrosivos, como o hidróclorídrico, para impedir a deterioração dos revestimentos dos poços e ácidos, para remoção dos restos de cimento e de lama de perfuração no entorno do poço e para dissolução de minerais carbonáticos visando melhorar a circulação de outros fluidos.

O processo de fraturamento hidráulico inclui diversos cuidados que são tomados para evitar processos de contaminação de água subterrânea. Dentre eles os mais importantes consistem na instalação de revestimentos de aço e cimento em toda a extensão do poço, efetuar o fraturamento somente em camadas de folhelhos situadas a grandes profundidades, geralmente entre 2000 e 3000 metros, e a uma distância de pelo menos 850 metros de fraturas e falhas geológicas importantes, para impedir eventual escape de gases da rocha fraturada para a atmosfera. Cumpre assinalar que o escape de metano para a atmosfera e para dentro de alguns aquíferos já ocorre naturalmente em algumas regiões, por meio de fraturas naturais existentes nas rochas sobrejacentes, sem qualquer intervenção antropogênica.

Após o fraturamento hidráulico, parte significativa do fluido injetado no poço retorna à superfície e é denominado de *flowback*. À sua composição original estão incorporados minerais oriundos da rocha fraturada, sendo necessário, portanto, o tratamento adequado da água de *flowback* para que não ocorra contaminação do meio ambiente. Assim, a disposição apropriada do fluido de *flowback* é muito importante para a proteção das águas superficiais e subterrâneas. Vale ressaltar que na grande maioria dos casos estes fluidos são re-injetados no interior de poços perfurados inoperantes. Nos Estados Unidos, o processo de

disposição subterrânea destes fluidos é regulado e controlado por agências governamentais de proteção ambiental. Em função das características geológicas das áreas, os fluidos, de maneira alternativa, são tratados e descarregados em reservatórios provisórios (barragens), e posteriormente reutilizados em novos processos de fraturamento hidráulico. Foi observado que a injeção subterrânea dos fluidos de *flowback* pode induzir microssismos perceptíveis somente por equipamentos ou até mesmo, em pequenas proporções, sismos de baixa intensidade, perceptíveis pelo homem. Isto ocorre pelo fato da água reinjetada penetrar pelos poros da rocha aumentando a pressão entre os grãos e, se as rochas estiverem com o seu sistema de tensão já próximo da instabilidade, o aumento da pressão intragranular pode produzir a ruptura e a liberação de energia com a consequente produção de sismos, como documentado, por exemplo, no estado americano de Oklahoma.

Após o processo de fraturamento hidráulico o poço começa a produção de gás que irá ser captado na boca do poço. Normalmente grande parte da quantidade de gás armazenada na área fraturada será produzida nos primeiros 18 meses do poço e após este prazo o poço deverá continuar produzindo pequenas quantidades, em média por mais 40 meses aproximadamente, podendo-se adicionalmente perfurar novos poços com novos fraturamentos hidráulicos no mesmo local para manter ou ampliar a produção.

O SHALE GÁS É BOM PARA A ECONOMIA?

Em termos econômicos a produção de gás não convencional é bastante vantajosa, tendo em vista o seu preço inferior ao do gás oriundo do petróleo convencional. Por exemplo, nos Estados Unidos, que reúnem muitas condições favoráveis para a produção de gás e óleo não convencionais, como existência de rede de gasodutos adequada e legislação e regulação pouco burocráticas e eficientes, após o início da produção do gás de folhelho em 2008, o preço do gás baixou de 11 para 4 dólares americanos por milhão de BTUs (*British Thermal Units*) (EIA, 2011). Isto não significa que no Brasil ocorreria situação semelhante, uma vez que aqui as condições técnicas, de legislação e de logística são diferentes, mas pode-se considerar em linhas gerais o que aconteceu nos Estados Unidos como tendência.

Neste sentido, além do decréscimo do custo da energia, a exploração e produção de gás não convencional proporciona o surgimento de grande quantidade

de indústrias periféricas da produção de gás, para o fornecimento de peças, maquinários e de matéria prima e insumos para serem utilizados nos poços perfurados e nas instalações de produção e distribuição de gás, e para o aparecimento de prestadores de serviços tecnológicos especializados. Essa atividade indireta na cadeia de suprimentos pode gerar milhares de novos empregos para engenheiros, geólogos, químicos, trabalhadores em construção, analistas de negócios, operadores de máquinas, especialistas em tratamento de águas e de serviços de sondagens entre outros. No Reino Unido, por exemplo, os investimentos nos próximos anos poderão atingir quase 20 bilhões de reais, proporcionando aproximadamente 75 mil novos empregos, conforme o relatório do *Department for Environment, Food & Rural Affairs* (2014) do Governo do Reino Unido. Considerando a redução do custo de energia para as residências e indústrias, o aumento significativo de empregos gerados direta e indiretamente e o aumento do capital circulante nas comunidades envolvidas com a produção de gás não convencional, pode-se avaliar que, a curto e médio prazos, os impactos econômicos gerados seriam positivos. No entanto, é necessário lembrar que, ao contrário da exploração e produção de petróleo convencional, a produção de gás e óleo não convencional ocorre por um curto período de 5 a 20 anos, considerando-se fluxo contínuo de perfuração de novos poços. Depois deste período, com o término da exploração e produção do gás não convencional, a economia regional poderá diminuir significativamente. Além disto, no aspecto econômico, também devem ser avaliados os custos de outros impactos além daqueles relacionados diretamente com a produção de gás não convencional, como, por exemplo, os custos de tratamento de águas e administração do aumento do tráfego de caminhões e de ruídos e os impactos sobre outras atividades industriais que possam existir na região. Por outro lado, o ciclo entre a descoberta do campo e o início de produção é muito menor do que aquele dos hidrocarbonetos convencionais, o que permite que o investidor tenha o retorno do investimento de maneira muito mais rápida, com menor risco. Acrescenta-se que as profundidades dos poços são menores e o custo de um poço em terra é muito menor do que no mar.

Considerando todos os aspectos econômicos envolvidos com a exploração e produção de gás não convencional, pode-se concluir que esta atividade tem se mostrado bastante benéfica para a economia dos países produtores.

O SHALE GÁS É BOM PARA O AMBIENTE?

Os impactos ambientais gerados na exploração e produção de gás não convencional variam de acordo com a região considerada. Neste trabalho os impactos serão discutidos de forma genérica com base nos estudos atuais desenvolvidos em países onde a indústria do gás não convencional teve seu pleno desenvolvimento durante a última década.

A extração de gás de folhelho gera preocupações ambientais em relação aos seguintes aspectos: a) emissões de CO_2 (dióxido de carbono) e de CH_4 (metano), particularmente em relação ao escape de CH_4 durante as perfurações dos poços e dos processos de fraturamento hidráulico quando comparado com a extração de gás convencional; b) o volume de água e de reagentes químicos utilizados nestes processos de fraturamento e sua subsequente eliminação; c) possibilidade de contaminação de águas subterrâneas e de aquíferos importantes; d) competição no uso de terras em áreas densamente povoadas e e) efeitos físicos do fraturamento hidráulico, como reativações de falhas e fraturas geológicas, e atividades sísmicas. Vários trabalhos e relatórios científicos foram publicados nos últimos três anos, em especial aqueles realizados no âmbito do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), do Departamento de Energia dos Estados Unidos, da Agência Internacional de Energia e em várias universidades americanas como a do Texas em Austin, Oklahoma em Tulsa e Carnegie Mellon em Pittsburgh na Pensilvânia.

Em relação às emissões de CO_2 (dióxido de carbono) e de CH_4 (metano) MacKey e Stone (2013) consideram três situações em que as atividades de exploração e produção de gás de folhelho podem emitir gases que produzem o efeito estufa, são elas: 1) durante algumas fases no processo de produção de gás de folhelho, gases podem ser liberados intencionalmente, quando permitido, como no processo de *flowback*, por exemplo, por razões de segurança nas operações e durante certas operações de manutenção dos poços produtivos; 2) emissões de gases produzidas por motores a diesel utilizados para perfuração e fraturamento hidráulico e pela própria queima do gás. Essas emissões seriam principalmente de CO_2 . No entanto, a combustão incompleta pode resultar em outras emissões, tais como metano, compostos orgânicos voláteis e de negro de fumo; 3) emissões não intencionais de gases produzidas por escapes ou vazamentos de CH_4 , através de válvulas, cabeças e revestimentos de poços ou por fraturas e/ou falhas geológicas naturais existentes nas rochas sobrejacentes às camadas de folhelhos,

reativadas por sucessivos processos de fraturamento hidráulico. Hoje em dia, o escape de gases pelos revestimentos dos poços ou por outros componentes do sistema de produção é mínimo, visto que todas as operações associadas à produção de gás não convencional são monitoradas em tempo real e facilmente detectadas. Por outro lado, não é ainda bem compreendido o comportamento mecânico das fraturas naturais existentes nas rochas quando submetidas a sucessivos processos de fraturamento hidráulico, se podem reabrir facilitando o escape do metano ou não. Entretanto, para evitar estes possíveis vazamentos, as áreas com grande densidade de fraturas não são utilizadas para a exploração de gás de folhelho e existem normas regulatórias que estabelecem uma distância mínima entre o poço perfurado e as fraturas importantes, que, no caso da Inglaterra, é de 800 metros. Vazamentos de metano ao longo de fraturas naturais ocorrem mesmo sem nenhum tipo de indução por parte de atividade humana, e sua detecção é utilizada inclusive como método prospectivo. Quando o metano entra em contato com a atmosfera sofre combustão e forma o denominado “fogo fátuo”, comum em pântanos, lagos e em áreas com rochas enriquecidas em matéria orgânica e são registrados no Brasil desde há muito tempo, onde deram início aos mitos indígenas, como por exemplo, o do Boitata, a cobra de fogo.

Jiang et al. (2011), estudando as emissões de gases geradores de efeito estufa do campo produtor de gás de folhelho de Marcellus na Pensilvânia (USA), concluíram que a quantidade total de emissões de gases, quando comparada com as emissões produzidas pela média do ciclo de vida do gás doméstico americano, produzia um acréscimo de 3%, muito inferior a das emissões de CO_2 produzidas pelo carvão quando este é utilizado na geração de eletricidade. Howarth et al. (2012) sugeriram que é necessário mais trabalho para compreender verdadeiramente as emissões de CO_2 e CH_4 decorrentes das atividades associadas ao gás de folhelho e que normas de produção devem ser postas em prática para garantir que essas emissões sejam reduzidas ao mínimo. Há que se considerar ainda que a utilização de gás em veículos e em atividades de geração de eletricidade por termoeletricas reduz consideravelmente a emissão dos gases que geram efeito estufa, quando comparadas com veículos a gasolina ou diesel e com usinas termoeletricas a diesel ou a carvão. O gás de folhelho pode aumentar a oferta de gás no mercado e com preços mais competitivos.

A produção de gás e óleo não convencionais, por envolver perfuração de poços verticais e horizontais e processos de fraturamento em áreas continentais, gera

preocupações ambientais em relação ao volume de água e de reagentes químicos utilizados nos processos de extração do gás e do óleo e quanto à subsequente eliminação da água utilizada, bem como quanto à contaminação potencial de aquíferos e poços de água potável por metano e outros produtos químicos.

A potencial contaminação de aquíferos pelo processo de fraturamento hidráulico foi avaliada pela Royal Society e pela Royal Academy of Engineering da Inglaterra (2012) e pelo Department of Energy and Climate Change do mesmo país (2014). Seus relatórios técnicos mostram que a possibilidade de contaminação de aquíferos por metano ou por produtos químicos utilizados é bastante improvável. Isso se deve ao fato da camada de folhelho fraturada estar a mais 1500 metros de profundidade e a camada de rocha que contem o aquífero ser mais superficial. Além da grande distância entre elas, há ainda camadas de rochas impermeáveis que bloqueariam a passagem de metano e outros contaminantes para a água potável. Além disso, as fraturas produzidas não atingiriam a zona do aquífero e, mesmo que chegassem até ele, não haveria pressão suficiente para os contaminantes atingirem as camadas superficiais.

O processo de contaminação de aquíferos por meio de vazamento de metano pelas paredes dos poços perfurados é muito difícil de ocorrer tendo em vista que hoje em dia os revestimentos dos poços e as novas tecnologias disponíveis impedem o escape dos gases para os aquíferos. Soma-se a isto o fato de que com o monitoramento em tempo real, qualquer tipo de escape de gás é prontamente identificado. Os casos de contaminação de aquíferos por metano derivado de poços relatados nos Estados Unidos estão relacionados a falhas durante a construção de poços, que não seguiram as melhores práticas estabelecidas.

No processo de fraturamento hidráulico é utilizada uma mistura de água e areia com alguns produtos químicos que têm por finalidade facilitar a migração dos gases da rocha para o poço, reduzindo a fricção dos gases com as rochas, expandindo as argilas e evitando o desenvolvimento de bactérias e de corrosão das tubulações. Quando esta água retorna para a superfície, o denominado *flowback*, deverá conter os produtos químicos que foram adicionados e pequenas quantidades de outros elementos químicos derivados de minerais dissolvidos que estão presentes nas rochas, como ferro, sódio, elementos naturais radioativos em baixas quantidades e outros. Na Inglaterra e nos Estados Unidos a água de *flowback* é tratada de forma similar

aos rejeitos de mineração possuindo uma legislação específica que visa minimizar ao máximo a contaminação superficial do solo e aquíferos. Essa legislação envolve um tratamento da água, armazenamento em local adequado e a reutilização da água em novos processos de fraturamento hidráulico ou para outros fins. Atualmente as empresas que operam nesta área estão desenvolvendo novas fórmulas de fluidos substituindo os produtos químicos por produtos vegetais como sementes e gramíneas, ou por substâncias utilizadas nos produtos alimentícios como polisacarina e outros. Nesta linha, a goma de “Guar”, que é produzida a partir da vagem do feijão vem sendo utilizada com sucesso nos fluidos com a função de ajudar a manter as fraturas geradas abertas facilitando o fluxo do gás para o poço (KING, 2014).

Durante o processo de fraturamento hidráulico pode ser consumida uma quantidade de água da ordem de 15 milhões de litros em um poço, sendo que 80% desta água é reutilizada em novos processos de fraturamento. Atualmente estão em desenvolvimento métodos que utilizam CO₂ resfriado (métodos criogênicos) que poderão substituir grande parte do volume de água utilizado (BULLIS, 2013). Este volume de água é grande, mas quando comparado com outras atividades econômicas que utilizam água, essa quantidade de água pode ser considerada normal. Como exemplo, podemos citar o caso do Estado da Pensilvânia nos Estados Unidos, que perfura 800 poços por ano no Campo de Marcellus, que é um dos principais produtores de gás de folhelho, onde o consumo de água no procedimento do fraturamento hidráulico é cerca de 600 vezes menor do que a quantidade utilizada pelas usinas termoeletricas geradoras de eletricidade ou é três vezes menor à quantidade anual gasta nos procedimentos de irrigação (KENNY et al., 2009). Em relação a outras fontes geradoras de energia, a quantidade de litros de água utilizada para gerar 1 milhão de BTU pelo gás não convencional é cerca de cinco vezes menor do que a quantidade utilizada para gerar etanol a partir de milho e de quinze vezes menor do que é utilizado na geração de biodiesel a partir de soja (GWPC; EIA, 2013).

Portanto, na atividade de exploração e produção de gás não convencional existe o risco de contaminação ambiental, como também existe na produção de petróleo convencional. Entretanto este risco pode ser controlado e minimizado empregando-se boas práticas da engenharia, monitoramento em tempo real e regulamentação adequada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A humanidade necessitará de petróleo e de seus derivados por pelo menos mais quarenta anos, de sorte que qualquer nova possibilidade de utilização de gás deve ser adequadamente avaliada. O Balanço Energético Nacional (2013) mostra que 11,5 % da matriz energética brasileira é constituída por gás natural, o qual, dentre os derivados de petróleo, é o produto mais limpo e o que emite a menor quantidade de gases que produzem o efeito estufa. Neste cenário, o gás não convencional que possui baixo custo de produção, é uma alternativa energética importante para o Brasil e poderá servir para uma transição mais limpa e segura entre o emprego do carvão e do óleo para o das fontes de energia renováveis.

REFERÊNCIAS

- ARTHUR, M.A.; COLE, D.R. Unconventional Hydrocarbon Resources: Prospects and Problems. *Elements*, v. 10, p. 257-264. 2014.
- BULLIS, K. *Skipping the water in fracking*. MIT Technology Review. 2013. Disponível em: <<http://www.technologyreview.com/news/512656/skipping-the-water-in-fracking/>>. Acesso em 26 de maio de 2015.
- CHAMBRIARD, M. Perspectivas para o Gás Natural. In: *Fórum Estadão Brasil Competitivo*. São Paulo. 2012. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=71193#2012>>. Acesso em 26 de maio de 2015.
- DEPARTMENT OF ENERGY AND CLIMATE CHANGE. *Fracking UK Shale*: Water. UK, February 2014. 8 p.
- DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD & RURAL AFFAIRS. *Economics of shale gas*. 2014. Disponível em: <<https://www.gov.uk/government/publications/economics-of-shale-gas>>. Acesso em 26 de maio de 2015.
- EIA-Energy Information Administration. *Natural Gas Monthly Report* - July 2011. U.S. Department of Energy, Washington DC. 2011. Disponível em: <http://www.eia.gov/naturalgas/monthly/archive/2011/2011_07/ngm_2011_07.html>. Acesso em 11 de agosto de 2011.
- EIA-Energy Information Administration. *Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An assessment of shale formations in 41 countries outside the United States*. U.S. Department of Energy, Washington DC. p. 730. 2013.
- GWPC-GroundWater Protection Council. *Water & Energy*. Disponível em: <<http://www.gwpc.org/programs/water-energy>>. Acesso em 26 de maio de 2015.
- HOWARTH et al. Venting and leaking of methane from shale gas development: response to Cathles et al. In: OPPENHEIMER, M.; YOHE, G. (Eds.). *Climatic Change*, v.113, n. 2, p. 537-549. 2012. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s10584-012-0401-0>>. Acesso em 26 de maio de 2015.
- JIANG, M.; GRIFFIN W.M.; HENDRICKSON, C.; JARAMILLO, P.; VANBRIESEN, J.; VENKATESH, A. Life cycle greenhouse gas emissions of Marcellus shale gas, *Environ. Res. Lett.*, v. 6, 9 p. 2011.
- KENNY, J.E.; BARBER, N.L.; HUTSON, S.S.; LINSEY, K.S.; LOVELACE, J.K.; MAUPIN, M.A. Estimated use of water in the United States in 2005. *U.S. Geological Survey Circular 1344*. 52 p. 2009.
- KING, H. *Guar Beans and Hydraulic Frackturing*. Geology.com. 2012. Disponível em: <<http://geology.com/stories/13/guar-beans-and-hydraulic-fracturing/>>. Acesso em 26 de maio de 2015.
- MACKAY, D.J.C.; STONE, T.J. *Emissions Associated with Shale Gas Extraction and Use*. Department of Energy and Climate Change, UK: London. 49 p. 2013.
- MCGLADE, C.; SPEIRS, J.; SORRELL, S. Unconventional gas - A review of regional and global resource estimates. *Energy*, v.55, p. 571-584. 2013.
- THE ROYAL SOCIETY; ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING. *Shale gas extraction in the UK: a review of hydraulic fracturing*. June 2012. 72 p.

Elemento combustível nuclear: urânio

Evando Carele de Matos

Gerente de Engenharia, Geologia e Projetos,
Indústrias Nucleares do Brasil

RESUMO

O urânio é utilizado, principalmente, como combustível nuclear para geração de eletricidade, conforme o Ciclo do Combustível Nuclear, que vai da prospecção e pesquisa até a fabricação do elemento combustível/produção de energia elétrica. A energia nuclear, considerada limpa e competitiva, corresponde a cerca de 3% da matriz energética brasileira, com tendência de aumento da sua participação. A Província Uranífera de Lagoa Real (BA) e a Jazida Fósforo-uranífera Santa Quitéria (CE) constituem as principais jazidas de urânio e decorrem da histórica pesquisa executada no país, valorizada pela relevante e vitoriosa participação de técnicos e cientistas brasileiros na orientação e planejamento das diretrizes, cujos resultados são louváveis. Destaca-se a primordial atuação do Almirante Álvaro Alberto, mentor do caminho nuclear a ser percorrido pelo Brasil. Após algumas escolhas erradas, em menos de uma década (1975/1983) de intensos e profícuos trabalhos determinou-se uma reserva geológica de urânio (cerca de 310.000t de U_3O_8 , considerada a sétima reserva mundial) capaz de atender, confortavelmente, a demanda interna, podendo até produzir excedente passível de exportação, bastando, para isso, reconduzir o Programa Nuclear Brasileiro, de forma plena e responsável, atribuindo à pesquisa de urânio a importância que ela bem merece.

Palavras-chave Pesquisa de urânio. Reserva de urânio. Província Uranífera de Lagoa Real. Albitito. Energia nuclear. Radioatividade. Meio ambiente.

INTRODUÇÃO

No presente – época denominada de Era Nuclear ou Espacial – houve o aporte de novos recursos minerais e modernas aplicações, baseadas em propriedades específicas. A geração de energia atômica em reatores nucleares ampliou a demanda pelos minérios de urânio.

A principal aplicação comercial do urânio é como fonte de energia nuclear para geração de eletricidade em reatores nucleares. Outras utilizações são encontradas em várias áreas das atividades humanas: emprego na Medicina (tratamento de câncer, diagnóstico clínico); na Agricultura (conservação e melhoria da qualidade de alimentos). A tecnologia nuclear tem-se mostrado bastante eficaz para esterilizar alimentos e produtos médico-cirúrgico, sendo, também, empregada para reduzir a carga microbiana dos medicamentos e produtos fitoterápicos.

O urânio é um elemento químico, com símbolo U, número atômico 92, peso atômico 238 (dos elementos naturais é o que possui o maior peso), densidade 19, estado de oxidação +3, +4 e +6, pertencente ao grupo dos actínidos. Os actínidos são elementos radioativos, emitindo espontaneamente radiações alfa, beta e gama.

O urânio natural é constituído por três isótopos - U_{238} (99,3%), U_{235} (principal isótopo físsil utilizado na fabricação do elemento combustível) e U_{234} . O urânio 238 e o tório 232, único isótopo do tório encontrado na natureza, são chamados de materiais férteis, uma vez que podem dar origem, por meio de reações nucleares induzidas, ao plutônio 239 e ao urânio 233, respectivamente, denominados físseis.

Do ponto de vista geoquímico, o urânio encontra-se amplamente difundido nas rochas da crosta terrestre

(2 a 4 ppm), ocorrendo em diversas formas e em vários ambientes geológicos, sempre em combinação com o oxigênio. Existem em torno de 140 minerais nos quais o urânio ocorre como elemento acessório. Em cerca de quinze minerais o urânio constitui o elemento essencial. Nas rochas mineralizadas (albititos) da Província Uranífera de Lagoa Real – PURL, que contém a única mina brasileira de urânio em produção, o principal mineral de urânio é a uraninita (UO_2).

O urânio pode ser lixiviado eficientemente por soluções oxidantes através de redução. Na natureza este fenômeno é frequente devido à presença de sulfetos, ferro-ferroso, matéria carbonosa ou hidrocarbonetos. Pode ser removido, também, de soluções aquosas por adsorção em argilas, matéria orgânica e hidróxidos de ferro.

Nos processos industriais de beneficiamento mineral (extração e concentração), o minério de urânio é submetido ao ataque de soluções ácidas. O urânio é solúvel nos ácidos nítrico, clorídrico e sulfúrico. Na Unidade de Concentrado de Urânio – URA (Caetité-BA), pertencente a Indústrias Nucleares do Brasil - INB, empresa estatal responsável pela mineração/beneficiamento de minério de urânio e produção/comercialização do combustível nuclear, o minério (albitito) é tratado quimicamente através de solução de ácido sulfúrico (lixiviação estática), para obtenção do concentrado de urânio, na forma de diuranato de amônio – DUA (*Yellow-cake*), e através da utilização de peróxido de hidrogênio (processo em implantação, substituindo o hidróxido de amônia), obtendo-se o peróxido de urânio.

PROSPECÇÃO E PESQUISA DE URÂNIO NO BRASIL

A busca de urânio começou dentro do Conselho Nacional de Pesquisas - CNPq, criado pelo Almirante Álvaro Alberto, para fomentar a formação de cientistas no país. O objetivo que o Almirante tinha em mente era desenvolver uma capacidade nuclear no Brasil. Como observador que foi dos resultados do Projeto Manhattan (Estados Unidos), conduzido por físicos, químicos, matemáticos, etc, entendeu que haveria necessidade de formá-los, com bom nível, igualmente no Brasil.

Todavia, antes da criação do CNPq já ocorria a lavra de minerais pesados nas praias do norte do Rio de Janeiro e do Espírito Santo, pela empresa Orquima. Entre os minerais pesados estava a monazita, na ocasião (década de 40) considerada muito importante como alternativa para o urânio. A monazita foi exportada para os EUA, o que terminou com a proibição de exportação e a criação, em 1956, da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, que encampou a linha de monazita da Orquima e depois a totalidade das minas e usinas.

Com o advento do CNPq, o Brasil iniciou a pesquisa de urânio em 1952, no Planalto de Poços de Caldas, logo após descobrir que a rocha denominada caldasito, explorada há quase meio século como minério de zircônio, continha baixo teor em urânio. Em consequência de uma nova orientação nas pesquisas, face à evolução da geologia do urânio, os geólogos brasileiros se interessaram pelo conhecimento dos metaconglomerados auro-uraníferos (1954), das bacias cretácicas do Rio Grande do Norte e de Tucano-BA (1956) e das sequências sedimentares de Olinda-PE (1959).

Esta primeira fase das pesquisas (1952-1959) foi financiada pelo CNPq e pelo Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM, quando recorreram à prospecção aérea, técnica então nascente. O CNPq iniciou um programa de levantamentos aéreos que identificou, principalmente, as chaminés alcalinas em Poços de Caldas e Araxá, em Minas Gerais. Um subproduto disto foi o surgimento de empresas de levantamentos aéreos, como a Prospec e a LASA, que foram importantes no desenvolvimento do conhecimento da geologia do país e de seus recursos minerais.

Em Araxá, o urânio (não é viável economicamente) está relacionado a jazidas de fosfato e nióbio, que vieram impulsionar a indústria de fertilizante no país (contemporaneamente, tem-se o exemplo da Jazida Itataia, no Ceará, onde o urânio encontra-se intimamente associado a rocha fosfática (colofanito) e a INB, através de consórcio com a iniciativa privada, desen-

volve ações para o aproveitamento minero-industrial desses dois bens minerais).

Destes levantamentos resultaram as grandes minas de fosfato e nióbio de Araxá e outras que, posteriormente, entraram em operação, tais como Catalão (GO), e outras. Em termos de urânio, foram identificados apenas os veios de caldasito - baddleita em Poços de Caldas, onde o elemento urânio está na estrutura mineral (retículo cristalino), sendo de difícil aproveitamento. Entretanto, o modelo preferido para a exploração foi o de depósitos associados a sedimentos, como aqueles descobertos nos EUA. Buscando *expertise* para a prospecção de urânio, foi feito um Convênio com o USGS (Serviço Geológico Americano), que trouxe, entre outros, o pesquisador Gene Tolbert para o Brasil.

A partir de 1958, a CNEN passou a ser a responsável pela execução da pesquisa uranífera, contando com o Departamento de Exploração Mineral - DEM (criado em 1963 e desativado em 1974), que absorveu parte da equipe técnica. Como não ocorreram descobertas significativas, foi feito um acordo com a Comissão de Energia Atômica - CEA da França, para onde foram enviados vários geólogos da CNEN para treinamento (durante os trabalhos foram contratados 38 geólogos brasileiros que se iniciaram na prospecção de urânio). O modelo agora era outro, de ocorrências associadas a rochas graníticas. Os resultados foram pífios. A fase francesa corresponde ao período 1961 a 1966.

Quando da criação da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais - CPRM (atualmente denominada Serviço Geológico do Brasil), muitos geólogos da CNEN foram para ela transferidos, pois a lei obrigava aos órgãos de administração direta, como CNEN, DNPM, DNAE (Departamento Nacional de Água e Esgoto), a não realizarem serviços e sim contratá-los com a CPRM. Estabeleceu-se, então o convênio CNEN/CPRM, tendo a CPRM assumido a prospecção de urânio. Os resultados foram nulos.

Posteriormente, a Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear - CBTN, subsidiária, da CNEN, criada em 1972, obteve resultados positivos. Através da aquisição de equipamentos de qualidade e em quantidade suficiente para garantir o melhor desempenho dos técnicos e com o aumento do número de geólogos para 32 (de um quadro diminuído ao longo do tempo) e a formação própria de um contingente de 26 prospectores, a prospecção desenvolveu-se num ritmo rápido. Assim, foram localizados, até 1974, alguns depósitos de relativa importância e assegurada uma reserva geológica de urânio da ordem de 11.000 toneladas.

A partir de 1975, promovida pela recém-criada Empresas Nucleares Brasileiras - Nuclebrás (resultante

da transformação da CBTN), a pesquisa de urânio no território brasileiro se intensificou significativamente, tendo se concentrado nas grandes bacias sedimentares, orientando a busca de urânio no Paraná e no Nordeste. Nesta ocasião, a Nuclemon, subsidiária da Nuclebrás, assumiu a responsabilidade pela pesquisa e beneficiamento da monazita (na Unidade de Minerais Pesados – UMP, localizada no distrito de Buena, município de São Francisco de Itabapoana-RJ). Com o Acordo Brasil-Alemanha de Cooperação Nuclear, o Brasil precisava de urânio para alimentar as usinas nucleares projetadas. A lei foi modificada e a Nuclebrás não ficou mais obrigada a contratar a CPRM e assim formou seus próprios quadros, chegando a contar com 137 geólogos e centenas de engenheiros, prospectores e técnicos em mineração. A partir da Nuclebrás, que aproveitou todo o pessoal técnico e administrativo da CBTN (relocado na Diretoria de Recursos Minerais - DRM), encerrou-se a fase CNEN/CPRM.

A Nuclebrás partia do princípio de que o Brasil, por sua extensão territorial e geologia pouco conhecida, demandava uma postura diferente. Foram analisados todos os dados existentes e adquiridos novos, sem a preocupação de enquadrar as ocorrências em modelos predefinidos, sedimentares ou ígneos. Apesar das dificuldades na aceitação de que éramos nós, os brasileiros, que deveríamos encontrar as jazidas, sem limitarmos-nos a modelos preexistentes é que foram descobertas as jazidas em Poços de Caldas, não associadas aos caldasitos, a jazida de Itataia, onde o urânio está associado a um fosfato amorfo (colofano), exemplo único no mundo, bem como Lagoa Real, onde a associação é com albitos, também exemplo singular. Encontraram-se pequenas jazidas tipo *roll front* em Goiás e foram identificadas associações com metaconglomerados auri-uranífero, como no sistema Witwatersrand da África do Sul e outras mais. Todo o urânio descoberto no Brasil, além das 15.000 t relativas ao planalto de Poços de Caldas, chegou-se a uma reserva de mais de 300.000 t (descobertas entre 1975 e 1983, por técnicos brasileiros) – não estando incluídas as cerca de 60.000 t de urânio associadas aos depósitos de cassiterita de Pitinga-AM. Desde então nada mais significativo foi acrescentado às reservas.

Importa ressaltar que apesar de todo o esforço exercido e da forma heroica em que se trabalhou, apenas um terço do território brasileiro foi pesquisado, de maneira plena ou parcial, o que levou à descoberta de várias jazidas, relacionadas a diversos ambientes geológicos. Isto mostra que muitas regiões precisam ser prospectadas e outras submetidas a estudos mais detalhados.

As reservas de urânio obtidas são suficientes para o suprimento de Angra 1, Angra 2 e de outras usinas a serem instaladas, possibilitando inclusive a exportação. Constitui-se, assim, uma Reserva Razoavelmente Assegurada (RRA), capaz de suprir os cenários previsíveis de geração de energia elétrica de origem nuclear, para as necessidades brasileiras. A disposição desta matéria-prima é a condição fundamental para garantir a participação do Brasil no contexto atômico mundial. Assim pensava o almirante Álvaro Alberto.

Este exemplo é importante, considerando o que pode ser feito no setor mineral brasileiro, quando há objetividade e confiança no trabalho que se faz. Hoje penamos pela falta de recursos, objetividade e confiança no que realizamos.

Os últimos relevantes trabalhos de pesquisa datam, portanto, do final dos anos oitenta, época em que a Indústrias Nucleares do Brasil – INB (1988) sucedeu à Nuclebrás. Em 1994, a INB tornou-se uma única empresa ao incorporar suas controladas - Nuclebrás Enriquecimento Isotópico (Nuclei), Urânio do Brasil (responsável pela área mineral, hoje desativada) e Nuclemon Minero-Química, absorvendo suas atividades e atribuições. A INB, empresa de economia mista, vinculada à CNEN e subordinada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, é responsável pela pesquisa, lavra e beneficiamento de minério de urânio, bem como pela produção e comercialização do combustível nuclear que abastece as usinas nucleares brasileiras.

Atualmente, existe a ideia de retomar a pesquisa em várias regiões, podendo-se destacar as áreas da Província Uranífera de Lagoa Real - PULR (sondagem geológica contratada para execução em 2015-2017), que possui ainda um grande potencial adicional e do Projeto Rio Cristalino, no Pará, que apresenta uma geologia semelhante à do Grupo Athabasca, no Canadá, com depósitos que associam altíssimos teores e grandes volumes. Existem outras regiões que merecem estudos mais aprofundados, entre as quais as Bacias do Paraná e do Maranhão, e a região da Amazônia, que apresenta grande potencial, onde tem-se evidenciado urânio em depósito de cassiterita, associado à columbita/tantalita (Pitinga), a minério de cobre/ouro/ferro (Província de Carajás), e a vários granitos férteis, com registro de ocorrência de urânio na Serra de Roraima (Escudo das Guianas).

Ressalta-se que é importante compreender que para produzir urânio não basta determinar uma anomalia radioativa, mas são necessárias outras atividades que se interconectam, tais como pesquisa geológica para identificação do urânio, sondagem para avaliação das reservas contidas, sondagem de desenvolvimento e

extensão de jazidas, engenharia de processo e elaboração do projeto industrial.

No Brasil, foi aproveitado o urânio contido nas jazidas do Complexo Alcalino de Poços de Caldas, na região de Caldas (MG), onde se instalou, em 1980, o Complexo Mínero-Industrial, que operou até 1994. Neste período, de forma descontínua, foram produzidas um total de 1.124 toneladas de urânio, que constituíram a matéria prima para composição do combustível nuclear utilizado na Usina Angra 1.

Após a desativação, por razões econômicas, da primeira mina de urânio do país, criou-se um novo centro produtor de urânio, no município de Caetité, no sudoeste da Bahia. Trata-se da Unidade de Concentrado de Urânio – URA, que tem como objetivo o fornecimento de matéria-prima para fabricação do combustível requerido pelas centrais nucleares brasileiras. Até 2014, já foram produzidas da ordem de 3.700 toneladas de concentrado de urânio (diurano de amônio – DUA), a partir da exploração a céu-aberto da Jazida Cachoeira (Província Uranífera de Lagoa Real). Ao entrar em processo de lavra esta jazida adquiriu o *status* de mina, sendo atualmente a única mina de urânio em atividade na América do Sul. Projetou-se para os próximos dois anos o início de lavra subterrânea na Jazida Cachoeira e lavra a céu-aberto na Jazida do Engenho.

Importa considerar que as primeiras evidências das jazidas acima citadas decorrem de levantamentos aerogeofísicos executados pela CPRM, em 1976 (Projeto Urandi – DNPM/Nuclebrás), e pela Geofoto, em 1978 (Projeto São Timóteo – Nuclebrás), comprovando a importância da aerogamaespectrometria.

METODOLOGIA DA PESQUISA DE URÂNIO NO BRASIL

A metodologia de prospecção e pesquisa uraníferas adotada pela INB é a clássica utilizada em todo o mundo. Os programas são desenvolvidos através de projetos e atividades, partindo do geral para o particular, cobrindo diferentes extensões.

A pesquisa de urânio, como de qualquer substância mineral útil, segue fases e etapas bem definidas, desde o reconhecimento visando a descoberta de evidência do mineral em causa, passando pela verificação do indício, pela exploração física através de sondagens para determinação dos limites do corpo de minério e do seu valor econômico, pelos trabalhos mineiros de exploração, até o cálculo de reservas e estudo de tratamento do minério.

O que caracteriza o urânio é a radioatividade, distinguindo a sua pesquisa em relação à de outros minerais. Os minerais de urânio (e de outros elementos instáveis) existentes na natureza emitem radiações naturais que podem ser detectadas e medidas por meio de instrumentos especiais. É na fase inicial da descoberta de indícios que se pode tirar o máximo de vantagens desta propriedade. Entretanto, ela continua sendo utilizada na avaliação, exploração e lavra dos minerais radioativos. Constitui, portanto, uma ferramenta de trabalho indispensável.

Inicialmente, são selecionadas áreas para prospecção, envolvendo radiometria autoportada e aerogeofísica, resultando em áreas potenciais. Explorando, ainda, o aspecto radiométrico, as áreas potenciais são investigadas em detalhe, resultando em indícios de urânio. Os indícios de urânio são avaliados quantitativa e qualitativamente, resultando em jazidas.

Conforme foi evidenciado, o período de desenvolvimento de pesquisa mais profícuo foi de 1975 a 1987. As principais áreas trabalhadas foram: Planalto de Poços de Caldas (MG); Figueira (PR); Quadrilátero Ferrífero (MG); Amarinópolis (GO); Campos Belos – Rio Preto (GO); Itaia (CE); Lagoa Real (BA); Rio Cristalino (PA); Espinharas (PB).

Do ponto de vista organizacional, as tarefas foram distribuídas em três grandes grupos: Geologia; Prospecção e Pesquisa; e Desenvolvimento de Jazidas. Do ponto de vista pragmático, dividem-se as ações em subprogramas: Seleção e Verificação de Áreas; Prospecção Mineral; Pesquisa Mineral; Desenvolvimento de Jazidas; Desenvolvimento de Métodos.

PRINCIPAIS JAZIDAS DE URÂNIO NO BRASIL

As principais jazidas de urânio brasileiras encontram-se na Província Uranífera de Lagoa Real – PULR, localizada na região sudoeste do Estado da Bahia, e jazida fósforo-uranífera, situada em Santa Quitéria, no Ceará. Tratam-se de jazidas proterozoicas singulares, uma vez que não são comuns depósitos econômicos de urânio associados a metasomatismo cálcio-sódico (PULR) e depósitos fósforo-uraníferos, apresentando altos teores e volumes de fosfato e de urânio.

A Província Uranífera de Lagoa Real, relacionada a albitos metamórficos, é uma região com diversos depósitos de urânio, num contexto de 38 anomalias distintas, cujos estudos encontram-se em diferentes níveis de detalhamento. Ademais, apresenta, principalmente na sua porção noroeste, áreas prospectáveis, uma vez

que se acham parcialmente recobertas por sedimentos terciário-quaternários, que constituem dificuldades aos levantamentos aerogamaespectrométricos e poderiam mascarar a presença de urânio ou mesmo camuflar as denominadas “jazidas cegas”.

Dezessete depósitos foram submetidos à sondagem; oito desses, com suas pesquisas parcialmente concluídas, evoluíram para a categoria de jazida. Os recursos relativos a esses dezessete depósitos perfazem um total de 107.300 toneladas de U_3O_8 , distribuídas nas categorias Medida, Indicada e Inferida. Acredita-se que a potencialidade apresentada pelas 21 anomalias uraníferas que ainda não foram avaliadas por sondagem, bem como pela referida área com cobertura siltico-arenosa, venha a constituir recursos que contribuirão efetivamente para um expressivo incremento aos já conhecidos.

A Mina Cachoeira (PULR), inicialmente denominada Anomalia 13, tendo apresentado os principais parâmetros geoeconômicos (teor de urânio, espessura mineralizada, volume e morfologia) mais favoráveis ao aproveitamento industrial, foi colocada em processo de lavra a céu aberto, em dezembro de 1999, para atender às necessidades da Unidade de Concentrado de Urânio – URA. Nesta mina foram definidas reservas de cerca de 5.000 toneladas de U_3O_8 , lavráveis até a profundidade de 130 metros. Estudos de pesquisa já realizados indicam que as reservas situadas abaixo da referida profundidade (limite da cava) atingem 15.000 toneladas adicionais. O projeto de mina subterrânea até a cota 590 m prevê lavrar da ordem de 5.000 toneladas de U_3O_8 , em oito anos. Reitera-se que foram produzidas até dezembro de 2014, através da lavra a céu aberto, cerca de 3.700 toneladas de concentrado de urânio.

A mineralização de natureza fósforo-uranífera (Jazida Santa Quitéria/Itataia), encontra-se associada à rocha denominada colofanito, constituindo *stockwork* preenchendo fraturas dos mármores e disseminação de colofana e/ou apatita em epissienitos, calciossilicáticas, mármores, gnaisses e brecha carbonosa. A jazida possui uma reserva lavrável de 79,5 milhões de toneladas de minério – 8,8 milhões de toneladas de P_2O_5 e 79,3 mil toneladas de U_3O_8 , para teores de 11% de P_2O_5 e 1000 ppm de U_3O_8 , respectivamente.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

A evolução do déficit energético brasileiro e mundial torna imprescindível a continuidade da avaliação do potencial uranífero do país. O grande potencial geo-

lógico do Brasil para urânio deixa prever a existência de novas jazidas. A definição de reservas conhecidas bem como a descoberta de novas reservas, além de constituírem elemento essencial no elenco de soluções energéticas poderão vir a ser um importante fator de política no plano internacional. Portanto, deve-se efetuar investimentos para assegurar acréscimo de reservas recuperáveis. Assim, o país poderá passar a exportador de combustível nuclear.

É improvável que a demanda mundial de urânio prevista possa ser atendida somente através de reservas de baixo custo, mesmo que novas jazidas do tipo superior venham a ser descobertas, em razão da alta taxa de crescimento que se projetam para um futuro próximo. Assim sendo, será necessária a produção a partir de reservas de maior custo, em quantidades suficientes. Como o preço de U_3O_8 representa uma parcela muito pequena no custo total da energia nuclear, não se espera que preços mais elevados de U_3O_8 ocasionem declínio significativo da demanda de urânio. Todavia, considerando o valor comercial e estratégico do urânio, segundo um cenário mundial que contempla da ordem de 400 usinas nucleares em operação e quase uma centena em construção, o Brasil deverá executar programas objetivando consolidar sua autossuficiência de matéria prima.

Cria-se sempre nova demanda de combustível nuclear após uma decisão de construir uma central nuclear. Como os reatores necessitam de recursos periódicos ao longo de suas vidas operacionais, o compromisso de uma instalação nuclear exige uma disponibilidade firme de combustível durante pelo menos 40 anos. A dinâmica das relações entre a oferta e a demanda é determinada pelas taxas em que o urânio é produzido e consumido.

A atividade mineral tem um compromisso com a demanda e deve, portanto, ser fomentada e incrementada em todos os seus segmentos, a partir de uma visão empresarial e de forma ecologicamente correta. Atualmente, o mercado, a nível mundial, encontra-se em desequilíbrio entre a produção e a demanda e tende-se a agravar.

O fomento, a ser adotado e implementado com critérios, deverá ocorrer de forma gradual e com dinâmica operando em horizontes quinquenais: deve-se entender que a função Planejamento é vital para a execução de programas de pesquisa mineral. Vale lembrar, que o período de maturação de uma jazida é da ordem de dez anos.

A demanda interna ou externa, por produtos e serviços com exigência de qualidade cada vez mais rigorosa, tem provocado na pesquisa e mineração

(início da cadeia produtiva) maiores exigências quanto às especificações de características químicas, físicas e metalúrgicas. Baixa variabilidade levam a grande vantagem competitiva. Isto tem acarretado uma revolução no planejamento da prospecção, pesquisa e de mina, com o enfoque indo da geologia ao produto beneficiado. Consequentemente, deve-se adotar adequados modelos técnicos e organizacionais, de modo a melhor se aliar o bom aproveitamento de recursos minerais à satisfação do lucro e da qualidade. Ademais, é importante efetuar, periodicamente, reavaliações para se confrontar resultados com expectativas e rever metas, políticas e instrumentos à medida que novas demandas surgem (garantia da qualidade total, por exemplo).

ENERGIA NUCLEAR

O homem utiliza as fontes de energia de modo limitado e com caráter altamente predatório. A utilização em grande escala ocorre, principalmente, na queima de combustíveis fósseis e na exploração do potencial hidrelétrico. Em escala menor, estão o uso direto da energia armazenada nas plantas (lenha, carvão, álcool, etc.) e o uso da energia eólica e da energia nuclear (fissão). Em escala ínfima, ressaltam-se a energia geotérmica (fontes quentes), as marés e correntes e há, ainda, a perspectiva da utilização da energia solar de forma direta ou indireta de modo racional, da fusão nuclear e da energia dos vulcões.

A energia elétrica é fator essencial para assegurar o crescimento econômico do Brasil e a qualidade de vida da sua população. O consumo de energia *per capita* é um dos melhores indicadores de desenvolvimento econômico e social de um país ou região. Eletricidade significa lazer, educação, saneamento e saúde.

Porém, os recursos hídricos disponíveis nas proximidades dos principais centros consumidores estão se esgotando. E é cada vez mais difícil o licenciamento ambiental dos aproveitamentos hídricos remanescentes e economicamente viáveis. Entretanto, a demanda de energia continua crescente. Este quadro confere às usinas nucleares um importante papel na matriz energética nacional.

A opção nuclear torna-se ainda mais atraente quando se considera que o país possui uma grande reserva de urânio, o que nos garante a independência no suprimento de combustível. As usinas Angra 1, Angra 2 e outras em projeção serão providas pela URA (Caetité-BA) e pela jazida fósforo-uranífera de Santa Quitéria/Itaiaia – Ceará, cujo complexo minero-

-industrial encontra-se em fase de licenciamento e implantação. A Central Nuclear de Angra dos Reis, também denominada, merecidamente, Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, é constituída pelo conjunto das usinas nucleares Angra 1 e Angra 2, em operação e pela Angra 3, em construção, de propriedade da Eletronuclear, subsidiária das Centrais Elétricas Brasileiras - Eletrobras.

Em 1998, o Conselho Mundial de Energia recomendou aos governos e às indústrias o apoio ao uso da energia nuclear como elemento fundamental para o atendimento da crescente demanda à energia elétrica, combatendo ao mesmo tempo, o aquecimento global. A seção Latino-Americana da Sociedade Nuclear Americana, por sua vez, constata que a energia nuclear utilizada para a produção de eletricidade não resulta na emissão de qualquer gás do efeito estufa (não produz CO₂) e não é causador de chuva ácida. A experiência de diversos países indica que a energia nuclear é segura e confiável e não polui o meio ambiente.

Um rigoroso controle de qualidade garante que estruturas, sistemas e componentes, relacionados com a segurança mantenham os padrões de qualidade especificados no projeto de uma usina nuclear. Inspeções e auditorias são feitas continuamente durante o projeto e a construção e, posteriormente, durante a operação. A Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN é o órgão que normatiza e fiscaliza a atividade nuclear no Brasil. A Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA, órgão da ONU, regulamenta rigorosamente a questão nuclear, no mundo.

Apesar de sua complexidade tecnológica, o funcionamento de uma usina nuclear é fácil de compreender. O princípio é semelhante ao de uma usina térmica convencional, onde o calor gerado pela combustão do carvão, do óleo ou do gás vaporiza a água em uma caldeira (este vapor movimenta uma turbina, à qual está acoplado um gerador, produzindo a energia elétrica). Na usina nuclear, o calor é produzido pela fissão do urânio no núcleo do reator.

O sistema PWR (reator utilizado nas usinas brasileiras; sendo o mais seguro e o mais usado mundialmente) é constituído por três circuitos: primário, secundário e de água de refrigeração. A água do circuito primário é aquecida pelo calor decorrente da fissão do urânio no reator, chegando a uma temperatura de aproximadamente 320° C. Em seguida, a água passa por tubulações até o gerador de vapor, onde vaporiza a água do circuito secundário sem, no entanto, entrar em contato com ela. O vapor resultante vai acionar a turbina, que movimentará o gerador e produzirá eletricidade (Figura 1).

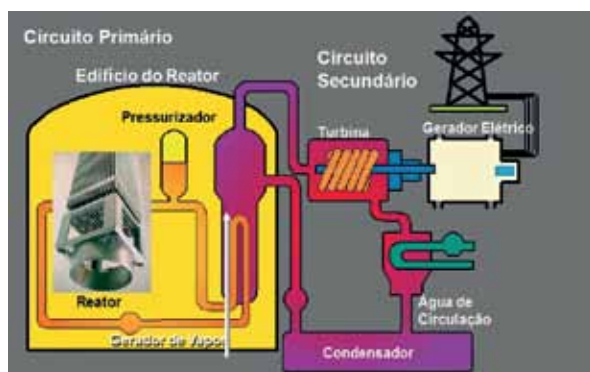


Figura 1 Diagrama Esquemático de uma Usina Nuclear PWR (Fonte: INB, 2008).

Atualmente, a utilização da energia nuclear responde por 11% do total da energia elétrica produzida no mundo (existem 435 usinas em funcionamento e outras 71 estão em construção) (WNA, 2012) e evita a emissão de cerca de 2,5 bilhões de toneladas de CO₂ por ano. Ademais, as usinas nucleares requerem pequenas áreas para a sua instalação, podendo ser construídas próximas aos grandes centros consumidores e evitando a degradação do meio ambiente.

PARTICIPAÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

As usinas Angra 1 e 2 (operadas pela Eletronuclear) geram o equivalente a 50% do consumo de energia do Estado do Rio. Com Angra 3 (entrada em operação prevista para 2018), a quantidade de energia total produzida (3.400 MW) vai dar para abastecer 80% do Estado, correspondendo da ordem de 3% da energia gerada no Brasil. O Brasil tem cerca de 115 mil MW instalados. Quando se chegar a 180 mil MW instalados, o que vai acontecer em 15 a 20 anos, considera-se que cerca de 30 mil MW deveriam ser (embora improvável) de origem nuclear, alcançando uma participação substancialmente maior na matriz energética brasileira.

Com o desenvolvimento econômico e social, a utilização de energia em um país como o Brasil vai aumentar sempre. E isso já vem acontecendo: entre os anos de 1940 e 1970, a população do Brasil dobrou, mas o consumo de energia cresceu cinco vezes! Passados outros 30 anos, até o ano 2000, a população não chegou a dobrar de novo, mas o consumo de energia cresceu três vezes! O Brasil deve chegar perto do consumo de energia dos países ricos em breve. Para se ter uma ideia, em 2008 cada brasileiro usou um terço da energia dos europeus, em média. Quer dizer que vamos precisar de

mais energia, devendo-se contar, cada vez mais, com incremento da energia nuclear (expansão do parque nucleoeletrônico). A demanda total de energia de 2016 deverá crescer entre 3 e 4%.

Portanto, é preciso que se parta decisivamente para construção de quatro a oito usinas nos próximos vinte anos (conforme, aliás, já incluído no Plano Nacional de Energia - PNE 2030 e também, originalmente, no antigo Programa Nuclear Brasileiro, que previa a construção de oito usinas para décadas passadas). O Programa deve ser reformulado à luz das necessidades desenvolvimentistas/sociais e condições econômico-financeiras de investimento. Atualmente, o Ministério de Minas e Energia – MME, através da Empresa de Pesquisa Energética – EPE, está elaborando o PNE 2050, mas os resultados já aprovados se restringem à demanda de energia, não considerando, ainda, a oferta.

O Brasil domina a tecnologia que transforma urânio em combustível, conforme o Ciclo do Combustível Nuclear (constituído pelas seguintes etapas: mineração e produção de concentrado de urânio; conversão; enriquecimento isotópico; produção de pó de UO₂; fabricação de pastilhas; fabricação de elemento combustível; geração de energia), sendo possuidor de grande reserva de urânio (detém autossuficiência). Apenas Brasil, Estados Unidos, Rússia, China e Índia possuem essa combinação estratégica. Curiosamente, há de se considerar que um elemento combustível com 530 quilos de urânio tem capacidade para o suprimento de energia elétrica a 42.000 residências médias durante um mês. Para fornecimento a igual número de residência, no mesmo período, seriam necessárias cerca de 5.200 toneladas de petróleo ou 13.000 toneladas de carvão (equivalência energética).

REFERÊNCIAS

- INB-Indústrias Nucleares do Brasil. *Urânio*. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/>>. Acesso em 05 de outubro de 2015.
- MATOS, E.C. Prospecção, Pesquisa e Beneficiamento de Urânio no Brasil. In: *Anais VI Congresso Geral de Energia Nuclear*. Rio de Janeiro – ABEN, 1996.
- MATOS, E.C. Sustentabilidade das Atividades Mineiras no Semiárido da Serra Geral, do Estado da Bahia – O Exemplo de Lagoa Real / Caetité. In: RIBEIRO, A. de F; LEÃO I. I *Seminário da Sustentabilidade Ambiental de Mineração*. Salvador. Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração, 2003. p. 49-59.
- MATOS, E.C. Uranium Concentrate Production at Caetité – BA, Brazil. In: *Anais International Symposium Uranium Production & Raw Materials for the Nuclear Fuel Cycle – Supply and Demand, Economics, the Environment and Energy Security*. Viena, Áustria. International Atomic Energy Agency - IAEA, 2005. p. 133-137.
- MME - Ministério de Minas e Energia. Energia Nuclear: Brasil e Mundo. In: *Boletins de Energia*. Edição 17/09/2015. Brasília: Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia/SPE/MME. 2015.
- RAMOS, J.R. de A.; MACIEL, A.C. *Atividades de Prospecção de Urânio no Brasil 1966-1970*. Ministério das Minas e Energia – MME/Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, Rio de Janeiro, Boletim, n. 3, 1974.
- RAMOS, J.R de A.; MACIEL, A.C. *Prospecção de Urânio no Brasil 1970 – 1974*. Ministério das Minas e Energia – MME/Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, Rio de Janeiro, Boletim, n. 4, 1974.
- RAPOSO, C.; MATOS, E.C. O Prospecto Uranífero Rio Cristalino – Pará. In: *Anais V Congresso Geral de Energia Nuclear*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Energia Nuclear – CGEN, 1994. p. 367-369.
- WNA-World Nuclear Association. *Uranium, Electricity and Climate Change*. 2012. Disponível em: <<http://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/uranium,-electricity-and-climate-change.aspx>>. Acesso em 05 de outubro de 2015.

Distribuição, reservas e características dos depósitos de carvão no Brasil – implicações para a contribuição na matriz energética, meio ambiente, sustentabilidade e recursos humanos

Wolfgang Kalkreuth

Priscila Lourenzi

Núcleo de Estudos de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo,
Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eduardo Osório

Lasid – Laboratório de Siderurgia – Centro de Tecnologia/Escola de Engenharia,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

Depósitos de carvão no Brasil ocorrem em praticamente todas as bacias sedimentares do país, cujas idades se distribuem desde os depósitos de linhito no Terciário da Bacia do Solimões, até o carvão de idade Permiano da Bacia do Paraná. As reservas dos depósitos de carvão economicamente importantes da Bacia do Paraná são de 32,3 bilhões de toneladas, das quais 89,2% estão localizadas no Rio Grande do Sul, 10,4% em Santa Catarina, 0,3% no Paraná e 0,1% em São Paulo. Conforme a “Classificação Internacional de Carvões *in-situ*” o *rank* do carvão destes depósitos varia entre o carvão sub-betuminoso para o carvão betuminoso. A composição dos grupos de macerais é altamente variável, geralmente vitrinita > inertinita > liptinita. Elevados conteúdos de matéria inorgânica associada com o carvão classificam a maioria das camadas como carvão de categoria inferior (30 – 50% cinza). Em termos de recursos energéticos o carvão mineral representa 74% dos recursos nacionais, apesar disso o seu consumo é modesto e ocupa apenas 2,6% na geração de energia elétrica. A produção de carvão em 2013 foi de 8,6 milhões de toneladas, localizando-se nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Todo o carvão atualmente produzido no país é do tipo “carvão vapor” ou “energético”, sendo majoritariamente utilizado na geração de eletricidade em usinas da região Sul do Brasil, muitas das quais são antigas e apresentam um baixo rendimento térmico, além de elevada emissão de gases poluentes. Em função disso há necessidade da implementação de um programa de expansão e modernização das usinas brasileiras. No Brasil, o principal uso do carvão é na siderurgia, com importação anual de 18 milhões de toneladas de carvão tipo metalúrgico. Para que seja viabilizado o aumento da participação do carvão na geração de energia e também para retomada do uso na siderurgia é fundamental esforços para a redução das emissões de CO₂ em todos os processos de conversão do carvão.

Palavras-chave Carvão no Brasil. Distribuição e reservas. Características e uso. Contribuição na matriz energética.

INTRODUÇÃO

Depósitos de carvão no Brasil (*on shore*) ocorrem em praticamente todas as bacias sedimentares do país (Figura 1), cujas idades se distribuem desde os depósitos de linhito no Terciário da Bacia do Solimões, no norte, até os depósitos de carvão de idade Permiano da Bacia do Paraná, no sul (CPRM, 2005). De acordo com os dados compilados pela CPRM (2005), as informações disponíveis sobre as ocorrências de carvão no Norte, Nordeste e Centro-oeste do país (Tabela 1, Figura 1 - números de 1 a 8) são bastante limitadas. Na maioria desses locais, uma exploração geológica adicional é necessária para definir a distribuição, qualidade e reservas de carvão.

Os carvões mais explorados e estudados no Brasil são os depósitos de carvão economicamente importantes do Permiano da Bacia do Paraná (Figura 1). As primeiras ocorrências foram assinaladas, em 1795, na área de Curral Alto, atualmente município de Minas do Leão, e que estão sendo minerados desde 1856 na Serra do Herval, atualmente conhecido como Mina do Faxinal (OSÓRIO, 2012). Para estes depósitos as reservas totais (medidas, estimadas e inferidas) são de 32,3 bilhões de toneladas (Tabela 1), das quais 89,2% estão localizadas no Rio Grande do Sul, 10,4% em Santa Catarina, 0,3% no Paraná e 0,1% em São Paulo (DNPM, 2000). Cabe ressaltar que as últimas prospecções geológicas abrangentes foram realizadas pelo DNPM no início da década de 80. A distribuição das principais



Figura 1 Mapa do Brasil com identificação dos depósitos de carvão (Fonte: CPRM, 2005).

Características das camadas de carvão da Bacia do Paraná

As camadas de carvão possuem características incluindo as suas propriedades tecnológicas, controladas principalmente por três parâmetros: diferenças na classificação (*rank*) do carvão, causadas por alteração da matéria orgânica, devido a processos geológicos como, subsidência e aumento da temperatura; conteúdo de cinzas, que representa a percentagem de matéria mineral contida no carvão; e composição petrográfica determinada por análise dos grupos de macerais, os quais definem a proporção de componentes reativos e inertes na matéria orgânica do carvão.

Nos últimos anos, o Núcleo de Estudos de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo, Instituto de Geociências (UFRGS) tem realizado uma série de estudos regionais sobre os depósitos de carvão da Bacia do Paraná, incluindo a avaliação dos carvões de Candiota, Leão-Butiá, Chico-Lomã e Santa Terezinha no Rio Grande do Sul, da jazida Sul Catarinense em Santa Catarina e no depósito de carvão de Figueira, no Paraná (KALKREUTH et al., 2006, 2008, 2010, 2013a,b; PUTTI, 2012; LOURENZI; KALKREUTH, 2014; SIMÃO; KALKREUTH, 2015). As camadas de carvão destes depósitos foram classificadas de acordo com a “Classificação Internacional de carvões *in-situ*” (UN-CE, 1998), pela qual o *rank* do carvão (Figuras 3 e 4) é definido por valores de poder calorífico (MJ/kg) para carvão de baixo *rank* e refletância da vitrinite para carvão de alto *rank* e antracito ($> 0,6\%$ Ro). A composição petrográfica da matéria orgânica é expressa

em um diagrama ternário, mostrando as proporções dos grupos de vitrinite, liptinite e inertinite. O teor de matéria mineral é expresso como conteúdo de cinzas (% em peso), variando do carvão de categoria superior ($<10\%$ de conteúdo de cinzas) para carvão de categoria muito inferior (30-50% de conteúdo de cinzas). De acordo com esta classificação, os valores $> 50\%$ de conteúdo de cinzas são considerados como uma rocha carbonosa ao invés de carvão (Figuras 3 e 4).

Aplicando esse conceito para os carvões da Bacia do Paraná, pode-se demonstrar que há uma tendência regional de nordeste para sudoeste na classificação do *rank* do carvão, desde carvão betuminoso nas jazidas Sul Catarinense e Santa Terezinha (Figura 3A e 3B) para o carvão sub-betuminoso das jazidas de Leão-Butiá e Candiota (Figura 4A e 4B). Independente dos níveis de classificação de *rank*, todos os depósitos de carvão têm em comum níveis elevados de matéria inorgânica associada com o carvão, sendo a maioria das camadas classificadas como carvão de categoria inferior e aqueles com conteúdo de cinzas $< 50\%$ em peso são classificados como folhelhos carbonosos (Figuras 3 e 4). A composição dos grupos de macerais dos carvões da Bacia do Paraná é altamente variável, apresentando, geralmente, quantidades baixas a moderadas no conteúdo de liptinite $< 20\%$ Vol%, conteúdos de vitrinite em geral $> 50\%$ Vol%, exceto para camadas como o Banco Louco em Candiota, a camada Bonito em Santa Catarina e uma série de camadas de carvão na jazida de Santa Terezinha, onde os conteúdos de inertinite são superiores aos de vitrinite (Figuras 3 e 4).

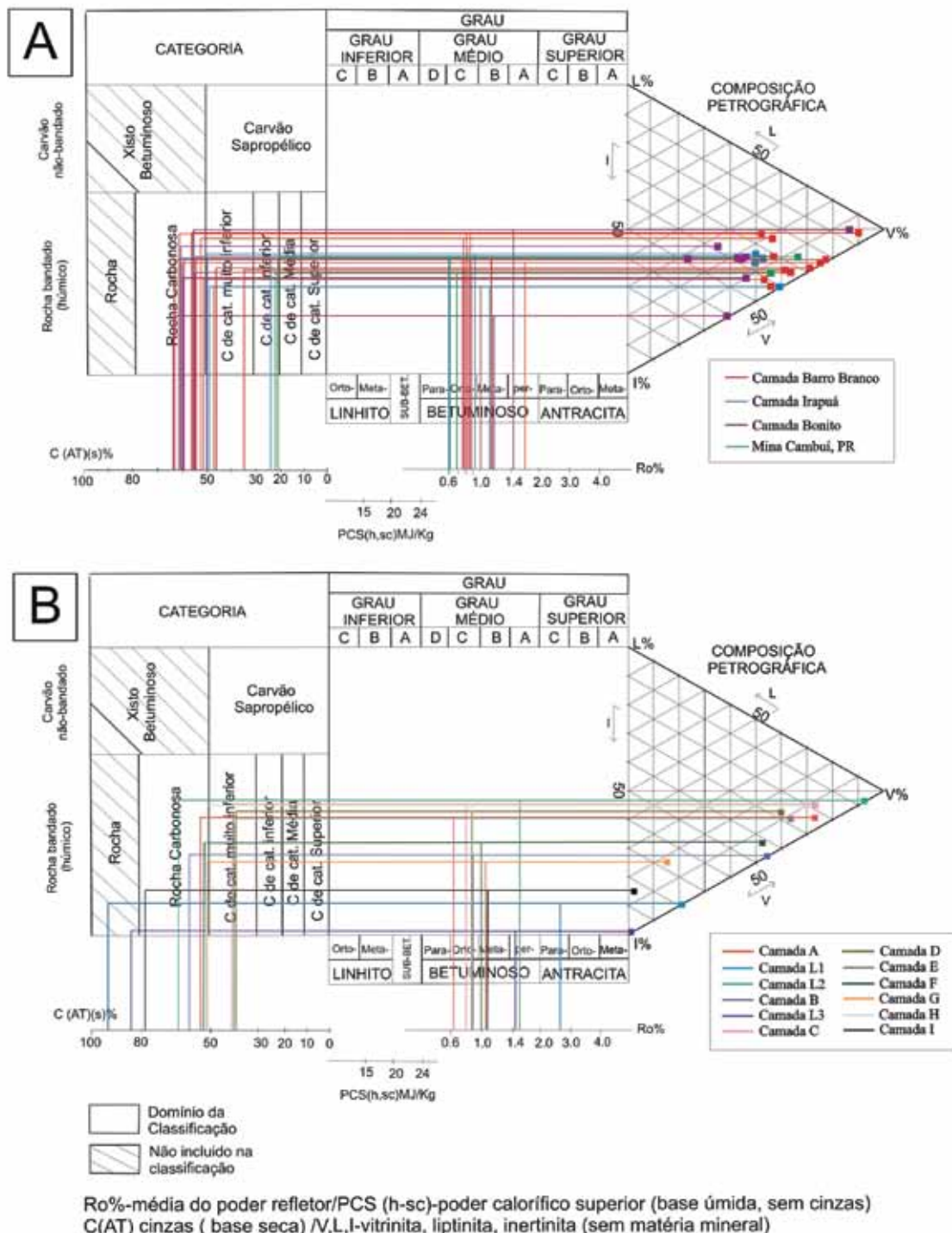


Figura 3 Classificação das camadas de carvão em A) Jazida Sul Catarinense (SC) e Mina Cambuí (PR); B) Jazida Santa Terezinha (RS). Nota: Valores de reflectância > 1,0% Ro na Jazida Santa Terezinha indica alteração termal secundária do carvão devido ao contato com intrusões de diabásio (Fonte: LOURENZI, 2011, 2014; LOURENZI; KALKREUTH, 2014; KALKREUTH et al., 2010; SIMÃO; KALKREUTH, 2015).

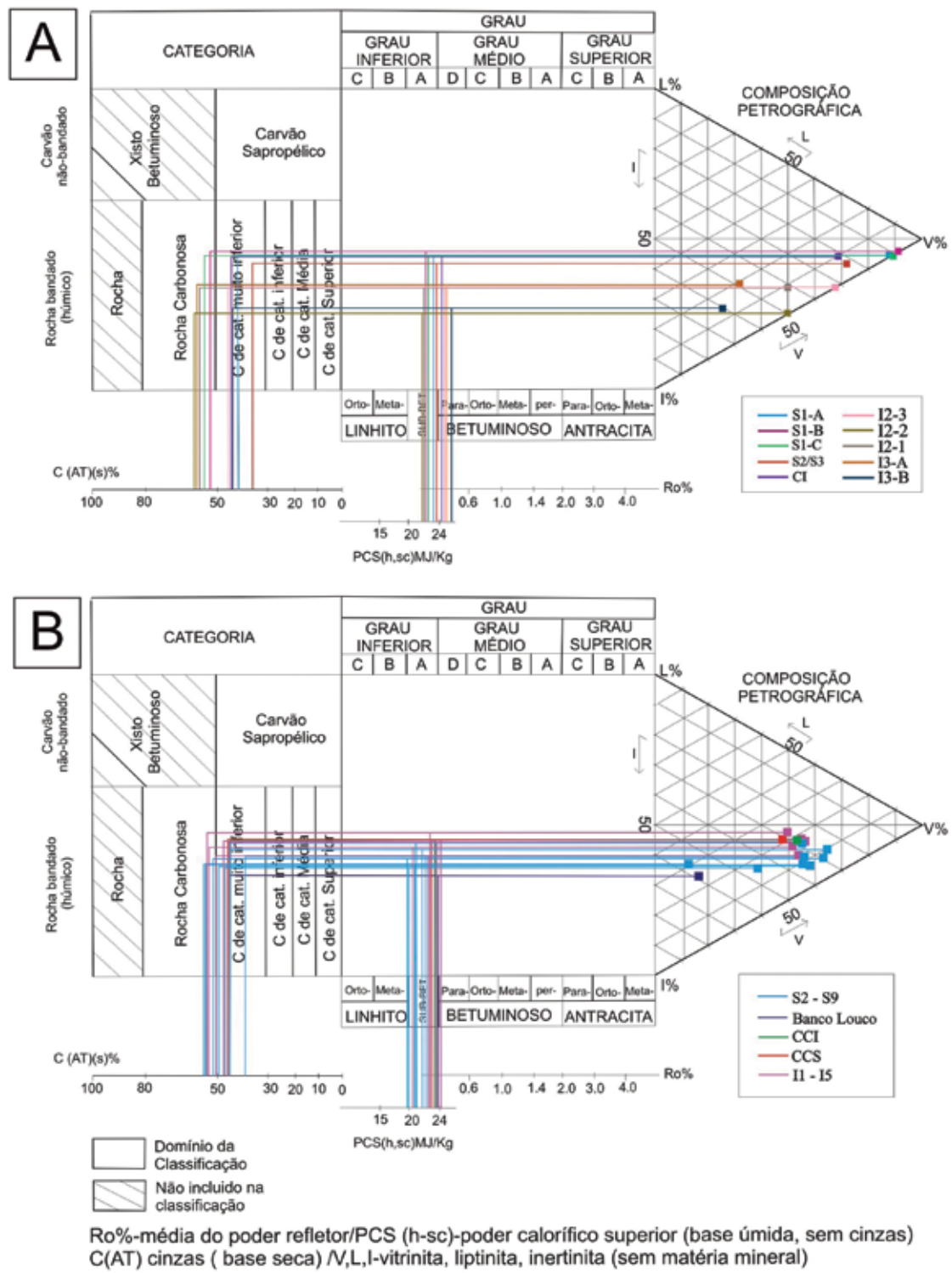


Figura 4 Classificação das camadas de carvão em A) Mina São Vicente Norte, Jazida Leão-Butiá (RS) e B) Candiota (RS) (Fonte: KALKREUTH et al., 2006, 2013; OLIVEIRA, 2013; KOCHHANN, 2010; PUTTI, 2012).

Exploração atual e uso do carvão

Atualmente, os carvões Permianos estão sendo minerados em uma série de minas de superfície nas jazidas de Candiota, Iruí e Leão-Butiá no Rio Grande do Sul, enquanto nas jazidas Sul-Catarinense, em Santa Catarina, e em Figueira, Paraná, a mineração é realizada principalmente em minas subterrâneas. Atualmente, o carvão é quase inteiramente utilizado para a combustão (geração de eletricidade) em usinas instaladas na região Sul do Brasil.

MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Em termos de recursos energéticos o carvão mineral representa 74% dos recursos nacionais com $7,04 \times 10^9$ tep (toneladas equivalentes de petróleo). Em segundo lugar encontra-se o petróleo com $2,02 \times 10^9$ tep, conforme dados da EPE/MME (Tabela 2) (EPE, 2014). Apesar de o Brasil possuir uma expressiva reserva de carvão mineral, o seu consumo é modesto e ocupa apenas a 26ª posição no ranking mundial.

Tabela 2 Recursos e Reservas Energéticas Brasileiras, não incluindo os demais recursos energéticos renováveis.

Recursos	Unidades	Total	Equivalência Energética 10^3 tep
Petróleo	10^3 m ³	4.798.620	2.087.369
Gás Natural	10^6 m ³	839.482	430.921
Carvão Mineral	10^6 t	32.285	7.029.831
Hidráulica	GW	135	*81.840
Energia Nuclear	U_3O_8 t	309.370	1.254.681

*valor anual para fator de capacidade de 55%.
(Fonte: EPE, 2014)

A matriz de geração de eletricidade brasileira é constituída predominante por recursos renováveis, sendo a geração hidráulica responsável por 70% da oferta interna de energia elétrica. Verifica-se na Figura 5 da EPE (2014) que a participação do carvão mineral na geração de energia elétrica no Brasil é de apenas 2,6%. As usinas termelétricas a carvão mineral tradicionalmente foram instaladas nos três Estados da região sul do Brasil e são abastecidas por minas de carvão localizadas nas suas proximidades.

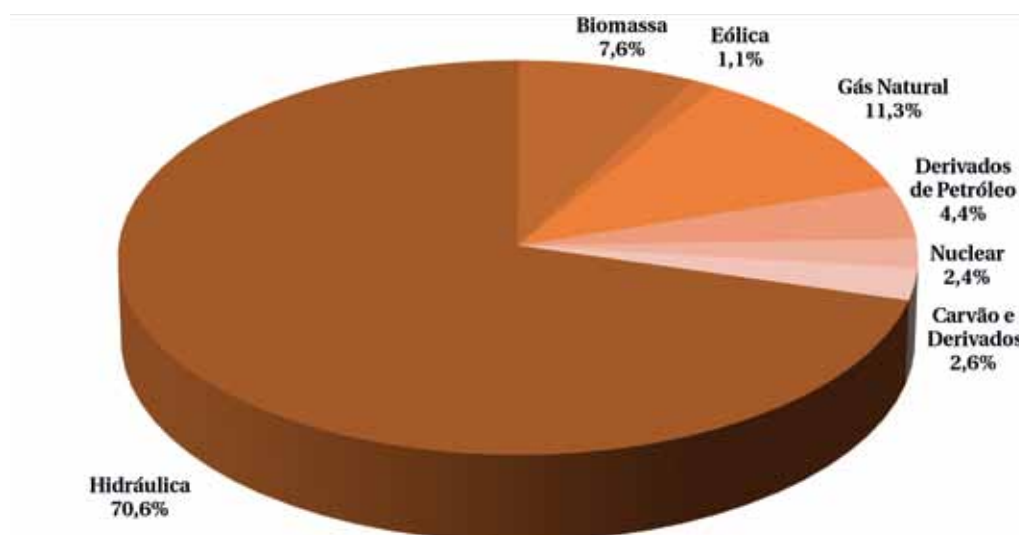


Figura 5 Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte (Fonte: EPE, 2014)

O parque termelétrico a carvão mineral no sul do país é constituído pelas seguintes usinas:

- Charqueadas, Potência: 72 MW – Charqueadas (RS);
- Presidente Médici A, B e C, Potência: 796 MW, Candiota (RS);
- Jorge Lacerda I, II, III e IV, Potência: MW 852, Capivari de Baixo (SC);
- Figueira, Potência: MW 20, Figueira (PR).

Recentemente, como será comentado mais adiante, foi iniciada a construção de termelétricas a carvão na região Nordeste do país utilizando carvões importados.

A produção de carvão mineral brasileiro (vendável) em 2013 foi de 8,6 milhões de toneladas (SIECESC, 2014), sendo os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina os principais produtores. Todo o carvão mineral atualmente produzido no Brasil é do tipo “carvão vapor” ou “energético” e se caracteriza por um baixo grau de carbonificação, e um elevado teor de matéria mineral (Figuras 3 e 4), além de um variado teor de enxofre. Seu uso é, predominantemente (cerca de 82%), nas usinas termelétricas. O restante é usado para geração de calor nas indústrias de papel e celulose, petroquímica, cimento entre outras.

Ao contrário do resto do mundo, em que o principal uso do carvão mineral é na geração de energia elétrica, no Brasil, a principal aplicação é na siderurgia para fabricação de coque e uso direto no alto-forno para produção de ferro-gusa e posteriormente o aço. Para esta finalidade, o Brasil importa anualmente cerca de 18 milhões de toneladas de carvão tipo metalúrgico principalmente da Austrália, Estados Unidos, Canadá, Rússia e Colômbia (DNPM, 2014). O carvão importado também é usado industrialmente na mineração/ pelotização de minério de ferro e metalurgia de não ferrosos. Até 1991 as usinas brasileiras eram obrigadas a consumir o carvão nacional coqueificável da camada Barro Branco de Santa Catarina em misturas com carvões importados para fabricação de coque siderúrgico. Com a não obrigatoriedade da aquisição pelas usinas nacionais esse carvão não foi mais consumido e a fração metalúrgica para uso siderúrgico não foi mais produzida.

A Figura 6 mostra que a principal fonte de oferta interna de energia no Brasil é o petróleo e seus derivados com uma participação de 39,3%, seguido por derivados da cana (16,1%), gás natural (12,8%) e hidráulica (12,5%), lenha e carvão vegetal (8,3%). A participação do carvão mineral na matriz energética brasileira é de 5,6% (16.478×10^3 tep).

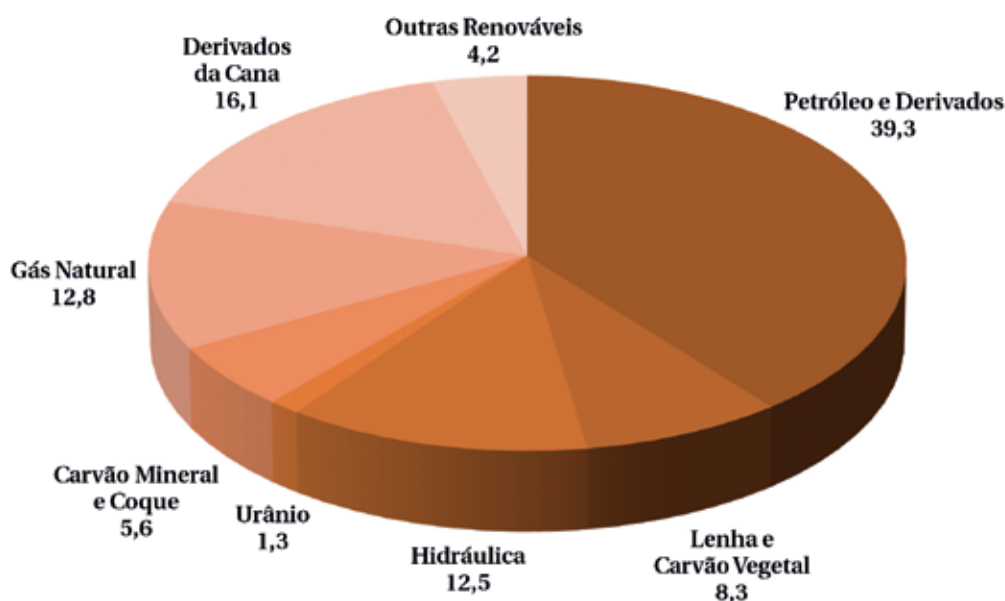


Figura 6 Oferta Interna de Energia (Fonte: EPE, 2014).

PERSPECTIVA FUTURA DA MATRIZ ENERGÉTICA

Perspectiva do uso de carvão vapor na geração de termoelectricidade

A geração termelétrica é fator de estabilidade e segurança do sistema elétrico e deveria representar uma parcela significativa da matriz elétrica nacional, com o emprego das grandes reservas de carvão disponíveis. Além disso, a geração termelétrica a carvão é indutora fundamental para que seja viável economicamente produzir uma parcela de carvão metalúrgico para atender o setor siderúrgico brasileiro (CGEE, 2012).

A ênfase da política da energia hidrelétrica e, mais recentemente, das fontes alternativas de energia limitou o aproveitamento das reservas de carvão durante as últimas décadas. Entretanto, nos últimos anos, o carvão mineral nacional vem reconquistando o seu espaço no mercado de energia devido à necessidade de socorrer o sistema nacional de energia elétrica geradas por recursos hídricos, atualmente escassos e, assim, garantir a eficiência energética nos Estados do Sul do país (DNPM, 2014). Apesar das dificuldades oriundas dos baixos preços oferecidos nos leilões de energia, novos projetos de usinas termelétricas foram aprovados no Sul e também no Nordeste do país. Na região de Candiota, Estado do Rio Grande do Sul, foi aprovado a usina Pampa Sul com potência de 340 MW. No Ceará já se encontra em operação a Usina Termelétrica do Porto de Pecém. Quando toda a usina estiver na plenitude de produção de energia vai gerar 720 MW. No Maranhão está em fase final de construção a Usina de Itaqui com potência de 360 MW. Essas usinas, inicialmente, vão operar com carvão importado da Colômbia. A atual falta de logística apropriada de transporte e o alto teor de cinzas do carvão produzido no sul do país inviabiliza o seu emprego em outras regiões do país.

Atualmente, a capacidade instalada das 12 termelétricas a carvão existentes no país é de 3.074 MW. As usinas mais antigas na região Sul apresentam um baixo rendimento térmico, além de elevada emissão de gases poluentes. Além da usina de São Jerônimo, desativada no final de 2014, algumas outras já têm previsão de desativação. Há necessidade da implementação de um amplo Programa de Modernização de Usinas Térmicas (ZANCAN, 2014).

Há uma expectativa de o carvão voltar a participar do Leilão de Energia da ANEEL para contratação de fornecimento de energia, como já ocorreu no final de 2014. Para isso, haverá a necessidade de aumentar o volume de produção do carvão mineral pelas carbo-

níferas para atender as exigências do leilão. Diversos projetos de implantação de usinas térmicas nos Estados do sul do país estão sendo elaborados. Se todos esses projetos forem concretizados haverá um acréscimo de potência de 3GW, o que necessitará uma produção de 14 milhões de toneladas de carvão nacional.

Perspectiva do uso de carvão metalúrgico na siderurgia

O carvão mineral, coqueificável ou energético, é um redutor/combustível fundamental para a produção de aço. Isso significa que, para produzir aço, o Brasil vai necessitar de carvão mineral e vai continuar importando essa matéria-prima, pois a indústria siderúrgica integrada com alto-forno a coque está em expansão. Significativos esforços estão sendo feitos para diminuir a geração de CO₂/t de aço produzido. Otimização de processos e novas tecnologias são focadas na etapa de produção de ferro primário (redução de minério de ferro), que é a responsável por 70% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) na siderurgia.

Estudos estão sendo feitos para inserir novamente o carvão nacional nas misturas com carvões importados para uso siderúrgico (OSÓRIO, 1997; OSÓRIO et al., 2006; MACHADO et al., 2010). O principal gargalo técnico para a produção de carvão nacional com características aceitáveis para a siderurgia é a sua baixa eficiência no beneficiamento para a redução de cinzas e enxofre. Para que seja retomada a utilização de carvão nacional na siderurgia, torna-se necessário que um estudo de viabilidade econômica seja feito levando em consideração, além dos aspectos técnicos, a escala de produção da mina, o uso da fração térmica (carvão vapor) gerada no beneficiamento, os investimentos necessários para revitalizar a infra-estrutura de portos e ferrovias e, finalmente, os custos dos carvões produzidos em comparação com os carvões similares importados (CGEE, 2012).

AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE

No Brasil, as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) relacionadas à agropecuária e mudança do uso da terra representam mais da metade do total de emissões. As emissões referentes à geração de energia elétrica no Brasil representam apenas 1,4%. Com a perspectiva de aumento da geração de energia térmica com carvão e com a diminuição do desmatamento, a participação das emissões referentes à queima do carvão deverá aumentar. Iniciativas para reduzir a emissão de CO₂ pelas UTEs devem ser implementadas. As seguintes

medidas técnicas deverão ser tomadas para minimizar tanto as emissões de CO₂ quanto às emissões de gases poluentes e particulados:

- melhoria da eficiência da geração térmica. Passar da atual eficiência de 28 para 36% (eficiência das novas usinas térmicas européias), pois para cada 1% de aumento de eficiência térmica há uma redução de 2,5% de emissão de CO₂;
- redução de particulados e gases poluidores (SO_x), através de sistema de captação da poeira e sistemas de dessulfuração;
- incentivo à construção de pequenas centrais térmicas de co-geração com biomassa;
- aproveitamento dos coprodutos da combustão, notadamente na produção de cimento e fertilizantes;
- acelerar a realização do Programa de Modernização de Usinas Térmicas até 2017;
- Estruturar uma política industrial para a cadeia do carvão (gasificação e geração térmica, carbo-química).

Os índices de emissões de gases de efeito estufa associados ao carvão devem ser substancialmente reduzidos mediante a adoção de tecnologias de carvão limpo (CCT). Deve-se investir em desenvolvimento de tecnologias de captura de CO₂ para aplicação em médio prazo, tanto ao parque termelétrico nacional, como a demais setores com altos índices de emissões, como siderurgia, petroquímica e cimenteiras. Com essas medidas, o CO₂/KWh do Brasil que está entre os menores do mundo, continuará baixo ao longo dos próximos anos.

RECURSOS HUMANOS

Através do *Roadmap* Tecnológico para Produção, Uso Limpo e Eficiente do Carvão Mineral Nacional organizado pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), foi constatado uma situação atual de baixa integração empresa/academia, gerando desconhecimento das áreas carentes de recursos humanos e a não fixação desses recursos ao longo do processo. Foram propostas ações para fortalecer a política de Recursos Humanos na área de extração e usos de carvão para fins energéticos e industriais, que são listadas a seguir.

- Alinhar as demandas de empresas com o desenvolvimento acadêmico;
- Criar projetos estruturantes de médio e longo prazo envolvendo empresas, centros de pesquisa e universidades nacionais e internacionais;
- Incentivar o corpo docente das instituições de ensino para realizarem consultoria no setor produtivo;
- Criar laboratórios regionais compondo a rede da EMBRAPPI e SIBRATEC para desenvolvimento de pesquisa aplicada de médios e longos prazos em conjunto com as empresas;
- Estabelecer iniciativas de ampliação de parcerias internacionais com universidades e instituições de pesquisa nacionais;
- Aumentar a eficiência da política de PD&I das empresas, criando mecanismos que propiciem melhorias e otimização em produtos e processos industriais carboníferos, assim como especialização, mestrado e doutorado;
- Conhecimento do cenário completo de recursos humanos nas áreas de aplicação do carvão mineral e das tecnologias limpas;
- Ampliação do número de alunos de escolas técnicas, de graduação e de pós-graduação interessados no carvão mineral;
- Fixação dos recursos humanos formados ao longo desse período para não perdê-los para outras áreas;
- Ampliação do número de projetos de pesquisa que se tornem produtos comercializáveis, aumentando o depósito de patentes;
- Ampliação do número de mestres e doutores nas indústrias.

Em 2006 foi criada a Rede de Pesquisa de Desenvolvimento Tecnológico e de Inovação em Carvão (Rede Carvão) no âmbito do Ministério de Ciência e Tecnologia. Atualmente a Rede Carvão compreende mais de 200 membros, distribuídos em mais de 40 instituições, incluindo universidades, centros de pesquisa, agências governamentais e setor industrial. De 2007 até o presente, as universidades pertencentes à Rede Carvão formaram cerca de 50 mestres e doutores, além de produzirem diversos Trabalhos de Conclusão de cursos de graduação nas áreas de Geologia, Engenharia e Química nas diferentes áreas de atuação da Rede (exploração, produção, conversão e aplicações e meio ambiente).

REFERÊNCIAS

- CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. *Roadmap Tecnológico para Produção, Uso Limpo e Eficiente do Carvão Mineral Nacional* - Horizontes em 2022 e 2035, 2012.
- CPRM-Serviço Geológico do Brasil. 2005. *Carvão no Brasil*. Apresentação da CPRM no Seminário sobre o atual conhecimento de depósitos de carvão no Brasil. Sindicato Indústria de Extração Carvão, Estado Santa Catarina, Criciúma, SC, 22 de fevereiro de 2005.
- DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. *Informativo Anual da Indústria Carbonífera - 2000*. Ministério de Minas e Energia, Inf. An. Carbonif. Brasília, Ano XV, 217 p. Jul. 2000.
- DNPM - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. *Sumário Mineral 2014*. DNPM: Brasília, 2014.
- ENEVA. *Usina Termelétrica Itaipu*. Disponível em: <<http://www.eneva.com.br/pt/nossos-negocios/geracao-de-energia/empreendimentos/ute-itaqui>>. Acesso em 22 de maio de 2015.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional 2014*. Rio de Janeiro: EPE. 2014.
- HOLZ, M.; KALKREUTH, W. Sequence stratigraphy and coal petrology applied to the Early Permian coal-bearing Rio Bonito Formation, Paraná Basin, Brazil. In: PASHIN, J.C.;
- GASTALDO, R.A. (Eds.). *Sequence Stratigraphy, Paleoclimate and Tectonics of Coal-Bearing Strata: AAPG Studies in Geology*, 51, p. 147-167. 2003.
- KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; KERN, M.; MACHADO, G.; MEXIAS, A.; SILVA, M.; WILLETT, J.; FINKELMAN, R.B.; BURGER, H. Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, v. 68, p. 79-116. 2006.
- KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; LEVANDOWSKI, J.; KERN, M.; CASAGRANDE, J.; WENIGER, P.; KROOSS, B. The Coalbed Methane (CBM) Potential and CO₂ Storage Capacity of the Santa Terezinha Coalfield, Paraná Basin, Brazil – 3D Modelling, and Coal and Carbonaceous Shale Characteristics and Related Desorption and Adsorption Capacities in Samples from Exploration Borehole CBM001-ST-RS. *Energy, Exploration & Exploitation*, v. 31, n. 4, p. 485-527. 2013b.
- KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; MEXIAS, A.; BALBINOT, M.; LEVANDOWSKI, J.; WILLETT, J.; FINKELMAN, R.B.; BURGER, H. Depositional setting, petrology and chemistry of permian coals from the Paraná Basin: 2. South Santa Catarina Coalfield, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, v. 84, p. 213-236. 2010.
- KALKREUTH, W.; LUNKES, M.; OLIVEIRA, J.; GHIGGI, M.; OSÓRIO, E.; SOUZA, K.; SAMPAIO, C.; HIDALGO, G. The lower and upper coal seams of the Candiota Coalfield, Brazil - Geological setting, petrological and chemical characterization, and studies on reactivity and beneficiation related to their combustion potential. *International Journal of Coal Geology*, v. 111, p. 53-66. 2013a.
- KOCHHANN, L.M. *O Carvão das camadas superiores e inferiores da jazida de Candiota - RS: uma contribuição para sua caracterização química, petrológica e tecnológica visando seu potencial na geração de energia elétrica*. Trabalho de conclusão de curso. Instituto de Geociências, UFRGS, 81 p. 2010.
- LEVANDOWSKI, J.; KALKREUTH, W. Chemical and petrographical characterization of feed coal, fly ash and bottom ash from the Figueira Power Plant, Paraná, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, v. 77, p. 269-281. 2009.
- LOURENZI, P. *Avaliação do potencial de Coalbed Methane (Gás Natural) das camadas de carvão da Formação Rio Bonito, Maracajá-SC, Bacia do Paraná*. Trabalho de conclusão de curso, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 96. 2011.
- LOURENZI, P. *O potencial de geração CBM (Coalbed Methane) na jazida Sul Catarinense da Bacia do Paraná, Brasil: características petrográficas e químicas das camadas Barro Branco, Irupá e Bonito*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 74 p. 2014.
- LOURENZI, P.; KALKREUTH, W. O potencial de geração CBM (Coalbed Methane) na jazida Sul Catarinense da Bacia do Paraná, Brasil: características petrográficas e químicas das camadas Barro Branco, Irupá e Bonito. *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, n. 3, (sep. 2014), p. 471-491: il. 2014.
- MACHADO, J.; OSÓRIO, E.; VILELA, A.; BABICH, A.; SENK, D.; GUDENAU, H. Reactivity and Conversion Behaviour of Brazilian and Imported Coals, Charcoal and Blends in view of their Injection into Blast Furnaces. *Steel Research International*, v. 81, p. 9-16. 2010.
- OLIVEIRA, J.S. *Análise estratigráfica, petrologia e química orgânica aplicada nas camadas superiores, inferiores e Banco Louco na região de Candiota, Bacia do Paraná, RS, Brasil*. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 145 p. 2011.
- OSÓRIO, E. *Utilização de carvão da jazida de Chico-Lomã para a produção de coque*. Tese (Doutorado em Engenharia). PPGEM/UFRGS Porto Alegre: Escola de Engenharia, 132 p. 1997.
- OSÓRIO, E.; LOURDES ILHA GOMES, M.; VILELA, A.; KALKREUTH, W.; ALMEIDA, M.; BORREGO, A.; ALVAREZ, D. Evaluation of petrology and reactivity of coal blends for use in pulverized coal injection (PCI). *International Journal of Coal Geology*, v. 68, p. 14-19. 2006.
- OSÓRIO, R.G. *Carvão no mundo e na CRM*. CORAG – Companhia Rio-grandense de artes gráficas. Porto Alegre, RS. 127 p. 2012.
- PORTAL PECÉM. *Usina Termelétrica Energia Pecém*. Disponível em: <http://portalpecem.com.br/pg_obras_temeletrica.asp>. Acesso em 22 de maio de 2015.
- PUTTI, L. *Caracterização petrológica, geoquímica e maturação artificial de carvão da Mina São Vicente Norte, Jazida Leão-Butiá, Formação Rio Bonito, Bacia do Paraná, RS*. Trabalho de conclusão de curso, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 106 p. 2012.

-
- SIECESC. *Dados Estatísticos*. Criciúma, 2014. Disponível em: <<http://www.siecesc.com.br/>>. Acesso em 22 de maio de 2015.
- SIMÃO, G. *O Carvão da camada Bonito, jazida Sul Catarinense*: uma contribuição para a caracterização petrográfica, química e tecnológica. Trabalho de conclusão de curso, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 92 p. 2012.
- SIMÃO, G.; KALKREUTH, W. Petrographic and chemical characterization of the Bonito seam and its beneficiation products, South Santarina Coalfield-Brazil. *Energy, Exploration & Exploitation*, v. 33, n. 1, p. 75-90. 2015.
- SÜFFERT, T. Carvão nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. *Informe de Recursos Minerais*. 1997.
- UNECE - United Nations Economic Commission for Europe. *International Classification Of In-Seam Coals*. Committee on Sustainable Energy, Geneva. 41 p. 1998.
- ZANCAN, F.L. Carvão Mineral. *Palestra*: Associação Brasileira do Carvão Mineral – ABCM. 2015. Sindicato dos Engenheiros do RS-SENGE. Porto Alegre/RS - 18 de junho de 2015.



V

Ambiente e Sustentabilidade



Desafios sociais e ambientais da mineração no Brasil e a sustentabilidade

Célio Bermann

Instituto de Energia e Ambiente,
Universidade de São Paulo

RESUMO

O presente artigo analisa as atividades minerárias no Brasil e seus impactos socioeconômicos e ambientais. Na primeira parte é realizada uma contextualização histórica dos impactos ambientais da extração mineral no país. Na segunda parte são levantados os principais aspectos relacionados à mineração e o processo de licenciamento ambiental. Em particular, a mineração em terras indígenas é abordada na terceira parte do artigo. Na quarta parte o recente desastre ambiental na bacia do rio Doce, ocorrido em novembro de 2015 com o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão no município de Mariana (MG), é analisado tendo em vista a identificação das lições a serem aprendidas, no que se refere à segurança das barragens e questões relacionadas à responsabilização e penalização das empresas minerárias envolvidas. Finalmente, a quinta parte aponta proposições para que as atividades minerárias alcancem os princípios da sustentabilidade.

Palavras-chaves Impactos ambientais da mineração. Legislação ambiental. Sustentabilidade ambiental e mineração.

INTRODUÇÃO

A indústria extrativa mineral apresenta uma dúvida que deve ser superada para alcançar o desejável caráter sustentável. Por um lado, trata-se de um dos importantes setores da economia primária exportadora brasileira. Mas por outro, está entre as atividades antrópicas que mais causam impactos socioeconômicos e ambientais negativos, afetando muitas vezes de forma irreversível o território onde se realiza a mineração.

Existem duas classificações de impactos geradas pela atividade minerária: da área diretamente afetada e da região de influência. Na primeira ocorre modificação da paisagem pela extração do material e na segunda o impacto é caracterizado pelo depósito de estéril e rejeitos.

Muito embora estas consequências negativas sejam consideradas pela literatura sobre o tema como geograficamente limitadas, o recente desastre ambiental ocorrido em 05 de novembro de 2015 com o rompimento da barragem de rejeitos de mineração de Fundão, localizada no distrito de Bento Rodrigues (município de Mariana-MG) de propriedade da empresa Samarco Mineração S.A. demonstrou que os impactos socioeconômicos e ambientais podem extrapolar o local onde a mineração é realizada pois atingiu toda a bacia do rio Doce a jusante da barragem até alcançar o oceano no Espírito Santo. O desastre deixou mais de 600 desabrigados, tendo sido confirmadas 18 mortes, enquanto que uma pessoa foi considerada como desaparecida.

Os resíduos de mineração constituídos por uma mistura de resíduos de minério de ferro, água e lama percorreram cerca de 663 km, impedindo a captação de água em muitas cidades em função da elevada tur-

bidez e da suspeição da presença de metais pesados, além de provocar a morte de toneladas de peixes e a destruição da paisagem local. Ao todo, 35 municípios dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo foram atingidos pelos rejeitos, que cobriram uma área de cerca de 1.469 hectares.

Em função da dimensão dos seus impactos, o desastre foi assunto na mídia nacional e internacional ao longo dos meses que se seguiram, tendo suscitado uma série de questões relacionadas à normatização das atividades minerárias no país, a fragilidade com que as barragens de rejeitos minerais são monitoradas, a precariedade das ações dos poderes públicos envolvidos, além da responsabilização empresarial pelas consequências ambientais e sociais negativas.

Quanto a questão da normatização das atividades minerárias cabe assinalar que o Decreto-lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, também conhecido como Código de Mineração, disciplina a administração dos recursos minerais pela União, a indústria de produção mineral e a distribuição, o comércio e o consumo de produtos minerais no Brasil. O atual Código de Mineração sucedeu ao antigo Código de Minas, instituído pelo Decreto-lei nº 1.985, de 29 de janeiro de 1940. Uma proposta de nova redação para as regras estabelecidas em 1967, elaborada pelo deputado Leonardo Quintão (PMDB-MG), está em discussão desde 2013. Apesar de o relator ter apresentado seu parecer em agosto de 2015, o texto do novo Código de Mineração (Projeto de Lei nº 5.807, de 2013) ainda não foi aprovado.

Alguns dos aspectos presentes no novo texto do Código de Mineração, relacionados com as questões sociais e ambientais das atividades da mineração no país, serão discutidos neste texto no item “O desastre

ambiental de Mariana na bacia do rio Doce: lições a serem aprendidas”.

Contextualização Histórica

De uma forma geral, a forte carga impactante da indústria extrativa mineral se caracteriza por ser diariamente exercida, e dispersa pelas mais de 3 mil minas e por cerca de 9 mil mineradoras em atividade no Brasil, as quais se somam ainda algumas centenas de milhares de garimpeiros e pequenos produtores informais de minerais para uso imediato na construção, aleatoriamente localizados no território brasileiro (ARAUJO; OLIVIERI; FERNANDES, 2014).

Os impactos ambientais negativos da extração mineral (mineração e lavra garimpeira) estão associados às diversas fases de exploração dos bens minerais, desde a lavra até o transporte e beneficiamento do minério, podendo estender-se após o fechamento da mina ou o encerramento das atividades.

A atividade altera de forma substancial o meio físico, provocando desmatamentos, erosão, contaminação dos corpos hídricos, aumento da dispersão de metais pesados, alterações da paisagem, do solo, além de comprometer a fauna e a flora. Afeta, também, o modo de viver e a qualidade de vida das populações estabelecidas na área minerada e em seu entorno.

Esses impactos ambientais negativos, quando não são detectados e corrigidos, se transformam num passivo ambiental, o que tem acontecido com frequência no Brasil (PAIVA, 2006). O número exato em todo o país de grandes passivos ambientais é desconhecido, mas certamente ultrapassa as dezenas de milhares de minas e garimpos, inativos e abandonados, produto da mineração pretérita, mas ininterrupta, exercida no Brasil há mais de 500 anos (ARAUJO; OLIVIERI; FERNANDES, 2014).

Uma publicação do CETEM-Centro de Tecnologia Mineral, unidade de pesquisa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), com o título de “Recursos Minerais & Sustentabilidade Territorial: Grandes Minas” (FERNANDES; ENRIQUÉZ; ALAMINO, 2011), identificou e sistematizou em 14 estudos de caso, os problemas sociais e ambientais da atividade minerária no país.

Outra publicação mais recente, também do CETEM/MCTI, cujo título “Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais e econômicos” (FERNANDES; ALAMINO; ARAÚJO, 2014), realizou um amplo estudo envolvendo 29 estudos de caso na Região Norte, 21 estudos de caso na Região Nordeste, 11 estudos de caso na Região Centro-Oeste, 34 estudos de caso na Região Sudeste, e 10 estudos de

caso na Região Sul, com o foco em problemas sociais e ambientais.

Alguns exemplos são significativos, como as minas abandonadas de ouro, muitas datando de centenas de anos, sendo ainda hoje fonte significativa de poluição, com a presença de mercúrio nos cursos d'água. A exploração de carvão também deixou sérios passivos ambientais não resolvidos, como é o caso da Bacia Carbonífera Sulcatarinense, onde estima-se que existam mil bocas de minas antigas abandonadas, a maior parte delas com 50-80 anos (AMARAL; KREBS; PAZZETTO, 2008).

Outro exemplo é encontrado no município de Bom Jesus da Serra (BA), onde está localizada a primeira mina de amianto explorada no Brasil, cujas atividades foram encerradas em 1967, deixando um grande passivo, que permanece sem solução. O município empobreceu, e a população convive, até hoje, com um grande cânion e com a contaminação ambiental decorrente do processo produtivo (PAIXÃO; QUEIROZ, 2009).

Passivos ambientais também são encontrados no município de Serra do Navio (AP), onde a empresa Indústria e Comércio de Minérios de Ferro e Manganês S.A (Icomi) explorou, por 40 anos, uma jazida de manganês até sua exaustão, deixando imensas pilhas de resíduos, que contaminaram rios e lençóis freáticos por arsênio contido no minério. Devido à falta de planejamento para o fechamento de mina que contemplasse o desenvolvimento de outras atividades econômicas após o fim da mineração, a cidade também passa por um processo de decadência econômica e social.

Por sua vez, a disposição inadequada de rejeitos da lavra de minério de chumbo no município de Boquira (BA), e a metalurgia do chumbo no município de Santo Amaro (BA), contaminaram mananciais e solos, causando danos à saúde da população.

Ainda, nas cidades mineiras de Caldas e Poços de Caldas, a extração e o beneficiamento do urânio, bem como a disposição dos resíduos da atividade mineradora, provocaram drenagem ácida na cava, nas pilhas de estéril e na bacia de rejeitos, afetando as bacias hidrográficas das cidades.

Os impactos sociais e ambientais negativos da mineração sobre a vida das populações não prevalecem somente durante o tempo de vida útil de uma mina; podendo perdurar por dezenas de anos ou mesmo por séculos. A mina se esgota, a empresa transfere suas atividades para outra localidade, e à população restam escavações abandonadas, pilhas de rejeitos, contaminação do ar, do solo, dos rios e dos lençóis freáticos, além de doenças, decadência econômica e empobrecimento (ARAUJO; OLIVIERI; FERNANDES, 2014).

Além dos trabalhos do CETEM, outras instituições têm colaborado com estudos sobre os impactos sociais e ambientais das atividades minerárias. Um deles é o “Mapa de Conflitos Envolvendo Injustiça Ambiental e Saúde no Brasil”, resultado do projeto desenvolvido em conjunto pela Fiocruz - Fundação Oswaldo Cruz e pela Fase - Federação de Órgãos para Assistência Social e Educacional, com o apoio do Departamento de Saúde Ambiental e Saúde do Trabalhador do Ministério da Saúde, onde cerca de 300 casos distribuídos por todo o país e georreferenciados são indicados, destacando-se 91 casos que envolvem a mineração. O estudo levou à publicação do livro “Injustiça Ambiental e Saúde no Brasil: o mapa de conflitos” (PORTO; PACHECO; LEROY, 2013).

Outra contribuição é o Portal “Mapa dos Conflitos Ambientais de Minas Gerais”, resultado de um projeto de pesquisa do Grupo de Estudos em Temáticas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais (GESTA/UFGM), em parceria com o Núcleo de Investigação em Justiça Ambiental da Universidade Federal de São João Del-Rey (NINJA/UFSJ) e com pesquisadores do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Social (PPGDS) da Universidade Estadual de Montes Claros (UNIMONTES). As informações coletadas dizem respeito a 541 casos de conflitos ambientais ocorridos em Minas Gerais entre os anos de 2000 e 2010.

MINERAÇÃO E O LICENCIAMENTO AMBIENTAL

A indústria extrativa mineral está submetida ao processo de licenciamento ambiental, em conformidade à legislação normativa em vigor no país. O Estudo de Impacto Ambiental (EIA), que é exigido para o licenciamento ambiental de qualquer atividade de aproveitamento de recursos minerais, tem sua definição, normas, critérios básicos e diretrizes de implementação, estabelecidos pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente-CONAMA nº 001/1986.

A exigência do EIA aplica-se aos empreendimentos mineiros de toda e qualquer substância mineral. Entretanto, para as substâncias minerais de emprego imediato na construção civil, em função das características do empreendimento, poderá ser dispensada a apresentação do EIA. Nesse caso, a empresa de mineração deverá apresentar o Relatório de Controle Ambiental (RCA), em conformidade com as diretrizes do órgão ambiental estadual competente.

O EIA, a ser elaborado obrigatoriamente por técnicos habilitados, deve estar consubstanciado no Rela-

tório de Impacto Ambiental (RIMA), o qual é submetido ao órgão de meio ambiente estadual competente, integrante do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), para análise e aprovação.

Nesta fase, o RIMA deve ser tornado público para que a coletividade ou qualquer outro interessado tenha acesso ao projeto e a seus eventuais impactos ambientais e possa conhecê-los e discuti-los livremente, inclusive em audiência pública.

A aprovação do EIA/RIMA é o requisito básico para que a empresa de mineração possa pleitear o Licenciamento Ambiental do seu projeto de mineração. A obtenção do Licenciamento Ambiental está regulamentada pelo Decreto no 99.274/90, que dá competência aos órgãos estaduais de meio ambiente para expedição e controle das licenças ambientais (Licença Prévia-LP; Licença de Instalação-LI; Licença de Operação-LO). Sua obtenção é obrigatória para a localização, instalação ou ampliação e operação de qualquer atividade de mineração objeto dos regimes de concessão de lavra e licenciamento.

Em casos de empreendimentos de mineração com significativo impacto ambiental de âmbito nacional ou regional, a competência para efetuar o licenciamento ambiental é do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis (IBAMA), órgão federal vinculado ao Ministério do Meio Ambiente.

Apesar da legislação ambiental brasileira, estabelecida por Resoluções do CONAMA, não prever a etapa de descomissionamento (*phase out*), os empreendimentos de mineração estão obrigados, conforme o Decreto nº 97.632/1989, a submeter o Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD) à aprovação do órgão estadual de meio ambiente competente quando da apresentação do EIA e do RIMA. No entanto, a ausência de capacitação técnica nestes órgãos acaba por dificultar um bom andamento dessa exigência.

MINERAÇÃO EM TERRAS INDÍGENAS (TI'S)

A questão da mineração em Terras Indígenas, e em áreas de Populações Tradicionais, se constitui num dos temas mais controversos no país.

Para H. R. Villas Bôas (2013):

Grande parte das Terras Indígenas no Brasil é alvo de invasões de garimpeiros, pescadores, caçadores, madeireiros e posseiros, outras são cortadas por estradas, ferrovias, linhas de transmissão, ou têm porções inundadas por usinas hidrelétricas. Frequentemente os índios colhem resultados perversos do que aconte-

ce mesmo fora de suas terras, ou seja, nas regiões que as cercam: poluição de rios por agrotóxicos, desmatamentos, epidemias, etc. São alguns dos problemas enfrentados por essas populações e nem sempre de fácil identificação (VILLAS BÔAS, 2013).

A autora cita o jurista Dalmo de Abreu Dallari (2012) para quem:

Quanto às terras indígenas a Constituição de 1988 dispõe expressamente, no artigo 20, que 'são bens da União: XI- as terras tradicionalmente ocupadas pelos índios'. Além disso, é absolutamente clara quando estabelece, no artigo 231, que 'são reconhecidos aos índios sua organização social, costumes, línguas, crenças e tradições, e os direitos originários sobre as terras que tradicionalmente ocupam, competindo à União demarcá-las, proteger e fazer respeitar todos os seus bens'. E em sete parágrafos acrescentados a esse artigo são reafirmados com minúcias esses direitos sobre as terras, dispondo-se expressamente que 'as terras de que trata este artigo são inalienáveis e indisponíveis, e os direitos sobre elas, imprescritíveis'. Esse último dispositivo é de fundamental importância, pois tem havido casos em que invasores de má-fé negociam a ocupação das terras com lideranças indígenas ingênuas e desinformadas, pretendendo, assim, legalizar a invasão. Em termos jurídicos, é legalmente possível a celebração de acordos para a exploração conjunta das terras indígenas e de suas riquezas, por índios e não índios, mas isso deve ser feito com a participação das autoridades federais competentes e com a concordância prévia, livre e informada da comunidade indígena, como está expresso na Convenção 169 da Organização Internacional do Trabalho sobre os Povos Indígenas e Tribais, à qual o Brasil aderiu. Fora disso, a presença de invasores em terras indígenas configura ilegalidade, o que exige a pronta reação das autoridades competentes para garantia dos direitos constitucionais (DALLARI, 2012).

Apesar do Novo Marco Regulatório da Mineração (Projeto de Lei nº 5.807, de 2013) não contemplar de forma explícita em seu texto a mineração em terras indígenas, para H. R. Villas Bôas (2013) é importante mencionar que o aproveitamento dos recursos minerais é atividade de utilidade pública e de interesse nacional. Entretanto, "o Projeto de lei complementar

nº 227/2012, que visa regulamentar o parágrafo 6º do artigo 231 da Constituição Federal, tem por escopo estabelecer quais são as situações excepcionais que podem restringir o direito de usufruto exclusivo dos indígenas sobre suas terras". Ou seja, para a autora, o PL complementar nº 227/2012 "quer regulamentar o que é de relevante, importante, para o interesse público da União, ou seja, para o Estado Nacional podendo com essa regulamentação abrir "brechas" para empreendimentos em terras indígenas".

Essa mesma percepção é apontada por J. Malerba (2014) ao lembrar que:

Organizações e movimentos sociais articulados na Rede Brasileira de Justiça Ambiental e no Comitê em Defesa dos Territórios frente à Mineração têm denunciado uma perversa coincidência entre o processo de revisão do código mineral e a paralisação dos processos de reconhecimento de direitos territoriais, como a titulação de terras quilombolas. Tal denúncia aponta que a lógica política que preside a distribuição desigual dos custos ambientais está em vigor no processo de expansão das atividades extrativas no país. Isso significa dizer que esse processo expansivo não se orienta simplesmente pela descoberta de novas jazidas, mas pelas condições sociais e políticas de explorá-las, criadas no campo da política. O esvaziamento simbólico dos espaços, a desconsideração ou minimização dos impactos ambientais ou da existência de populações tradicionais nas áreas de interesse dos negócios são estratégias que visam esvaziar o debate político em torno da decisão sobre os fins que orientam o uso de um determinado recurso natural, ou, em outras palavras, para quem e para quem um determinado recurso natural deve ser utilizado (MALERBA, 2014, p.13).

A questão indígena foi objeto de intensa controvérsia a partir da proposição da Proposta de Emenda Constitucional-PEC 215 que propõe modificar o Artigo 49 e o Artigo 231 da Constituição Federal, transferindo do Executivo para o Legislativo a prerrogativa de demarcar as terras tradicionalmente ocupadas pelos indígenas, territórios quilombolas e unidades de conservação no Brasil. As implicações são evidentes pois as terras ficariam acessíveis à exploração hidrelétrica, de mineração e do agronegócio.

O DESASTRE AMBIENTAL DE MARIANA NA BACIA DO RIO DOCE: LIÇÕES A SEREM APRENDIDAS¹

As causas do rompimento da barragem de Fundão em 5 de novembro de 2015, que ocasionou o desastre ambiental na bacia do rio Doce, estão sendo investigadas e os resultados ainda não são conhecidos.

A causa mais provável se refere às obras de alçamento da barragem que estavam sendo realizadas para aumentar a capacidade de acumulação dos volumes de rejeitos. Supõe-se ainda que os riscos de ruptura já tinham sido identificados em 2014.

O desastre ambiental na bacia do rio Doce (MG/ES) revelou uma série de fragilidades sob o ponto de vista institucional, uma série de negligências e omissões dos órgãos públicos e das empresas envolvidas, e uma série de incertezas quanto aos riscos e segurança das barragens de contenção de rejeitos minerais.

O exame de cada um destes aspectos é de fundamental importância para que desastres dessa ordem não se reproduzam no futuro.

Segurança das barragens

A Política Nacional de Segurança em Barragens foi instituída pela lei 12.334/2010, regulamentada em 2012, e por mais duas portarias e duas resoluções que criam, entre outras medidas, um cadastro de represas usadas para mineração, um plano de segurança e uma classificação por categoria de risco.

A ANA (Agência Nacional de Águas) é responsável pela elaboração de relatórios anuais sobre a eficácia do plano, mas quem fiscaliza a contenção de rejeitos minerais é o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral).

Segundo o “Relatório de Segurança de Barragens”, o país tinha até setembro de 2014 14.966 barragens registradas. Dessas apenas 856 foram vistoriadas entre 2012 e 2014. Os dados de 2015 ainda não foram divulgados.

Apesar de representarem apenas 5% das quase 15 mil barragens cadastradas na ANA, as estruturas para contenção de rejeitos de mineração são as mais potencialmente perigosas. Segundo o relatório de segurança referente a 2014 (com dados coletados entre outubro de 2013 e setembro de 2014, os mais recentes

à disposição), todas as 663 barragens para contenção de rejeitos de mineração apresentam categoria de risco e dano potencial associado. Dessas, 128 têm risco médio ou alto.

Sem definição de risco, apenas 5,6% das barragens cadastradas têm planos de emergência feitos. Segundo o Relatório:

A lei ainda é relativamente nova, e os empreendedores estão se adequando aos poucos para fazer frente aos desafios. Outra dificuldade é que poucas entidades fiscalizadoras classificaram as barragens sob sua jurisdição quanto ao risco e ao dano potencial associado. E a classificação é pré-requisito para o empreendedor saber se precisa ou não elaborar o plano (ANA, 2015, p.14).

Verifica-se a necessidade de ampliar e consolidar o monitoramento das barragens por parte dos órgãos públicos responsáveis. As empresas minerárias devem ter uma participação proativa nesse processo, conferindo absoluta atenção à coleta e guarda da documentação técnica da barragem, bem como à realização de inspeções regulares, atendendo às suas recomendações. Dessa forma, além do melhor conhecimento e possibilidade de uma gestão mais adequada da segurança, a classificação que a entidade fiscalizadora fizer de sua barragem será mais próxima da realidade, contribuindo para uma correta priorização das ações de segurança de barragens por ambas as partes.

Para tanto, é fundamental que o número de técnicos pertencentes aos órgãos públicos responsáveis pelas atividades de monitoramento seja aumentado, privilegiando a qualificação dos mesmos. Não há como atender à legislação existente sem pessoal em número e qualificação adequados.

Quanto à localização de barragens de contenção de rejeitos minerais, estas não podem ser construídas à montante de áreas ocupadas por populações, como foi o caso do distrito de Bento Rodrigues, com 600 habitantes e localizado apenas 5,5 km a jusante da barragem de Fundão.

Além disso, a empresa Samarco não possuía sistemas de alerta à população em caso de ruptura da barragem. A adoção de sistemas como sirenes de alerta e Planos de Evacuação em situações de risco é essencial para todas as barragens de contenção de rejeitos minerais quando estas estiverem localizadas próximas a áreas ocupadas por populações.

Os Planos de Evacuação (ou Planos de Ação Emergencial de Barragens) devem articular as ações da Defesa Civil, Corpo de Bombeiros, Polícia Militar, entre

¹ Nota do autor: Para a elaboração deste item foram utilizadas várias fontes disponíveis na *web*, destacando-se reportagens dos principais jornais do país sobre o assunto. A confiabilidade das informações foi checada por intermédio de comparação das diversas fontes e as informações disponibilizadas pelas próprias empresas envolvidas.

os principais órgãos, e a própria empresa. A Samarco só adotou medidas adicionais de segurança após o desastre, com a instalação de sirenes fixas e a localização dos pontos de encontro.

Durante o período após o desastre, foram frequentes as reportagens das principais redes de televisão do país relatando os prejuízos dos moradores das cidades atingidas, fazendeiros e pescadores, que tiveram interrompidas suas atividades e que aguardavam as indenizações prometidas e não cumpridas pela empresa Samarco. De forma recorrente, as reportagens finalizavam com a reprodução de notas da empresa à imprensa indicando que esta “estava envidando todos os esforços possíveis no sentido de atender os pleitos”. Ao público em geral ficaram as dúvidas: se todos os esforços possíveis estavam sendo realizados, por que as pessoas prejudicadas não estavam sendo atendidas?

Ainda, a empresa Samarco protelou por várias vezes a entrega de um estudo sobre possíveis cenários e medidas a serem tomadas em caso de rompimento de suas duas barragens de Germano e Santarém, em Mariana. O estudo de “*Dam Break*” inicialmente previsto para ser apresentado em 3/12/2015, foi entregue ainda incompleto em 15/01/2016. O atraso previa uma multa de R\$ 1 milhão por dia, valor que passou a ser questionado pelo Ministério Público de MG em função da recorrência do atraso na entrega do estudo completo. A intenção era de aumentar o valor para R\$ 5 milhões por dia como forma de acelerar o cumprimento do compromisso e penalizar a empresa Samarco. O expediente de imputar multas à empresa é analisado no próximo item.

A responsabilização e a penalização

Os instrumentos de regulação ambiental são conhecidos como de Comando e Controle, e incluem mecanismos estabelecidos segundo o Princípio do Poluidor-Pagador, que impõem a criminalização e multas às empresas poluidoras.

No caso do desastre na bacia do rio Doce, a opinião pública nacional e internacional seguiu os desdobramentos das ações dos poderes públicos envolvidos no acompanhamento e fiscalização das intervenções das empresas responsáveis pelo desastre. Analisa-se aqui a eficácia destes instrumentos de penalização.

A empresa Samarco foi fundada em 1977, sendo uma empresa brasileira de mineração, de capital fechado, controlada em partes iguais por dois acionistas: BHP Billiton Brasil Ltda., subsidiária da empresa anglo-australiana BHP Billiton, e a empresa Vale S.A.

Em seu dossiê intitulado “O que deve ser feito” de 11/01/2015, a Samarco indica que sua receita equivale a cerca de 6,4% do PIB do Espírito Santo e 1,5% do PIB de MG, e os impostos gerados diretamente pelas suas atividades representam 54% da receita de Mariana (MG), 35% da receita de Ouro Preto (MG) e 50% da receita de Anchieta (ES).

A importância econômica da Samarco nas localidades apontadas representa também sua presença política nas áreas atingidas pelo desastre. Esse fator se estende às suas duas empresas controladoras e isso explica a negligência e a omissão do poder local em relação às consequências do desastre.

Tanto a BHP Billiton como a Vale se esforçaram em demonstrar que não tinham nenhuma responsabilidade pelas consequências do desastre. Conforme indicou um diretor jurídico da Vale, a empresa tem apenas uma “responsabilidade subsidiária” com a Samarco, o que implica que caso a décima exportadora do Brasil não possa pagar suas dívidas, seus acionistas (Vale e BHP) deverão assumi-las.

O envolvimento direto da Vale passou a ser estabelecido com a comprovação de que a barragem de rejeitos de Fundão também era utilizada pela Vale para receber parte dos rejeitos das Usinas de Tratamento de Minério da unidade de Alegria, também em Mariana. Segundo a Vale, o volume correspondia a menos de 5% do total depositado na barragem da Samarco anualmente. A relação era regida por contrato entre as duas empresas, que definia a Samarco como responsável pela gestão, controle e operação dessa deposição. Conforme comunicado da Vale “trata-se de uma administração completamente independente de suas acionistas e responsável pelas questões técnicas e financeiras”.

Em entrevista à Agência Brasil em 04/12/2015, a coordenadora da Câmara de Meio Ambiente e Patrimônio Cultural do Ministério Público Federal, Sandra Cureau, afirmou que há vários indícios de descuido, como a falta de um plano de contingência e de controle técnico sobre o volume que a barragem de rejeitos suportava:

A denúncia criminal pode ser feita para uma pessoa jurídica, mas tem que envolver também as pessoas físicas dos diretores. Em princípio, a denúncia será contra a Samarco e os diretores da empresa. Na responsabilidade civil, se a Samarco se tornar insolvente, aí as controladoras podem ser chamadas. Se a Samarco não tiver bens, quem vai pagar são as controladoras.

Com efeito, em 13/01/2016 a Polícia Federal indiciou a Samarco, a Vale (controladora) e a Vog-Br (empresa que elaborou um parecer atestando a estabilidade da barragem que rompeu) e mais sete executivos por crime ambiental, conforme a Lei n.º 9.605 de 12 de fevereiro de 1998 (Lei de Crimes Ambientais). O indiciamento foi por “poluição ambiental em proporção que afete o convívio humano” (art. 54), na medida em que o rompimento da barragem, além de poluir o rio Doce, atingido pela lama que vazou da represa, impossibilitando por exemplo a pesca, deixou sem água cidades de Minas Gerais e do Espírito Santo. A pena prevista é de reclusão, de um a quatro anos, e multa.

Cabe assinalar que o indiciamento, sem citar os nomes, envolveu o diretor-presidente da Samarco, o responsável pelo monitoramento de represas da mineradora e gerentes da área. Apesar da penalização imposta, tanto a Samarco como a Vale declararam discordância da decisão na medida em que não há conclusão pericial técnica das causas do acidente.

A eficácia da aplicação da Lei de Crimes Ambientais é bastante limitada pois entra no terreno da judicialização, permitindo um longo processo de contestação através da interposição de recursos.

Outro mecanismo utilizado foi a penalização através da aplicação de multas. Tal mecanismo, impulsionado pelas ações dos Ministérios Públicos Federal e Estaduais, acabou se transformando num mero espetáculo de pirotecnia por parte dos órgãos do poder executivo, tanto do Governo federal como dos órgãos ambientais federal e estaduais, que serviram muito mais para dar uma satisfação à opinião pública sensibilizada pelo desastre ambiental na bacia do rio Doce, do que um efetivo instrumento de penalização das empresas responsáveis pelo desastre.

Com efeito, no dia 12 de novembro de 2015, uma semana após o rompimento da barragem de Fundão, o Ibama anunciou a aplicação de uma multa de R\$ 250 milhões à empresa Samarco. Foram cinco autos de infração no valor de R\$ 50 milhões cada. A Samarco foi autuada por poluir rios, tornar áreas urbanas impróprias para ocupação humana, causar interrupção do abastecimento público de água, lançar resíduos em desacordo com as exigências legais, provocar a morte de animais e a perda da biodiversidade ao longo do rio Doce, colocando em risco à saúde humana.

Por seu turno, no dia 18 de novembro de 2015, a Subsecretaria Estadual de Fiscalização de Meio Ambiente de Minas Gerais, aplicou uma multa no valor de R\$ 112,7 milhões em função da poluição e degradação ambiental causada pelo rompimento da barragem da Samarco. O documento citava ainda os danos causados

aos recursos hídricos, à saúde, à segurança e ao bem-estar da população prejudicada.

A função da multa é dissuadir a prática infracional. É impor ao infrator os custos dos danos por ele causados. Entretanto, conhece-se no país a limitação do instrumento de imposição das multas ambientais.

Segundo reportagem publicada no jornal FSP em 22/11/2015, entre 2011 e 2014, apenas 8,7% dos valores cobrados em multas ambientais pelo Ibama foram efetivamente arrecadados. Os valores, quando arrecadados, vão para os cofres da União e 20% são aplicados no Fundo Nacional do Meio Ambiente.

Isso significa que as multas, quando pagas, não se dirigem para compensar os danos nas localidades atingidas pelos desastres ambientais.

No entanto, se a multa não é paga voluntariamente pelo infrator, o processo é remetido para a Advocacia-Geral da União, que faz sua ação de execução fiscal. Na AGU, o crédito é inscrito em dívida ativa e no Cadin, que impõe restrições ao devedor para obter financiamentos. A cobrança costuma gerar processo judicial que dura, em média, oito anos para ser julgado. São muitas instâncias onde as infrações podem ser discutidas. As multas, assim, acabam caducando pelo excesso de prazo para recursos e pela inércia na execução.

Além da multa, os órgãos ambientais podem também operar embargos e apreensões de bens dos infratores ambientais. Com este efeito, um dia após o desastre, o Governo de Minas Gerais declarou o embargo da operação do complexo de Germano, a mina, as barragens e os minerodutos que transportam o material extraído até Ubu (ES). O embargo foi por tempo indeterminado, até que fossem apuradas as causas do rompimento da barragem de Fundão.

O fato é que, conforme publicação da Uol Notícias (04/05/2016), a Samarco não tinha pago nenhuma multa, decorridos seis meses após o desastre.

Controvérsias na recuperação da bacia do rio Doce

O tema da recuperação das localidades atingidas pelo desastre e da bacia do rio Doce, incluindo a área litorânea da costa do Espírito Santo, alimentou na mídia o debate sobre os valores monetários necessários para a recuperação.

Segundo especialistas, os danos ambientais provocados pelo rompimento da barragem em Mariana devem durar décadas e os custos para atenuá-los devem ser bilionários. Logo após o desastre, a Samarco fez um acordo preliminar com o Ministério Público de Minas e o Federal para pagar R\$ 1 bilhão a fim de cobrir os primeiros gastos.

A AGU estima como valor de referência R\$ 20 bilhões necessários para o financiamento de ações de recuperação ambiental no prazo de 10 anos. Atrás destes valores, tanto os Governos federal e estaduais, como as empresas minerárias envolvidas, dão a impressão da possibilidade da recuperação total da bacia do rio Doce.

No entanto, em evento sob o título “Desastre Ambiental da Samarco: Impactos e Recuperação”², ocorrido em 07/12/2015 e organizado pelo Grupo de Pesquisa Meio Ambiente e Sociedade do Instituto de Estudos Avançados da USP, o prof. Pedro Luiz Cortês, da Escola de Comunicações (ECA-USP), assinalou que serão necessários muitos anos para que se alcance a recuperação dos ecossistemas atingidos pelos rejeitos minerais, em função do seu grau de comprometimento ocasionado pelo assoreamento dos rios, eliminação das matas ciliares, comprometimento da mata nativa, alteração dos solos, dificuldade de recomposição da flora, prejuízos em toda a cadeia alimentar, além das consequências sociais. Segundo Cortês, é possível que com o passar do tempo, os sedimentos em suspensão sejam carreados e depositados, tornando as águas do rio Doce aparentemente “mais limpas”. Essa será apenas uma falsa impressão de que o rio e seus ecossistemas estariam “voltando à normalidade”.

Nessa mesma linha, mas ainda mais incisiva, o do Prof. Marcos Buckeridge, do Instituto de Biologia da USP, ressaltou que os ecossistemas são irrecuperáveis quando sofrem a natureza dos impactos como os que se configuraram no desastre ambiental na bacia do rio Doce. Essa impossibilidade de recuperação se deve ao grau de complexidade com que estes ecossistemas se estruturam e se relacionam entre si. Para Buckeridge, o desastre ambiental produziu uma “onda de choque biológico” que é extremamente lenta e de longa duração, independentemente da velocidade das ações de recuperação que vierem a ser tomadas.

Tem-se, portanto, um cenário controverso em relação às possibilidades de recuperação da bacia do rio Doce e da costa marinha atingida pelos rejeitos. O país dispõe de tecnologias de recuperação de biomas que têm alcançado relativo sucesso no Estado de São Paulo. Entretanto, verifica-se que as ações necessárias para se alcançar, ao menos, uma relativa e parcial recuperação, ainda se encontram envolvidas num lento processo de discussão e definição dos agentes financeiros, que envolvem as empresas Samarco, Vale e BHP Billiton.

Uma vez estabelecidos os valores monetários, restará a definição de como estes recursos serão geridos, quais os órgãos públicos a quem se conferida a tarefa de definição das prioridades, e de acompanhamento e fiscalização das ações, e qual será o controle social nesse processo.

São aspectos que retomam as questões de deficiência dos órgãos públicos em número e capacitação, questão anteriormente identificada no presente artigo, e na falta de visibilidade na condução das ações, característica generalizada da gestão dos recursos públicos decorrente das dificuldades com que a população tem acesso à essas informações e ao processo de decisão no país.

O desastre ambiental de Mariana no rio Doce e o Novo Código de Mineração

No final de 2015 existiam no Congresso Nacional 15 projetos de lei que tinham como objetivo alterar a legislação e reduzir os trâmites do licenciamento, tornando-o mais célere.

O processo de flexibilização ambiental em curso deve ser repensado em função do desastre ambiental de Mariana na bacia do rio Doce, que revelou uma série de deficiências e fragilidades que deverão ser evitadas nos futuros projetos de atividades minerárias.

No entanto, o novo Código da Mineração está na pauta do legislativo, sem considerar a opinião dos movimentos sociais e principalmente das comunidades envolvidas com a exploração mineral.

Sob o ponto de vista institucional, o Art. 61 cria a Agência Nacional de Mineração (ANM) em substituição ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) que fica extinto conforme o Art. 125 do novo Código Mineral.

A futura Agência deverá cumprir um papel fundamental na fiscalização das barragens de rejeitos minerais, que ficava a cargo do DNPM, e que como foi visto no item sobre Segurança das barragens deste artigo, tem sido extremamente incipiente.

Uma das disposições mais controversas no novo Código Mineral é o Art. 119 que prescreve que a criação de qualquer atividade que tenha potencial de criar impedimento à atividade de mineração depende de prévia anuência da ANM. Tal disposição impede reações das populações tradicionais aos projetos de atividades minerárias.

Ainda, o Art. 136 estabelece que nas unidades de conservação de uso sustentável é permitida a exploração de recursos minerais. Tal disposição sobrepõe o interesse econômico da exploração mineral à necessidade de preservação nas unidades de conservação.

2 Disponível em: <http://www.iea.usp.br/midioteca/video/videos-2015/desastre-ambiental-da-samarco-impactos-e-recuperacao>.

Cabe assinalar que esta disposição parece se apoiar na experiência aparentemente bem-sucedida, de conciliação das atividades minerárias na Serra dos Carajás (PA) pela empresa Vale com a Floresta Nacional dos Carajás, onde as atividades minerárias ocupam apenas 3% do perímetro de conservação.

O relator do Novo Código de Mineração, deputado Leonardo Quintão (PMDB-MG), anunciou que o desastre de ambiental de Mariana na bacia do rio Doce o levou a admitir as seguintes alterações no texto:

- Excluir artigo 119, que subjugava à anuência federal a criação de qualquer atividade que possa impedir o exercício da mineração;
- Tornar obrigatória a apresentação pelas mineradoras de plano de evacuação e de contingenciamento de barragens em caso de acidentes;
- Obrigar as empresas do setor a fazer um plano de tratamento e reciclagem de rejeitos de exploração de minério;
- Fazer com que as empresas contratem um seguro de danos gerais correspondente ao risco apresentado por cada barragem.

Pode-se observar que as possíveis alterações no Novo Código de Mineração ainda são tímidas, à luz do que se sucedeu no desastre ambiental de Mariana na bacia do rio Doce. O texto ainda se encontra em discussão sem um prazo estabelecido para ser votado.

MINERAÇÃO E SUSTENTABILIDADE

As empresas minerárias publicam anualmente seus Relatórios de Sustentabilidade onde vários aspectos de suas atividades são ressaltados. Não faltam referências à redução de Gases de Efeito Estufa nos processos de produção, beneficiamento e transporte; redução do consumo e reaproveitamento da água; aumento da eficiência energética em suas atividades; existência e adequação a diversos documentos como Planos de Disposição de Rejeitos, Planos de Ações Emergenciais, entre outros; Programas de relacionamento e diálogo com as comunidades; adoção de Códigos de Ética e Conduta envolvendo empregados e fornecedores; além de ações de relacionamento com o poder público em seus três níveis (municipal, estadual e federal).

Via de regra, os Relatórios de Sustentabilidade apresentados pelas empresas minerárias utilizam como principais parâmetros de avaliação os indicadores definidos no *Global Compact* (Pacto Global,

iniciativa proposta pela ONU), e nas *Sustainability Reporting Guidelines* (definidas pelo GRI-*Global Reporting Initiative*).

À primeira vista, os Relatórios de Sustentabilidade elaborados parecem confirmar os compromissos das empresas minerárias com os princípios do Desenvolvimento Sustentável.

Entretanto, apesar da retórica empresarial, são frequentes os processos de judicialização das atividades minerárias, marcados pelos enfrentamentos das empresas com os Ministérios Públicos, com as populações atingidas, revelando a existência de conflitos socioambientais e desrespeito aos princípios da sustentabilidade preconizados nos seus Relatórios.

A respeito desta distância entre o discurso empresarial e a realidade dos fatos, Sousa (2013) assinala em seu estudo sobre as relações da empresa Vale e as populações atingidas pelas obras de implantação de infraestruturas que:

Al longo da pesquisa, identificamos nos documentos veiculados pela empresa um discurso que aponta para o respeito às comunidades locais onde desenvolve suas atividades extrativas, e até mesmo, um discurso de compromisso e missão no campo do que intitula desenvolvimento com sustentação sócio ambiental. Tal discurso é vigorosamente contraditado pelas inúmeras denúncias contra a empresa indicando à larga que seus procedimentos, em escala mundial, são de desrespeito aos direitos humanos e aos bens da natureza. Neste particular, cabe ao pesquisador o atento exercício de leitura das fontes textuais produzidas pela empresa, observando seu conteúdo auto-laudatório e em franca diferença com a experiência que brota das realidades vividas (SOUZA, 2013).

Para R. C. Villas Bôas (2011), “um ponto fulcral no estabelecimento dos princípios e adoção das metas do Desenvolvimento Sustentável (DS) à indústria extrativa mineral é o da relação desta indústria com o seu entorno, com a(s) comunidade(s) que lhe(s) seja(m) contígua(s) ou vizinha(s)”.

Para tanto, o autor preconiza a necessidade do estabelecimento de uma Licença Social. Esta não é outorgada por qualquer repartição governamental, mas sim pela Sociedade, pela Comunidade, informalmente, na maioria das vezes, ou seguindo ritos pré-acordados, mas sempre voluntários, outras vezes.

Tal proposição se apoia nos estudos desenvolvidos pelo Banco Mundial (2003):

A conclusão final dos estudos que desenvolvemos é de que a concessão ou licença minerária não é mais

suficiente. As empresas devem obter uma Licença Social, da qual depende de processos de consulta, participação local e - cada vez mais - de um sólido diálogo tripartido (BANCO MUNDIAL, 2003).

Garantias de que a atividade não comprometa a integridade ambiental tem sido cada vez mais indispensável ao funcionamento das atividades econômicas extrativas minerais, tanto para os novos empreendimentos como ainda para os que já estão em operação. São também cada vez mais intensas as pressões pela exigência legal de uma tríplice licença: título minerário, licença ambiental e licença social (FERNANDES; LIMA; TEIXEIRA, 2007).

Cumprir observar que a empresa Samarco, em seu Relatório de Sustentabilidade 2014, indica a conquista de uma “Licença Social para operar e engajamento das comunidades vizinhas” (p. 4), com o objetivo de “construir e gerar valor para o território, propiciando às comunidades oportunidades de desenvolvimento e disponibilizando canais de diálogo e prestação de contas” (p.35). Para tal, conforme aponta o Relatório, foram investidos voluntariamente R\$ 10,4 milhões em projetos socioinstitucionais, foram realizadas 184 reuniões de diálogo com as comunidades vizinhas (MG e ES), sendo beneficiadas 44.192 pessoas em 18 municípios.

Apesar dessa iniciativa, na qual nenhum órgão público é mencionado como referência para a preconização da concessão da Licença Social, o desastre ambiental analisado no item anterior deste texto ocorreu.

Embora ainda escassa, a preocupação na literatura com métodos para avaliação da sustentabilidade em atividades minerárias, e particularmente com a temática da questão social, possibilita o encontro de várias contribuições para o tema.

O Banco Mundial promoveu um amplo trabalho com sete estudos de caso sobre as Grandes Minas e Comunidades na América Latina (Bolívia, Chile e Peru), e ainda quatro estudos na Espanha e Canadá (BANCO MUNDIAL, 2003).

No Brasil, o Centro de Desenvolvimento Sustentável (CDS) da Universidade de Brasília (UNB), desenvolveu a fundamentação teórica da relação mineração-sustentabilidade (ENRÍQUEZ; DRUMMOND, 2005; ENRÍQUEZ; DRUMMOND, 2007; ENRÍQUEZ, 2008). Por seu turno, o Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), desenvolveu estudos sobre o tema, incluindo um trabalho prospectivo até o ano de 2015 (SANCHÉZ, 2007). Ainda, Scliar (2004) produziu um documento abrangente sobre o assunto para o Ministério do Meio Ambiente-MMA.

A respeito dos direitos sociais envolvendo as atividades de mineração, o código mineral em vigor prevê aos proprietários e posseiros de terras onde se encontra uma jazida autorizada para pesquisa ou lavra o direito de serem indenizados pelos danos e prejuízos causados pela atividade, assim como uma renda para ocupação dos terrenos (durante o período de pesquisa) e uma participação no resultado das lavras. Mas a lei não estabelece a possibilidade de recusa por parte dos mesmos de cederem os terrenos para minas e servidões que se fizerem necessárias à atividade mineral. Pelo contrário, se não houver acordo com os proprietários/posseiros quanto aos valores a serem pagos a título de indenização, ocupação e lavra a lei prevê que esses valores sejam avaliados judicialmente e pagos em juízo (art. 27, incisos 6 e 7 do atual Código Mineral/ Decreto Lei 227 de 28/02/1967).

Por outro lado, o mesmo código mineral estabelece em seu artigo 42 que a autorização para lavra pode ser “recusada se for considerada prejudicial ao bem público ou comprometer interesses que superem a utilidade da exploração industrial, a juízo do Governo”. Entretanto, tem sido recorrente a defesa, dentro do próprio Estado, da prioridade da mineração frente a outras atividades, mesmo aquelas que também devem ser exercidas, segundo a Constituição, em prol do interesse nacional, como é o caso da reforma agrária.

Tais controvérsias definem as dificuldades de conciliar as atividades de mineração com as populações por elas afetadas, e indicam a necessidade de uma nova legislação que normatize as relações entre a indústria de extração mineral e os territórios e suas populações.

Entretanto, como já foi verificado anteriormente, a oportunidade do novo Código de Mineração incorporar estas questões de forma a manter um equilíbrio entre as atividades minerárias e seus interesses econômicos e as populações dos territórios que são objeto dessas atividades está longe de se concretizar.

Para R. C. Villas Bôas (2011):

Com a adoção do DS, haverá acentuada mudança de comportamento e percepção, quer por parte do povo, da sociedade, da comunidade, do governo, de políticos e da(s) indústria(s), a mineração não sendo exceção, sobre esse relacionamento das indústrias com a sociedade em geral e com o seu entorno em particular (VILLAS BÔAS, 2011).

Verifica-se que iniciativas e critérios não faltam. A sua adoção é o principal desafio para a indústria extrativa mineral alcançar os objetivos da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- ANA-Agência Nacional de Águas. *Relatório de segurança de barragens 2014*. Brasília: ANA, 2015. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/Seguranca/RSB2014_25092015.pdf>. Acesso em 13 de janeiro de 2015.
- AMARAL, J.E.; KREBS, A.S.; PAZZETTO, M.B. Mapeamento de bocas de minas abandonadas na região Carbonífera de Santa Catarina. In: CPRM, Serviço Geológico do Brasil. *44º Congresso Brasileiro de Geologia*, 26-31 out. 2008. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/evento_0537.pdf>. Acesso em 02 de agosto de 2015.
- ARAUJO, E.R.; OLIVIERI, R.D.; FERNANDES, F.R.C. Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. In: CHAVES, F.R.; ALAMINO, R.C.J.; ARAUJO, E.R. (Eds.). *Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais e econômicos*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.
- BANCO MUNDIAL. *Grandes minas y la comunidad: efectos socioeconómicos en Latinoamérica, Canadá y España*. Banco Mundial/Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, Ottawa, Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, Ottawa, Canadá, 2003.
- DALLARI, D.A. Terras indígenas e falsos proprietários. Entrevista concedida ao Jornal do Brasil em 09/11/2012.
- ENRÍQUEZ, M.A.R.S. *Maldição ou dádiva? Os dilemas do desenvolvimento sustentável a partir de uma base mineira*. Tese (Doutorado), Universidade de Brasília-UNB, CDS-Centro de Desenvolvimento Sustentável, 2007. São Paulo: Signus Editora, 2008.
- ENRÍQUEZ, M.A.R.S.; DRUMMOND, J.A. Certificações socioambientais: desenvolvimento sustentável e competitividade da indústria mineira na Amazônia. *Cadernos EBAPE*, edição temática, junho/2005.
- ENRIQUÉZ, M.A.R.S.; FERNANDES, F.R.C.; ALAMINO, R.C.J. A mineração das grandes minas e as dimensões da sustentabilidade. In: FERNANDES, F.R.C.; ENRIQUÉZ, M.A.R.S.; ALAMINO, R.C.J. (Eds.). *Recursos minerais e sustentabilidade territorial: Grandes minas*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, v. 1, 2011. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/livros/Vol_1_GRANDES_MINAS_TOTAL.pdf>. Acesso em 25 de agosto de 2015.
- FERNANDES, F.R.C.; LIMA, M.H.R.; TEIXEIRA, N.S. Grandes Minas e Comunidades: algumas questões conceituais. *Série Estudos e Documentos*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007.
- FERNANDES, F.R.C.; ENRIQUÉZ, M.A.R.S.; ALAMINO, R.C.J. (Eds.). *Recursos minerais e sustentabilidade territorial: Grandes minas*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, v. 1, 2011. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacoes/livros/item/download/106_ef3978248f22a064938b619f015510d4>. Acesso em 27 de agosto de 2015.
- FERNANDES, F.R.C.; ALAMINO, R.C.J.; ARAÚJO, E. *Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais e econômicos*. CETEM/MCTI, 2014. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacoes/livros/item/download/117_f7798e324618d895bc7759700c41a6be>. Acesso em 27 de agosto de 2015.
- MALERBA, J. Apresentação: Áreas livres de mineração: por que e para quê? In: MALERBA, J. (Org.). *Diferentes formas de dizer não: experiências internacionais de resistência, restrição e proibição ao extrativismo mineral*. Rio de Janeiro: FASE; Núcleo de estudos e pesquisas socioambientais-NESA/UFF; Política, economia, mineração, ambiente e sociedade-PoEMAS/UFJF/UFE, 2014.
- PAIVA, C. T. *Proposta de metodologia para análise de passivos ambientais da atividade minerária*. Ministério de Minas e Energia (MME), 2006. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir934/RelatConsultoriaApresentaoMME_PassivosAmbientais.pdf>. Acesso em 27 de agosto de 2015.
- PAIXÃO, M.R.; QUEIROZ, R.M. *Impactos ambientais e danos humanos causados pela extração de amianto no município de Poções - BA*. A legislação brasileira e o controle da exploração de amianto. 10 set 2009. Disponível em: <<http://www.webartigos.com/articles/24591/1/IMPACTOS-AMBIENTAIS-E-DANOS-HUMANOSCAUSADOS-PELA-EXTRACAO-DE-AMIANTO-NO-MUNICIPIO-DE-POCOES---BA-/pagina1.html>>. Acesso em 25 de agosto de 2015.
- PORTO, M.F.; PACHECO, T.; LEROY, J.P. *Injustiça Ambiental e Saúde no Brasil: o mapa de conflitos*, Cooperação Fiocruz - Fundação Oswaldo Cruz e Fase - Federação de Órgãos para Assistência Social e Educacional. Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 2013.
- SAMARCO. *Dossiê O que deve ser feito*, 11/01/2016. Disponível em: <<http://www.samarco.com/balanco/>>. Acesso em 12 de janeiro de 2016.
- SANCHÉZ, L.E. Mineração e meio ambiente. In: FERNANDES, F.; CASTILHOS, Z.; LUZ, A.B.; MATOS, G. (Eds.). *Tendências tecnológicas Brasil 2015*. Geociências e Tecnologia Mineral, Parte 2 - Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro: CETEM, 2007.
- SCLIAR, C. *Agenda 21 e o setor mineral*. Cadernos de Debate: agenda 21 e a sustentabilidade. MMA-Ministério do Meio Ambiente, Brasília. Disponível em: <www.mma.gov.br/index.php?ido=conteudo.monta&idEstrutura=18&idConteudo=1170>. Acesso em 26 de agosto de 2015.
- SOUSA, M.G. *Um estudo sobre a resistência e ofensiva na luta dos Atingidos pela VALE: nos caminhos dos trilhos no Maranhão*. Dissertação (Mestrado em Ciências Sociais). Universidade Federal de São Paulo, 2013.
- VILLAS BÔAS, H.C. Mineração em terras indígenas: A invisibilidade do direito à consulta prévia como um processo e a visibilidade ao flagrante desrespeito de ouvir e consultar os verdadeiros titulares desses direitos. *Paper* apresentado no Seminário Sustainability, promovido pelo CETEM. Rio de Janeiro, 10-11 de outubro/2013. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/images/palestras/2013/sustentabilidade/artigos/hariessa_boas.pdf>. Acesso em 28 de agosto de 2015.
- VILLAS BÔAS, R.C. *Indicadores de sustentabilidade para a indústria extrativa mineral: estudos de casos*. - Rio de Janeiro: CETEM/MCTI/CNPq, 2011.

Mineração – presente e futuro da Amazônia

Elmer Prata Salomão

Antonio Tadeu Corrêa Veiga

GEOS – Geologia para Mineração Ltda.

RESUMO

A Amazônia é a última fronteira mineral importante da Terra – especialmente a parcela contida no território brasileiro, aqui analisada. Sua grande superfície, a geodiversidade e o patrimônio já revelado asseguram um grande potencial mineral, comparável ao das principais regiões produtoras do mundo. Todavia, o subsolo ainda é pouco conhecido e, em muitos casos, mal aproveitado. Coexistem os três estágios tecnológicos de utilização dos recursos minerais pela humanidade: coleta mineral (povos indígenas), extrativismo mineral (garimpos) e mineração organizada (empresas). Embora relativamente recente, a produção formal já alcança destaque internacional e tende a se prolongar por um longo futuro. Se conduzida com responsabilidade e em bases técnicas adequadas, a mineração certamente poderá se harmonizar ao uso dos demais recursos naturais e configurar uma alternativa viável para o desenvolvimento sustentável de uma grande porção da Amazônia, propiciando a geração de benefícios amplos e duradouros.

Palavras-chave Amazônia brasileira. Garimpos. Geodiversidade. Mineração. Recursos minerais.

A ÚLTIMA FRONTEIRA

A Amazônia é a última fronteira mineral importante da Terra – especialmente a parcela contida no território brasileiro, aqui analisada. Sua grande superfície, a diversidade geológica e o patrimônio já revelado asseguram um grande potencial mineral, comparável ao das principais regiões produtoras do mundo. Todavia, o subsolo ainda é pouco conhecido e, em muitos casos, mal aproveitado. Coexistem na região os 3 estágios tecnológicos de utilização dos recursos minerais pela humanidade:

- *Coleta mineral*: uso de objetos e substâncias minerais disponibilizados pela natureza, a exemplo dos instrumentos de pedra, adornos e pigmentos minerais utilizados por povos indígenas há mais de 10.000 anos. A extração de argila para cerâmica indígena também se enquadra nesta modalidade.
- *Extrativismo mineral*: operações simples e informais para remoção e separação de bens minerais em depósitos secundários superficiais (aluviões, colúvios). Predomina trabalho manual ou com uso de equipamentos de pequeno porte (bombas de sucção, monitores hidráulicos, concentração gravimétrica e amalgamação do ouro). Exemplos: garimpagem de ouro, diamante e cassiterita (minério de estanho) em aluviões, praticada no Tapajós, em Rondônia e outras regiões, desde meados do século 20. A extração manual de argila, areia e seixos para construção também representa extrativismo.
- *Mineração organizada*: operações industriais ordenadas de lavra e beneficiamento de minérios

diversos, tecnicamente conduzidas, precedidas por trabalhos de pesquisa e planejamento. Exemplos: minas de ferro, manganês, cassiterita, bauxita, cobre, níquel e outros bens, estabelecidas na região a partir de meados do século 20. Por vezes, a mineração é seguida por industrialização (metalurgia).

Com o declínio sistemático da garimpagem clássica, motivada principalmente pelo esgotamento dos depósitos secundários facilmente aproveitáveis, surgiu uma nova protagonista à cena amazônica: a *empresa garimpeira*, que realiza extração mecanizada, às vezes em grande escala, com uso de equipamentos pesados e usinas de beneficiamento. Não observam, contudo, as boas práticas da mineração e desconsideram as normas legais (trabalhistas, fiscais, minerárias e ambientais), valendo-se da natural dificuldade de fiscalização.

Essa moderna garimpagem acrescentou uma nova problemática à produção mineral na Amazônia, visto potencializar os danos ambientais e os conflitos com a garimpagem tradicional, com a mineração organizada e com os povos locais. Contudo, há esperança de que tais empresas garimpeiras sejam o embrião da pequena e média mineração na Amazônia, desde que expurgadas do viés de ilegalidade que hoje as caracteriza.

Por outro lado, a produção das grandes minerações já alcança destaque internacional e tende a se prolongar por um longo futuro. Se conduzida com responsabilidade e em bases técnicas adequadas, a mineração certamente poderá se harmonizar ao uso dos demais recursos naturais e configurar uma alternativa viável para o desenvolvimento sustentável de uma grande porção da Amazônia, propiciando a geração de benefícios amplos e duradouros.

A GEODIVERSIDADE E O POTENCIAL MINERAL

A geodiversidade expressa as particularidades do meio físico, conforme proposto por Veiga (1999) e depois consagrado pelo Serviço Geológico do Brasil (ex. SILVA, 2008, entre outros). Abrange as rochas, o relevo, o clima, os solos e as águas. Tais atributos resultam da atuação cumulativa de processos geológicos múltiplos. Por sua vez, condicionam a paisagem e propiciam a diversidade biológica e cultural nela desenvolvidas.

O conhecimento da geodiversidade é essencial à abordagem criteriosa de qualquer área ou região. Por preceder a biodiversidade, ajuda a entender a dinâmica ambiental vigente. Além disso, o subsolo pode conter recursos minerais, hídricos e energéticos, cujo aproveitamento precisa ser devidamente equacionado, para não comprometer a própria biodiversidade e a qualidade de vida dos seus habitantes. É o caso da Amazônia.

A porção contida no território brasileiro compreende 2 grandes domínios geoambientais, ilustrados na Figura 1:

- Antigo núcleo continental estável, denominado Plataforma Amazônica. Abrange cerca de 6,5 milhões de quilômetros quadrados, dos quais 4,5 milhões situados em território brasileiro. São rochas cristalinas variadas, com mais de 600 milhões de anos. Formam planaltos ao norte e ao sul, correspondentes às áreas cratônicas ou *terras altas* da Amazônia.
- Bacia sedimentar: formada por sedimentos homogêneos com menos de 600 milhões de anos, depositados em extensa planície que corta transversalmente a plataforma antiga. Inclui a sedimentação ativa nas várzeas dos grandes rios, formadas há menos de 10.000 anos. São as *terras baixas* da Amazônia.

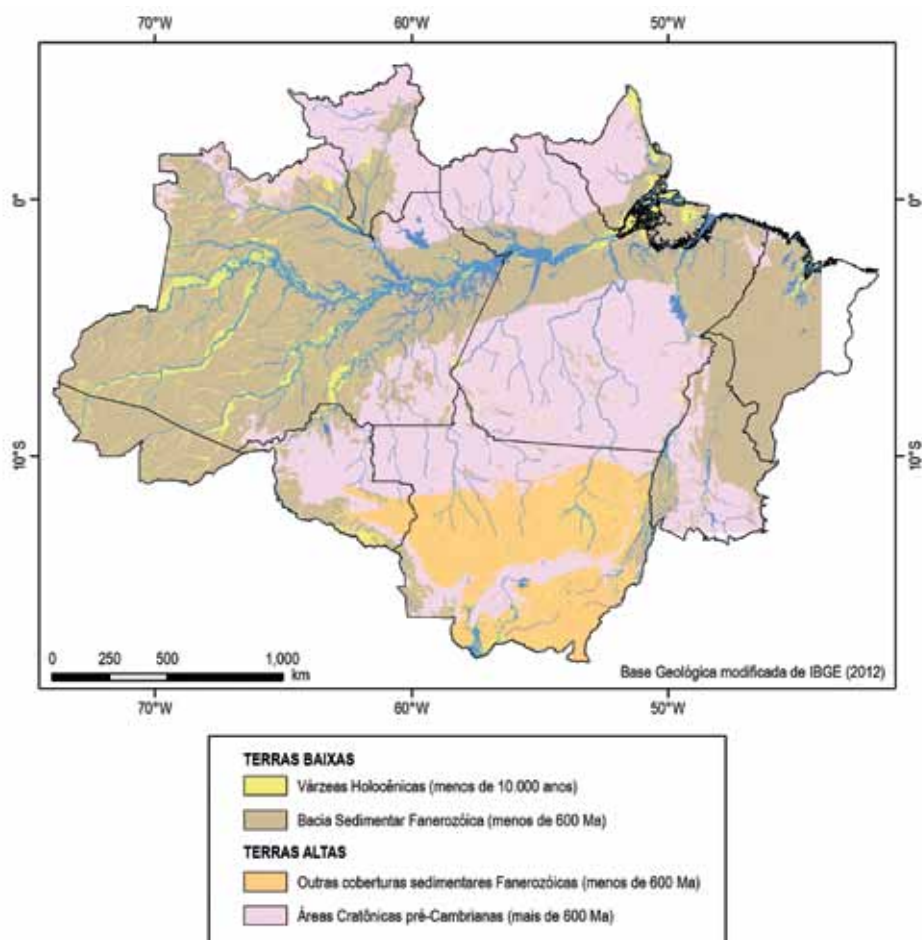


Figura 1 Domínios geoambientais na Amazônia brasileira.

A Tabela 1 compara os principais atributos desses domínios. As diferenças na constituição e na evolução geológica resultam em potenciais minerais bastante distintos, porém ambos abrigam grandes jazimentos e possibilidades de destaque internacional. A forma de uso dos recursos também é diferente.

instalada quando América do Sul e África formavam um só continente, ali drenado de leste para oeste. A leste dessa bacia estenderam-se os sedimentos da bacia do Maranhão, com geologia similar.

A rede hidrográfica assumiu a sua configuração atual após a abertura do oceano Atlântico, iniciada há

Tabela 1 Domínios geoambientais da Amazônia

Atributos	Terras altas	Terras baixas
Constituição geológica	Rochas ígneas e metamórficas variadas, intrusões graníticas, derrames vulcânicos e sedimentos continentais.	Rochas sedimentares marinhas e continentais.
Idade geológica	Arqueana a proterozoica (mais de 600 milhões de anos).	Paleozoica a cenozoica (menos de 600 milhões de anos).
Evolução e complexidade	Terrenos com grande diversidade de rochas e estruturas complexas, resultantes da superposição de diversos eventos tectônicos.	Terrenos homogêneos com camadas horizontais, apenas localmente perturbadas.
Potencial mineral	Metais preciosos, metais ferrosos e metais não-ferrosos Diamante e outras gemas	Bens minerais não-metálicos Petróleo e gás
Tipos de jazidas e formas de utilização	Grandes jazidas para aproveitamento industrial: ferro, manganês, estanho, ouro, cobre, cromo, níquel; possivelmente urânio, zinco, chumbo e outros. Acumulações superficiais de bens valiosos, propícias à garimpagem: ouro, estanho, diamante e outras gemas.	Grandes jazidas para aproveitamento industrial: bauxita (alumínio), caulim, sais de potássio, sal-gema, petróleo e gás, etc.

(Fonte: VEIGA, 1999)

A história geológica da Amazônia abrange uma longa sucessão de eventos favoráveis à formação de concentrações minerais economicamente aproveitáveis. Em tempos remotos, há mais de 2,5 bilhões de anos, ocorreram acumulações de metais diversos, em sequências vulcano-sedimentares marinhas (ferro, manganês, ouro, cobre e outros) e em corpos ígneos associados (níquel, cromo, etc.).

Seguiu-se um prolongado período de evolução continental. Entre 2 bilhões e 1 bilhão de anos atrás, o *protocontinente* amazônico sofreu diversas rupturas acompanhadas por vulcanismo, intrusões graníticas e sedimentação, favoráveis à concentração de ouro e estanho, entre outros metais. Em suas bordas desenvolveram-se bacias marinhas com rochas vulcânicas e sedimentares, propícias à acumulação de ouro e metais básicos. As formações antigas encontram-se preservadas nas terras altas e nas faixas que bordejam o cráton Amazônico.

Uma grande ruptura permitiu, há cerca de 600 milhões de anos, a formação de um mar interno, progressivamente preenchido por rochas argilosas, arenosas e carbonáticas, com acumulações de fosfatos, sais diversos e hidrocarbonetos. Desenvolveu-se assim a planície das terras baixas, em zona de sedimentação ainda ativa,

cerca de 140 milhões de anos. Com o soerguimento da cordilheira dos Andes, iniciado há 25 milhões de anos (PARRA et al., 2009), a bacia Amazônica passou a ser vigorosamente alimentada por sedimentos providos da erosão das montanhas a oeste. O barramento represou e depois inverteu o curso do grande rio, que passou a correr para leste. Ao longo da bacia formaram-se extensas coberturas argilosas e, mais tarde, os depósitos da várzea do sistema Solimões - Amazonas, estes em contínuo retrabalhamento.

As terras altas permaneceram emersas e expostas ao intemperismo laterítico, típico de climas tropicais, há pelo menos 15 milhões de anos, o que resultou no enriquecimento das concentrações aflorantes (expostas na superfície) de ferro, manganês e ouro. Desenvolveram-se solos muito profundos, encobrindo as rochas e as concentrações de metais solúveis porventura presentes (cobre, zinco e outros).

A alternância de períodos de clima úmido com períodos de clima semi-árido propiciou a formação de extensos depósitos de bauxita e caulim nas terras baixas. Ao mesmo tempo, provocou oscilações nos limites da cobertura florestal e concentrou minerais resistentes (ouro e estanho, por exemplo) nos aluviões que preencheram os vales das terras altas, então

dominadas por cerrados. Já havia sinais de ocupação humana na região. A última expansão da floresta pluvial, iniciada há 12.000 anos, ao final do período glacial mais recente, resultou na estabilização da paisagem e no estabelecimento das condições ambientais vigentes até hoje (VEIGA, 1990).

Formaram-se assim jazimentos de grande porte, por vezes ricos e passíveis de detecção direta quando aflorantes, porém comumente mascarados por solos espessos e densas coberturas florestais, aos quais não se aplicam os modelos e métodos exploratórios desenvolvidos para regiões de clima temperado. Sua localização em áreas remotas e sem infraestrutura, pouco conhecidas ou descaracterizadas por garimpagem, dificulta a realização de campanhas exploratórias – o que torna a região ainda pouco atrativa para a exploração mineral.

Por tudo isso, a maioria das descobertas minerais nas terras altas ainda ocorre de modo empírico ou fortuito. O potencial do subsolo permanece aberto, sobretudo para jazidas não aflorantes. As terras baixas são ainda menos conhecidas, devido à menor visibilidade geológica, resultante do recobrimento por sedimentos jovens.

A diferenciação desses domínios mostra o espaço amazônico nitidamente dividido quanto ao modo de apropriação dos recursos minerais, conhecidos e potenciais. Como visto na Tabela 1, a garimpagem desordenada e toda a problemática decorrente se restringem a concentrações de bens valiosos presentes nas terras altas. Os demais recursos existentes, seja nas terras altas ou nas terras baixas, têm sido ou serão aproveitados em empreendimentos regulares, muitos deles de grande porte e expressivo significado econômico, devidamente enquadrados na legislação.

A Figura 2 mostra a geologia e os principais recursos minerais da Amazônia. Os pontos numerados no mapa representam áreas em lavra ou em vias de produção, discriminadas na Tabela 2. Os pontos sem numeração indicam áreas menos importantes atualmente – abrangem depósitos pouco pesquisados, garimpos ocasionais e algumas minas já desativadas.

A distribuição dos recursos conhecidos atesta o potencial da região. Nas terras altas se concentram:

- Jazidas de grande porte, pesquisadas e lavradas em empreendimentos mineiros importantes (ex. ferro, bauxita, estanho);
- Inúmeros aluviões, colúvios e filões aflorantes com bens minerais valiosos, facilmente aproveitáveis, propícios à garimpagem (ex. ouro, estanho);
- Os recursos hidrelétricos de mais fácil aproveitamento;
- Os principais projetos de colonização implantados a partir dos anos 1970;
- Boa parte das unidades de conservação de recursos naturais;
- As fronteiras da Calha Norte e da Bolívia;
- Muitos remanescentes de povos indígenas, na maioria expulsos de outras regiões após a conquista portuguesa.

Compreende-se assim que as terras altas sejam o espaço preferencial das tensões e conflitos que assolam a Amazônia, em geral marcados pela ocupação desordenada e pelo mau uso dos recursos naturais disponíveis (VEIGA, 1999).

Tabela 2 Principais recursos minerais da Amazônia.

#	Toponímia	Substância	Município	UF	Latitude	Longitude	Situação m 2013	Observações
Ferro e Manganês								
1	Rio Jatapu	Fe, Al	Urucará	AM	-1,488	-58,448	mina ativa	Grupo João Santos (insumos para cimento em Manaus)
2	Vila Nova	Fe	Pedra Branca do Amapari	AP	0,800	-51,930	mina paralisada	Zamin Ferrous Amapá
3	Serra do Navio	Mn	Serra do Navio	AP	0,900	-51,970	mina ativa de 1957 a 1997	ICOMI (recursos marginais remanescentes)
4	Buritirama	Mn	Marabá	PA	-5,524	-50,250	mina ativa	Mineração Buritirama S.A.
5	Carajás - Serra Sul S11D	Fe	Canaã dos Carajás	PA	-6,380	-50,400	mina em implantação	Vale S.A.
6	Carajás - Azul	Mn	Parauapebas	PA	-6,110	-50,300	mina ativa	Vale S.A.

#	Toponímia	Substância	Município	UF	Latitude	Longitude	Situação m 2013	Observações
7	Carajás - Serra Norte N4 e N5	Fe	Parauapebas	PA	-6,090	-50,120	mina ativa	Vale S.A.
Ouro								
8	Tartarugalzinho	Au	Tartarugalzinho	AP	1,570	-51,010	mina ativa	Beadell Resources
9	Tucano	Au	Pedra Branca do Amapari	AP	0,910	-51,870	mina ativa	Mineração Pedra Branca do Amapari (Beadell)
10	Rio Gurupi	Au	Viseu	PA	-1,240	-46,170	garimpo, pesquisa	Kinross e outras empresas
11	Volta Grande do Xingu	Au	Senador José Porfírio	PA	-3,520	-52,030	mina em implantação	Belo Sun Mineração Ltda. (ex-VMC)
12	Tocantinzinho	Au	Itaituba	PA	-5,900	-56,025	mina em implantação	Eldorado Gold Corporation
13	Cuiú-Cuiú	Au	Itaituba	PA	-5,938	-56,527	garimpo, pesquisa	
14	São Jorge	Au	Itaituba	PA	-6,234	-56,739	mina ativa	Brazilian Resources Mineração Ltda.
15	Palito	Au	Itaituba	PA	-6,320	-55,790	mina subterranea	Serabi Mineração Ltda.
16	São Francisco	Au	Itaituba	PA	-6,422	-55,975	garimpo, pesquisa	
17	Patrocínio	Au	Itaituba	PA	-6,861	-56,400	garimpo, pesquisa	Belo Sun Mineração Ltda. (ex-VMC)
18	Castelo dos Sonhos	Au, Cu	Altamira	PA	-8,117	-54,964	garimpo, pesquisa	Osisko Brasil Mineração Ltda.
19	Serra Leste (Serra Pelada)	Au, Pd, Pt	Curionópolis	PA	-5,936	-49,673	mina em implantação	Coomigasp + Colossus
20	Igarapé Bahia	Au, Cu	Parauapebas	PA	-6,030	-50,580	mina ativa	Vale S.A.
21	Andorinha	Au	Rio Maria	PA	-7,422	-49,853	mina ativa	Reinarda Mineração Ltda. (Troy Resources)
22	Cabeceira do Inajá	Au	Santa Maria das Barreiras	PA	-8,653	-50,869	pesquisa	Aura Gold Mineração Ltda.
23	Matupá	Au	Matupá	MT	-10,107	-55,131	pesquisa	Rio Novo Mineração Ltda.
24	Mina S.Vicente, S.Francisco	Au	Vila Bela da Santíssima Trindade	MT	-14,555	-59,784	mina paralísada, pesquisa	Aura Minerals (ex-Santa Elina)
25	Poconé	Au	Poconé	MT	-16,249	-56,616	garimpo, mina	Diversos
26	Monte do Carmo	Au	Monte do Carmo	TO	-10,819	-48,068	pesquisa	Monte Sinai Mineração Ltda.
27	Córrego Paiol	Au	Almas	TO	-11,675	-47,143	mina	Rio Novo Mineração Ltda.
Bauxita (Alumínio), Caulim, Calcário, Gipsita e Fosfato								
28	Itautinga	Gipsita, Calcário	Urucará e Nhamundá	AM	-1,772	-58,523	mina ativa	Grupo João Santos (insumos para cimento em Manaus)
29	Trombetas	Bauxita	Oriximiná	PA	-1,518	-56,363	mina ativa	MRN - Mineração Rio do Norte S.A.

#	Toponímia	Substância	Município	UF	Latitude	Longitude	Situação m 2013	Observações
30	Juruti	Bauxita	Juruti	PA	-2,500	-56,040	mina ativa	Alcoa
31	Serra do Almeirim	Bauxita refratária	Almeirim	PA	-1,203	-52,682	mina em reativação	Mineração Santa Lucrécia (Imerys)
32	Morro do Felipe	Caulim	Vitória do Jari	AP	-0,878	-52,403	mina ativa	Cadam
33	Rio Capim	Caulim	Ipixuna do Pará	PA	-2,500	-47,800	mina ativa	Imerys
34	Miltônia	Bauxita	Paragominas	PA	-3,343	-47,806	mina ativa	Norsk Hydro (ex-Vale)
35	Marechal Rondon	Bauxita	Marechal Rondon	PA	-4,800	-48,483	pesquisa	Votorantim Metais
36	Santana	Fosfato	São Felix do Xingu	PA	-9,627	-52,190	pesquisa	MBAC Fertilizantes Ltda.
37	Tombador - Salobra	Calcário	Nobres	MT	-14,617	-56,250	mina ativa	diversas empresas
38	Morro Grande	Calcário	Rosário Oeste	MT	-14,675	-56,300	mina ativa	diversas empresas
39	Serra Pirocaua	Fosfato	Godofredo Viana	MA	-1,270	-46,030	pesquisa	Osaki Mineração Ltda.
40	Rio Tinto e Bodanca	Calcário	Codó	MA	-4,540	-44,020	mina ativa	diversas empresas
Estanho, Nióbio, Minerais Radioativos e Molibdênio								
41	Pitinga	Sn, Nb, Y, Zr, Ta, F, ETR	Presidente Figueiredo	AM	-0,759	-60,108	mina ativa	Minsur Taboca
42	Santa Bárbara	Sn	Jamari	RO	-9,143	-63,069	mina ativa	ERSA (CSN)
43	Bom Futuro	Sn	Ariquemes	RO	-9,781	-63,550	garimpo regular	Coopersanta
Cobre, Níquel, Zinco e Chumbo								
44	Carajás - Salobo	Cu, Au	Marabá	PA	-5,780	-50,550	mina ativa	Vale S.A.
45	Alemão	Cu, Au	Parauapebas	PA	-6,030	-50,590	mina subterrânea em implantação	Vale S.A. (próximo à antiga mina de ouro Igarapé Bahia)
46	Serra do Jacaré	Ni	São Felix do Xingu	PA	-6,220	-51,900	mina projetada	Anglo American
47	Sossego	Cu, Au	Canaã dos Carajás	PA	-6,390	-50,050	mina ativa	Vale S.A.
48	Vermelho	Ni	Canaã dos Carajás	PA	-6,460	-49,880	mina projetada	Vale S.A.
49	Onça-Puma	Ni	São Felix do Xingu	PA	-6,560	-51,220	mina ativa	Mineração Onça Puma Ltda (Vale)
50	Serra do Expedito	Zn, Pb, Au, Ag, Cu	Aripuanã	MT	-10,078	-59,499	área pesquisada	Votorantim, Anglo American + Karmin
Diamante								
51	São Luis	Diamante	Juína	MT	-11,519	-59,097	garimpo	
	PETRÓLEO, GÁS, SAIS DIVERSOS							
52	Urucu	Gás Natural, Óleo	Carauari	AM	-4,895	-65,197	área em produção	Petrobrás
53	Autazes	K	Autazes	AM	-3,573	-59,083	área em pesquisa	Potássio do Brasil Ltda

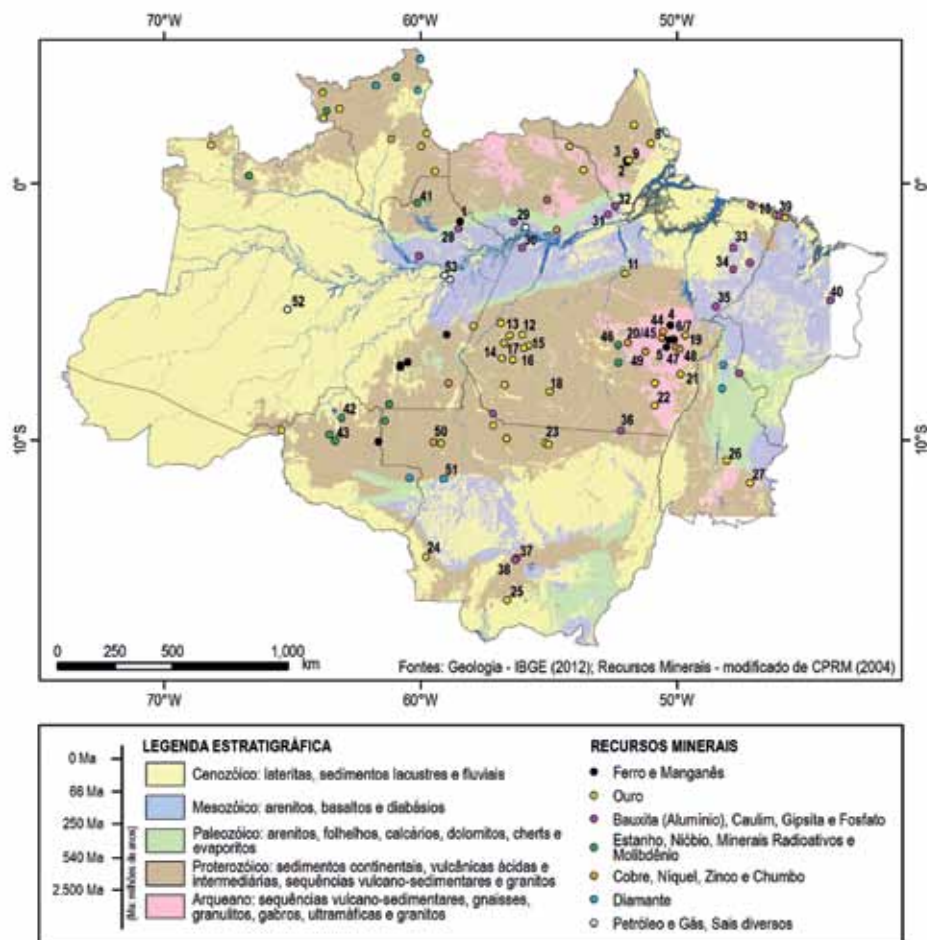


Figura 2 Principais recursos minerais da Amazônia.

EVOLUÇÃO HISTÓRICA

O ouro do alto rio Negro era conhecido por colonizadores portugueses desde 1749. O ouro do rio Tapajós desde 1755 e o do rio Madeira desde 1758 (FERREIRA, 1983). Nessa época, o Brasil era o maior produtor mundial do metal, graças às lavras em atividade no Sudeste e Centro-Oeste (PINTO, 1979). Todavia, o ouro da Amazônia foi mantido em rigoroso sigilo. Ofícios expedidos pela Coroa Portuguesa restringiam as atividades na região ao “estabelecimento de aldeias e civilização dos índios”, sob a alegação de que apenas a agricultura e o comércio poderiam trazer efetivo progresso à região. A mineração era reiteradamente apresentada como atividade nefasta, incompatível com o estabelecimento de uma sociedade estável (FERREIRA, 1983).

Por trás desse argumento, a Coroa Portuguesa reconhecia a sua incapacidade de controlar a eventual produção aurífera da Amazônia, mediante um sistema análogo ao que operava no restante do Brasil. Além disso, temia-se a perda daqueles territórios precariamente conquistados (VEIGA, 1990). De fato, outras potências colonialistas já rondavam o ouro amazônico desde o século 17. Exploradores holandeses extraíram ouro na bacia do rio Maracá, no atual Amapá, até serem expulsos em 1623 (LESTRA; NARDI, 1982).

A leste da floresta amazônica, na bacia do rio Gurupi, que divide os atuais Estados do Maranhão e Pará, foi noticiada a ocorrência de ouro próxima ao litoral, em 1624. Em 1678, jesuítas iniciaram a produção,

valendo-se de informações de índios e do trabalho de negros africanos. Em 1722 empreenderam-se as primeiras expedições oficiais às chamadas minas do Pindaré, acessíveis pelo mar. Todavia, uma provisão régia de 1730 ordenou que os povos da Capitania do Maranhão “não se envolvessem com os serviços das minas e se aplicassem à agricultura, que era o que mais lhes convinha” – à maneira das interdições impostas no Grão-Pará.

Em 1734 descobriu-se ouro em afluentes do rio Guaporé, na borda sudoeste da Amazônia. Ali não houve interdição. As lavras de ouro foram integradas à região Centro-Oeste, com a criação da Capitania do Mato Grosso em 1748.

Após a Independência, aconteceram outros conflitos no Amapá. A partir de 1882, ocorreu grande afluxo de crioulos vindos da Guiana Francesa e Caribe, para produção de ouro de aluvião nas bacias dos rios Flexal, Araguari, Calçoene e Cassiporé. No final do século 19, a Anglo-French Gold Mining Company instalou no Lourenço uma operação-piloto em veios de quartzo aurífero – abandonada quando o *Contestado Franco-Brasileiro* foi reincorporado por acordo ao território brasileiro. Das antigas *villages* restaram poucos vestígios, porém permanece na região a toponímia de origem francesa (VEIGA, 1990). A redescoberta do ouro no Cassiporé em 1932 desencadeou uma nova invasão garimpeira, dessa vez com maior participação de brasileiros. A região foi novamente desocupada durante a 2ª Guerra Mundial (1938/1945).

Na região do rio Gurupi, as iniciativas empresariais pioneiras também malograram, devido à insuficiência de recursos e a sucessivos conflitos com garimpeiros e índios. As demais províncias auríferas mencionadas, descobertas no século 18, somente foram redescobertas em meados do século 20 – devido à ação de novos pioneiros e ainda fora do alcance do aparelho estatal. Como se vê, a história da mineração na Amazônia seguiu um curso distinto do restante do Brasil, onde a produção mineral sempre recebeu algum fomento do poder público.

Na Amazônia prevaleciam descobertas fortuitas e um grande desconhecimento do potencial do subsolo. Um caso merece destaque: a Estrada de Ferro Madeira-Mamoré foi penosamente construída ao longo de um dos maiores depósitos de ouro aluvionar do planeta – o próprio curso do rio Madeira, entre Guajará-Mirim e Porto Velho.

Foram duas etapas de construção: 1878-1879 e 1907-1912. Não se sabia, naquela época, do ouro ali descoberto – e zelosamente encoberto – no século 18. O desconhecimento da realidade local comprometeu o

sucesso do empreendimento e resultou no abandono precoce da ferrovia. Outros fracassos semelhantes serviram para retardar a expansão capitalista e fortalecer o mito do *Inferno Verde*, persistente até meados do século 20 (VEIGA, 1990).

O início da mineração empresarial na Amazônia coincidiu com o liberalismo econômico que embasou a Constituição de 1946 (MONTEIRO, 2005). Descoberta nos anos 1940, a jazida de manganês da Serra do Navio, no Amapá, foi cedida em concorrência à Icomi, empresa brasileira depois associada à norte-americana Bethlehem Steel. Os embarques de minério para os EUA estenderam-se de 1957 até 1997.

À mesma época, os aluviões auríferos e estaníferos – antes praticamente desconhecidos – passaram a ser aproveitados de modo efetivo. Vigorava a garimpagem tradicional, praticada à margem do Estado, ainda ausente da região, segundo um modelo próprio de organização, fundado no pioneirismo e ajustado à realidade regional (SALOMÃO, 1984). As principais áreas de garimpo distribuíam-se na Província Aurífera do Médio Tapajós (a partir de 1958) e na Província Estanífera de Rondônia (a partir de 1959). Sucederam-se importantes descobertas, convocando a esse *outro Brasil* um expressivo contingente de trabalhadores, não incorporados ao processo de industrialização e urbanização então vivido no país.

A produção informal atingiu patamares expressivos e estimulou o ingresso de empresas de mineração, estruturadas para maiores escalas de produção e amparadas nos anos 1960 em uma política oficial, de inspiração militar, para ocupação estratégica da Amazônia. Iniciaram-se as grandes campanhas exploratórias, na esteira do Código de Mineração de 1967 e do 1º Plano Mestre Decenal da mineração. Aconteceram descobertas importantes, com destaque para as jazidas de ferro e manganês da região de Carajás, que se revelou como a maior província mineral brasileira (SANTOS, 1981, 2002). Nos anos 1970 e 1980, tais iniciativas foram favorecidas pela cartografia e levantamentos básicos providos pelo Projeto RADAM.

Por sua vez, a garimpagem de estanho em Rondônia foi vedada em 1971 por um ato político. A instalação de empresas mineradoras trouxe novas bases tecnológicas para pesquisa e melhor aproveitamento das jazidas. Outras áreas viveram transformações expressivas no período, pela ação de empresas brasileiras e estrangeiras, com apoio governamental. Destacam-se: a pelotização do minério de manganês no Amapá (Icomi); a implantação de uma siderúrgica no Amazonas (Siderama, empresa de economia mista); a extração industrial de caulim no Amapá (Cadam); a lavra da

bauxita de Trombetas, no Pará (MRN); a produção de alumina e alumínio no Pará (Alunorte e Albras), viabilizada pela construção da usina hidrelétrica de Tucuruí.

Em 1977 a CVRD (atual Vale) assumiu a condução do Projeto Ferro Carajás. Em 1980 o Governo Federal criou o Programa Grande Carajás, para coordenar a sua implantação, junto aos grandes projetos de alumina e alumínio (MONTEIRO, 2005). Consolidava-se a nova escala de aproveitamento dos recursos naturais da Amazônia, com a instalação de grandes minas, de indústrias de transformação e de toda a infraestrutura necessária à sua viabilização – geração hidrelétrica, portos, ferrovias, rodovias, vilas. Nos anos 1980, as transformações no leste do Pará foram ampliadas pela instalação de indústrias de ferro-gusa, ferroligas e silício metálico.

Ao mesmo tempo, o Brasil ingressava no seu segundo ciclo do ouro. Nos anos 1980, o aumento do preço do metal e o impacto da descoberta de Serra Pelada, a leste de Carajás, estimularam uma enorme escalada garimpeira, alimentada pela crise econômica que assolava o país. A produção informal alastrou-se rapidamente em todas as regiões auríferas da Amazônia. Inaugurava-se o conflito entre a mineração empresarial e a garimpagem. Em 1983, o Ministério de Minas e Energia criou a Reserva Garimpeira do Tapajós, visando resguardar a atuação dos garimpeiros estabelecidos naquela região desde o final dos anos 1950.

Todavia, o centralismo imposto pelos governos militares enfraquecia gradualmente, até encerrar-se em 1985. Em 1988 foi promulgada nova Constituição, que extinguiu a figura do garimpeiro e favoreceu a criação de cooperativas garimpeiras. Leis complementares criaram um novo regime – a Permissão de Lavra Garimpeira (PLG) – e criminalizaram a produção, o transporte e a comercialização de bens minerais produzidos sem autorização legal. O garimpeiro tradicional, em sua anomia histórica, tornou-se um fora da lei.

A partir dos anos 1980, o esforço produtivo se deslocou, em muitas áreas, dos depósitos secundários em exaustão para as suas fontes primárias – vale dizer, dos aluviões para os filões. Isso ampliou os horizontes exploratórios, porém estendeu em igual medida a devastação e os conflitos, com o surgimento das empresas garimpeiras. Apesar das restrições, em 1993 cerca de 300.000 pessoas ainda atuavam diretamente na garimpagem na Amazônia, distribuídos em mais de 1.000 frentes de produção informal (DNPM, 1993). As fronteiras internacionais foram ultrapassadas, estendendo a extração predatória aos países vizinhos: Bolívia, Colômbia, Venezuela, Guiana, Suriname e Guiana Francesa.

Em meio aos conflitos dos anos 1980, despontaram nas empresas de mineração as primeiras iniciativas para desenvolvimento de tecnologias apropriadas para prospecção, pesquisa, lavra e beneficiamento dos aluviões amazônicos (SALOMÃO; VEIGA, 1989). Por outro lado, a questão ambiental passou a ser considerada com mais rigor no planejamento e execução das lavras, especialmente após o advento da Lei de Crimes Ambientais em 1998.

PANORAMA ATUAL DA EXTRAÇÃO MINERAL

Os recursos minerais da Amazônia ainda são pouco conhecidos, devido à falta de levantamentos básicos e de investimentos, modelos e métodos exploratórios adequados às características da região (VEIGA, 1999). Ressaltam-se:

- Dificuldades de acesso, baixa visibilidade geológica (solos espessos, densa cobertura florestal), infraestrutura precária, insalubridade, etc.
- Bases cartográficas e geológicas deficientes (escalas muito amplas, desatualizadas).
- Extração mineral restrita a jazimentos aflorantes.
- Investimentos exploratórios privados ainda pouco expressivos, concentrados nos alvos mais evidentes (ex. Carajás).

No entanto, o aproveitamento desses recursos já propicia uma expressiva parcela da produção mineral brasileira. A Figura 2 mostrou a distribuição do patrimônio mineral conhecido, enfatizando as diferenças entre os dois grandes domínios geoambientais: as terras altas e as terras baixas. As concentrações minerais mais notáveis estão na região de Carajás (PA), porém há jazimentos importantes em muitas outras regiões.

A Tabela 3 mostra o valor da produção mineral da Amazônia Legal em 2013, em milhões de dólares. Ressalta-se a produção do Pará. Entre as substâncias produzidas, destacam-se: ferro, cobre, ouro, alumínio (bauxita), estanho, manganês e caulim.

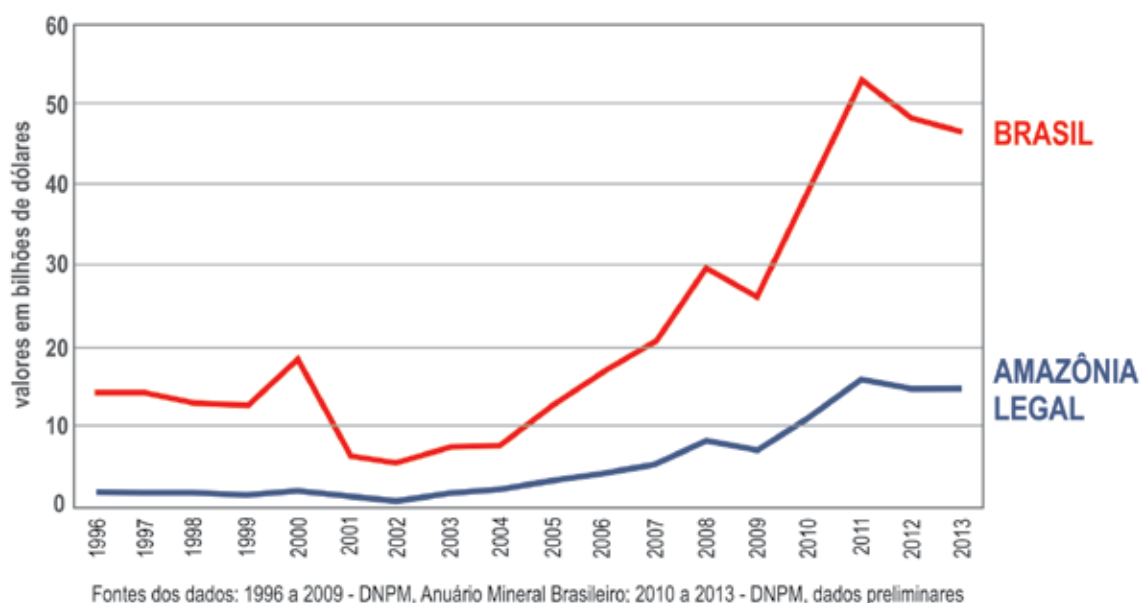
Tabela 3 Valor da produção mineral comercializada da Amazônia (bruta + beneficiada) em milhões de dólares, ano-base 2013.

Substância	Acre	Amapá	Amazonas	Maranhão	Mato Grosso	Pará	Rondônia	Roraima	Tocantins	Total Amazônia	Total Brasil	%
Ferro		219,96	0,08		0,24	10.058,54			6,90	10.285,72	29.683,31	34,65
Cobre						1.322,40				1.322,40	2.042,06	64,76
Ouro		456,61		105,60	326,81	5,40	22,58		1,25	918,25	2.568,22	35,75
Alumínio (bauxita)						878,87				878,87	959,83	91,56
Estanho			234,19		0,06	36,97	109,90			381,12	394,24	96,67
Manganês						260,36	1,86			262,23	369,37	70,99
Caulim						219,85				219,85	255,82	85,94
Calcário e dolomito				4,27	153,09	1,74	0,30		46,72	206,12	1.449,34	14,22
Materiais para construção ¹	1,81	5,09	11,35	37,34	70,81	11,02	26,73	3,10	10,25	177,51	3.610,91	4,92
Outros bens ²		0,70	57,99	3,41	1,80	8,78	19,16		14,40	106,22	5.189,44	2,05
Total	1,81	682,36	303,61	150,62	552,82	12.803,93	180,54	3,10	79,52	14.758,29	46.522,55	31,72

(Fonte: DNPM, 2014). Notas: (1) Materiais para construção: abrangem areia, argilas, rochas (britadas) e cascalho; (2) Outros bens produzidos na Amazônia em 2013: areia industrial, cromo, diamante, gemas, gipsita, nióbio, níquel, prata, tungstênio.

As estatísticas da produção mineral evidenciam um expressivo crescimento da produção da região nas últimas décadas (Figura 3). Em 2013, a Amazônia abrigava cerca de 10% das minas brasileiras. Contudo, o valor da produção superou 31% do total produzido no Brasil, excluídos petróleo e gás (DNPM, 2014).

A receita mineral brasileira caiu de 46,5 bilhões de dólares em 2013 para cerca de 40 bilhões em 2014, devido à queda dos preços dos bens exportados, sobretudo minério de ferro. Entretanto, o valor da produção da Amazônia permaneceu estável, em torno de 14 bilhões de dólares, o que elevou a participação da região para

**Figura 3** Evolução do valor da produção mineral do Brasil e da Amazônia.

35% do total. Essa parcela tende a aumentar em breve, com o crescimento esperado da produção de cobre, níquel e ouro, além da enorme ampliação da mina de ferro de Carajás com a lavra do corpo S11D, ora em implantação, que começará produzindo 90 milhões de toneladas de minério por ano.

O perfil das minas atesta o aproveitamento de grandes jazidas rasas. A produção da Amazônia em 2013 resultou de 389 minas, para um total de 3.812 minas no Brasil. Destacam-se 20 minas de grande porte (com produção anual superior a 1 milhão de toneladas de minério) e 89 minas de médio porte (entre 1 milhão e 100 mil toneladas de minério por ano). São minas a céu aberto, ou seja, adequadas à extração de minérios superficiais. A lavra subterrânea ainda se resume a 3 pequenas minas de ouro, situadas no Pará e no Mato Grosso.

As grandes minas resultam de investimentos em prospecção e pesquisa realizados há décadas. São operações industriais de larga escala, destinadas essencialmente à exportação de concentrados minerais. Em geral são minas a céu aberto mecanizadas (tratores ou dragas) com circuitos de beneficiamento convencionais (ex. britagem, lavagem, eventualmente moagem e algum tratamento químico). Como dito, são empreendimentos economicamente importantes, muitos deles com destaque mundial.

Os seus impactos diretos geralmente afetam áreas restritas, são controlados e, muitas vezes, reversíveis. Abrangem: desmatamento, erosão e assoreamento, emissão de poeira, ruídos, descarte de efluentes, etc. Alguns grandes empreendimentos acarretaram impactos adicionais no seu entorno, ao atraírem populações precariamente estabelecidas e sem ocupação regular, a exemplo do ocorrido nos anos 1980 no *Beiradão* do Jari (AP) e em Parauapebas (PA), na região de Carajás.

A precariedade das bases sociais e econômicas da Amazônia ainda dificulta a difusão dos benefícios propiciados pela mineração formal. Há iniciativas recentes para aquisição de bens e serviços na própria região, como forma de incrementar os ganhos proporcionados pela mineração. Todavia, ainda há dificuldade para recrutamento e formação de profissionais locais.

Somam-se as tradicionais dificuldades para agregar valor aos produtos minerais no Brasil, que não permitem a instalação de polos industriais de transformação. O único polo metalúrgico na Amazônia, o do alumínio, passa por grave crise e ameaça ser desativado, em virtude do alto custo da energia elétrica e da falta de uma política industrial para a região.

Por tudo isso, o desenvolvimento da Amazônia parece ficar sempre aquém da expectativa e do discurso

oficial, a despeito da geração de renda e da inegável melhoria dos indicadores socioeconômicos das localidades próximas às minas (MONTEIRO, 2005). Furtado e Urias (2013) ressaltam que o uso dos recursos naturais só impulsionou a diversificação e o fortalecimento econômico em países onde se investiu muito em educação, a exemplo do Canadá e da Austrália. Na Amazônia ainda não se percebe essa transformação.

De todo modo, a cidade de Parauapebas (PA), situada junto à mina de Carajás, já se destaca no cenário nacional como um *núcleo especializado em mineração*. Embora padeça de crescimento populacional acelerado, compara-se assim a Itabira (MG), onde há um grande contingente dedicado à mineração e atividades de apoio, desde meados do século 20. Em segundo plano na região há alguns *núcleos embrionários em mineração*, marcados por menor especialização e menor volume de emprego na atividade mineradora: Macapá e Mazagão, no Amapá; Marabá, Guamá e Paragominas, no Pará (FURTADO; URIAS, 2013).

Quanto aos garimpos, são operações sem planejamento, efetuadas de modo desordenado e sem compromisso com o aproveitamento eficaz das jazidas e com a proteção ambiental. A produção é informal, realizada à margem da legislação minerária, ambiental, trabalhista e tributária. A regularização ainda é incipiente. Embora estabeleçam imediato relacionamento comercial com as comunidades envolvidas – o que favorece a sua integração econômica e política local – não trazem benefícios duradouros às comunidades onde atuam (VEIGA, 1999).

UM NOVO OLHAR SOBRE A MINERAÇÃO NA AMAZÔNIA

A Amazônia brasileira busca há décadas uma forma segura e sustentável de desenvolvimento. Suas características singulares impõem condicionantes às atividades econômicas, no sentido de preservar a floresta, integrar as comunidades locais e trazer progresso efetivo. As tentativas históricas de promover o desenvolvimento com agropecuária e extração madeireira nem de longe atenderam essas condições. Por sua vez, a mineração industrial desponta como uma atividade econômica adequada à região, por ser extremamente localizada e gerar recursos necessários para a mitigação dos impactos e a compensação ambiental.

O pequeno impacto da mineração no meio físico pode ser avaliado com um simples exercício matemático. A produção da Amazônia em 2013 totalizou 175 milhões de toneladas de minérios diversos, segundo

dados preliminares do DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Considerando as características da produção de cada tipo de minério e os materiais estéreis retirados nas operações, é possível estimar as quantidades de solos e rochas removidas na soma das minas, em 2013. O cálculo atinge 566 milhões de toneladas lavradas (minérios + estéreis). Computando-se as respectivas densidades, chega-se ao volume total escavado em 2013, em todas as minas da Amazônia: 277 milhões de metros cúbicos.

É o volume equivalente a uma cava com superfície de 554 hectares e 50 metros de profundidade. Essa superfície corresponde a uma pequena fazenda, ou uma área quadrada com 2.350 metros de lado. Ressalta-se a receita produzida em seu interior, expressa na Tabela 3: mais de 14,7 bilhões de dólares! Algo como 26,6 milhões de dólares por hectare lavrado, ou 2.664 dólares por metro quadrado ao ano.

Nenhum empreendimento econômico sequer se aproxima dessa escala de geração de riquezas. Apenas para comparação, a produtividade da soja na região Norte é de 3 toneladas por hectare. A cotação em 2013 oscilava em torno de 420 dólares por tonelada. A receita do agronegócio alcançaria então 1.260 dólares por hectare, muito menor do que a receita média proporcionada pelas jazidas em lava. Não há dúvida de que a mineração industrial pode ser a base para a construção de políticas públicas voltadas ao desenvolvimento sustentável dessa imensa região.

A Figura 4 mostra os títulos mineiros vigentes na Amazônia Legal em 15/10/2014. A legenda discrimina as superfícies abrangidas pelas diversas modalidades de aproveitamento dos recursos minerais, em seus diferentes estágios. As dimensões expressam os riscos inerentes à pesquisa mineral:

- As áreas de pesquisa (requeridas ou autorizadas) cobriam 24,90% da região.
- As áreas de lava empresarial abrangiam apenas 0,32% da Amazônia – incluindo as concessões de lava, os licenciamentos (insumos para construção) e os registros de extração (realizada por prefeituras).
- Somadas às lavras garimpeiras, alcançavam 2,1 milhões de hectares, ou 0,40% da superfície da Amazônia Legal Brasileira.

São pequenas superfícies, porém muito importantes para a economia e fundamentais para a salvaguarda dos demais recursos da região. Toma-se como exemplo a grande mina de Carajás. Toda a lava e infraestrutura nela existentes ocupam cerca de 2% da superfície da Floresta Nacional de Carajás, uma expressiva área

preservada com mais de 8.000 km². No seu entorno, não há mais floresta, totalmente devastada pela agropecuária. Sem a mina, todo o ecossistema ali preservado já teria desaparecido.

ÁREAS VEDADAS À MINERAÇÃO

Reitera-se que a Amazônia representa a última fronteira mineral importante do planeta. Contudo, essa fronteira encontra-se em boa parte vedada para a mineração. A Figura 5 mostra as terras indígenas e unidades de conservação ambiental existentes – federais, estaduais e municipais, de proteção integral e de uso sustentável. As superfícies ali discriminadas são concordantes com os dados divulgados por IMAZON e ISA em 2012 (MARTINS et al., 2012), também com o Mapa da Amazônia Brasileira 2014 (ISA, 2014).

Como se vê, as terras indígenas abrangem cerca de 22% da superfície da Amazônia Legal. As unidades de conservação ambiental recobrem parcela semelhante. Juntas, alcançam 45% da superfície da região, vedando à exploração terrenos com notável potencial mineral. Quais serão as consequências dessas restrições – para a região, o país e o planeta?

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE realiza, desde 1998, o monitoramento por satélite do desmatamento por corte raso na Amazônia Legal (Projeto PRODES). Os dados do desflorestamento são qualificados no Projeto Terra Class e têm credibilidade internacional. Constatou-se que a mineração organizada e a garimpagem foram responsáveis por diminuta parcela do desmatamento praticado na região – variável entre 0,10% e 0,14% do total anualmente desmatado, entre 2008 e 2012 (INPE, 2014, 2015).

Não há, no quadro legal vigente, extração mineral regular em terras indígenas, nem em unidades de conservação. Os empreendimentos obedecem, cada vez mais, a minuciosos regulamentos e controles, internos e externos, com vistas à segurança, à saúde e à proteção ambiental. No entanto, estudos acadêmicos recentes ainda insistem em culpar a extração mineral por grandes danos e ameaças à floresta, o que acaba ecoando com distorções na grande mídia.

Ferreira et al. (2014) confrontaram os títulos mineiros do DNPM com as unidades de conservação e as terras indígenas. Afirmaram que a mineração ameaça áreas protegidas da Amazônia. A alegação é inconsistente, pois a análise não distinguiu os requerimentos de pesquisa das autorizações ou concessões. Áreas requeridas para pesquisa não podem ser confundidas com minas. Todavia, subsistem na base de dados do

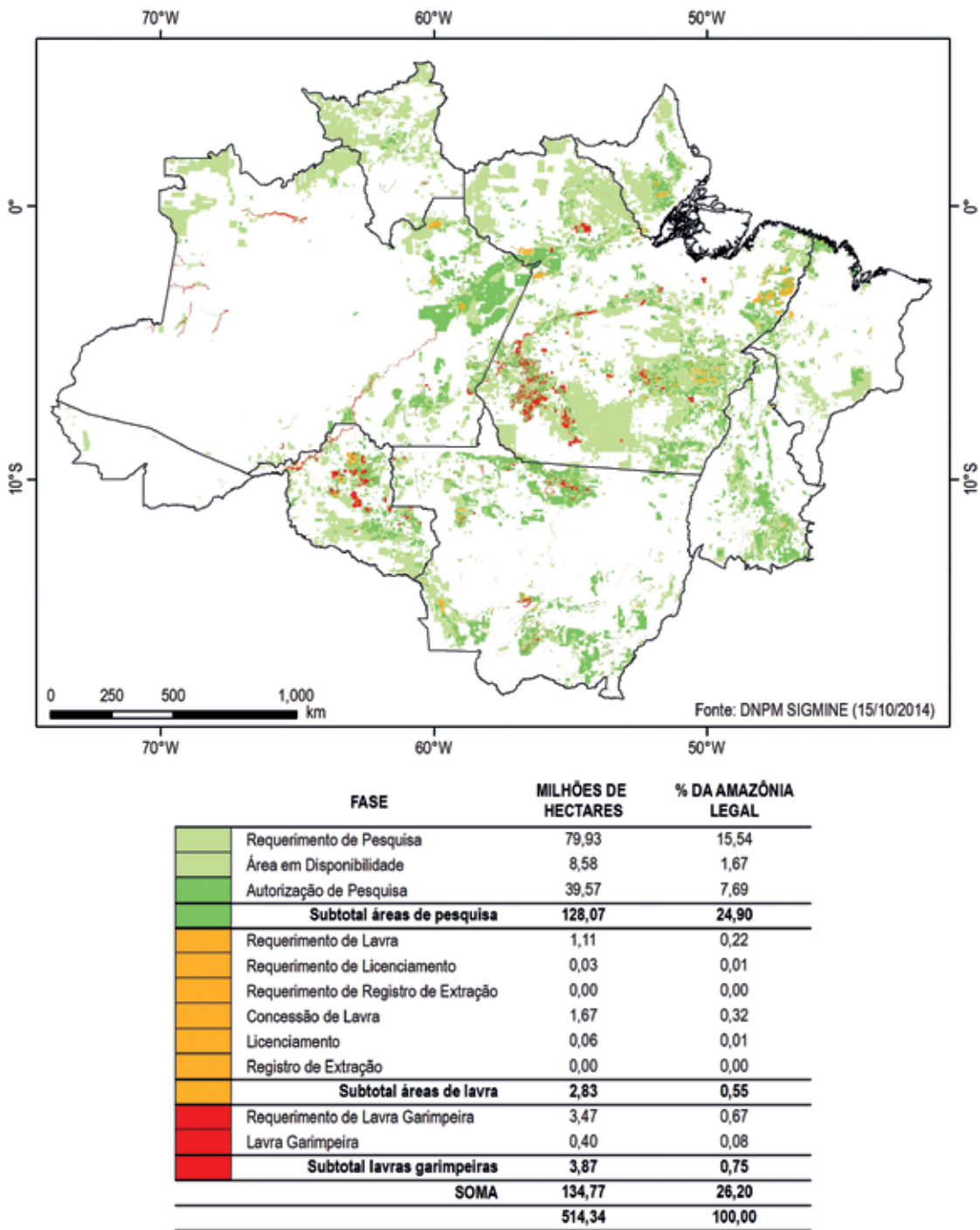


Figura 4 Títulos mineiros vigentes na Amazônia.

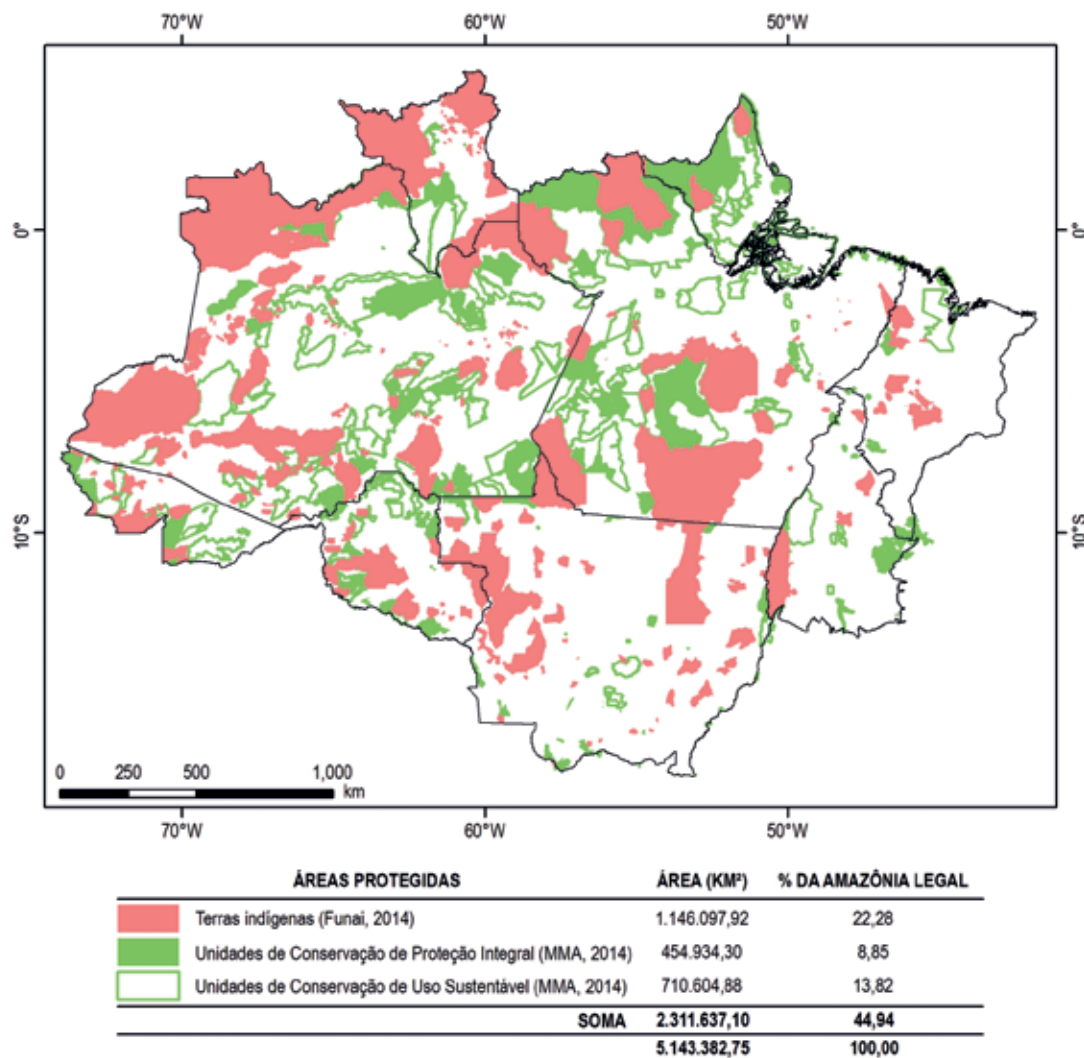


Figura 5 Áreas protegidas na Amazônia (Elaborada pelos autores, a partir de informações de FUNAI, 2014; MMA, 2014).

DNPM inúmeros requerimentos de pesquisa efetuados em terras indígenas, cuja tramitação foi suspensa após a Constituição de 1988, à espera de uma definição legal que ainda não veio – o que pode ter contribuído para a confusão.

Em outro estudo, Alvarez-Berríos e Aide (2015) avaliaram os impactos da extração de ouro nas florestas tropicais da América do Sul, contemplando indistintamente a mineração formal e a informal, entre 2001 a 2013. No Brasil foi identificado um único *hotspot*, com 183 km² desmatados na ecorregião da Floresta Úmida Tapajós-Xingu, sendo 142 km² situados na Área de Proteção Ambiental (APA) do Tapajós. O artigo ad-

mite que a maior parte das perdas florestais decorreu de pastagens implantadas junto à extração do ouro, mas isso foi omitido no noticiário.

Observe-se que a APA do Tapajós foi criada em 2006, em um esforço do Governo Federal para acalmar a reação internacional ao assassinato da missionária americana Dorothy Stang, motivado por conflitos de terras na região da rodovia Transamazônica (Anapu-PA, 12/02/2005). Os dirigentes e técnicos do Ministério de Meio Ambiente então incumbidos da proposição de medidas emergenciais de proteção se surpreenderam ao constatar que as únicas porções preservadas ao longo da rodovia Cuiabá-Santarém correspondiam à

Reserva Garimpeira do Tapajós – criada em 1983 pelo Ministério de Minas e Energia. Tudo em volta estava devastado pela extração de madeira e pela ocupação agropecuária; nada mais restava a preservar.

Mesmo assim, decidiram criar 7 novas unidades de conservação na região do Tapajós, sendo 2 de proteção integral e 5 de uso sustentável. Boa parte delas sobrepôs-se à Reserva Garimpeira, outras englobaram áreas com permissões de lavra garimpeira e áreas requeridas para pesquisa e para lavra. A criação dessas unidades de conservação em áreas tradicionalmente ocupadas e antes formalmente destinadas à garimpagem trouxe novos obstáculos à regularização da produção informal na região. Os impasses persistem. Na prática, a extração informal parece tolerada pelas autoridades minerárias, porém sofre constantes ameaças e ações policiais das agências ambientais, o que termina por desestimular a sua regularização (KOLEN et al., 2013).

Outros exemplos atestam a multiplicação de conflitos de difícil solução, ante a ausência de legislação para mineração em terras indígenas e de diretrizes claras para atuação no entorno de unidades de conservação. Em 2002, o Ministério da Justiça ampliou a Terra Indígena Kaiabi, no Mato Grosso. A expansão da área impediu o uso da única jazida de calcário existente na região de Apiacás (MT), indispensável à boa produção agrícola de importante parcela do norte do Mato Grosso. A demanda ainda aguarda julgamento no Superior Tribunal de Justiça. Enquanto isso, em Rondônia, o Governo do Estado e a Federação das Indústrias comemoram expressivo crescimento econômico (7% ao ano, entre 2010 e 2014), alicerçado na produção de 6 usinas de calcário, que permitiram incorporar ao agronegócio terras outrora desmatadas e abandonadas.

No Pará ocorreu um caso também grave. Em 2007 foram criadas diversas unidades de conservação estaduais. Duas delas sobrepuseram-se ao depósito de bauxita do Curuá, então em estágio avançado de pesquisa pela Rio Tinto, nos municípios de Monte Alegre e Alenquer. As restrições ambientais impediram a continuidade do projeto e a concretização de uma importante descoberta mineral. Somadas às persistentes dificuldades técnicas e operacionais para atuação na Amazônia, tais fatos podem impelir as empresas à revisão dos seus programas exploratórios e à atuação em outros países.

PROSPECTANDO O FUTURO

Alguns pontos merecem reflexão, na discussão da sustentabilidade da extração mineral. Em primeiro lugar, há inúmeros exemplos de malefícios causados pela extração desordenada, ainda praticada na Amazônia. A eles se contrapõem os benefícios possibilitados pela mineração criteriosa (VEIGA, 1999):

- Afeta superfícies reduzidas, de modo controlado;
- Gera riquezas compatíveis com a implantação da infraestrutura necessária e com a obrigação constitucional de recuperar a área após a lavra;
- Permite qualificar expressivo contingente de trabalhadores;
- Tem grande potencial multiplicador na economia local, regional e nacional.

Superados alguns equívocos cometidos na implantação dos primeiros empreendimentos, pode-se afirmar que a produção das minas é hoje efetuada sob controle eficaz dos impactos físicos e bióticos, a exemplo do ferro de Carajás e da bauxita de Trombetas. Todavia, resta equacionar os impactos socioeconômicos. A responsabilidade social das empresas já se traduz em ações positivas nas áreas afetadas, mas o poder público continua ausente ou distante, especialmente no entorno dos grandes projetos.

Praticada sob concessão governamental, entende-se que a indústria mineral pode prover vias consistentes para o desenvolvimento sustentável da região, talvez mais do que qualquer outra atividade. Merece, por isso, apoio e fortalecimento, junto a acompanhamento e controle adequados. Cabe ao Estado manter-se aparelhado para o desempenho dessa missão constitucional, o que inclui a realização de levantamentos básicos, fiscalização e apoio técnico, entre outras atividades.

Em 1996 foi criada a ADIMB – Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira, entidade não-governamental voltada à promoção de projetos cooperativos entre empresas, governo e universidades, visando a capacitação de pessoal e o desenvolvimento de métodos e equipamentos exploratórios adequados à região.

O Governo Federal, por sua vez, tem realizado levantamentos geológicos, geofísicos e geoquímicos em áreas selecionadas, mas sabe-se que ainda resta muito a fazer. De fato, a cartografia e outros levantamentos básicos continuam precários, em detrimento da exploração mineral e da própria gestão territorial da Amazônia.

Falta também um centro tecnológico capaz de desenvolver técnicas exploratórias e processos de beneficiamento adequados aos minérios da região, similar aos centros que impulsionam a mineração na Austrália e no Canadá, por exemplo. As instituições existentes na Amazônia têm âmbito restrito, insuficiente para tamanha empreitada (ex. Instituto Tecnológico Vale – ITV e Instituto de Tecnologia – ITEC da Universidade Federal do Pará).

Quanto à extração mineral desordenada, especialmente a garimpagem de ouro, considera-se necessário controlar os impactos ambientais e melhorar o aproveitamento dos minérios. Áreas abandonadas podem ser retomadas de modo ordenado, com tecnologias adequadas ao aproveitamento dos recursos remanescentes e à recuperação ambiental, visando sanar os danos e promover o assentamento digno dos trabalhadores e familiares. Sabe-se que a empreitada não é fácil, pois demanda uma ampla transformação cultural. Ainda assim, acredita-se ser possível desenvolver um modelo de produção sustentável e equitativo para a garimpagem (SALOMÃO, 1984; VEIGA, 2001; entre outros).

Infelizmente, as dificuldades e incertezas inerentes ao setor mineral agravaram-se muito nos últimos anos, devido à intenção governamental de instituir um novo modelo regulatório, marcado por maior intervencionismo e tributação. A suspensão do fluxo normal de concessões em 2013 e o panorama internacional desfavorável resultaram em drástica queda dos investimentos, com consequente interrupção de projetos, fechamento de empresas e desemprego.

Entre inúmeras impropriedades, o marco legal proposto não trata da garimpagem nem dos impactos da mineração. O projeto permanece em tramitação no Congresso, porém sem expectativa de um desfecho satisfatório em prazo razoável, o que alimenta muitas dúvidas. Como restaurar a atração dos investimentos necessários à exploração mineral? Como recompor o ciclo de geração de reservas minerais? Voltará a garimpagem a ser uma atividade clandestina? E assim por diante...

Somam-se, a essas novas indefinições, os antigos e persistentes desafios para abordagem responsável da Amazônia. As populações tradicionais, a qualidade de vida e a conservação de sua notável biodiversidade não podem ser descuradas. Por isso mesmo, a geodiversidade primordial e o inegável potencial mineral precisam ser devidamente considerados para ordenamento da sua ocupação.

Caso contrário, o seu patrimônio mineral permanecerá pouco conhecido e mal aproveitado. Sujeito, portanto, a medidas equivocadas e ações desordenadas de difícil controle – em detrimento do aproveitamento criterioso de seus recursos e da satisfação das necessidades sociais, atuais e futuras.

Agradecimentos

Os autores registram sua gratidão a Carlos Augusto Ramos Neves e Doralice Meloni Assirati, servidores do DNPM que forneceram dados da produção mineral da Amazônia, assim como às geólogas Jéssica Bogossian e Ana Raissa Amorim dos Santos, pelo auxílio no tratamento dos dados e na elaboração dos mapas. Agradecem também aos membros do Comitê Editorial da Academia Brasileira de Ciências, pela revisão e recomendações.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ-BERRÍOS, N.I.; AIDE, T.M. Global demand for gold is another threat for tropical forests. *Environmental Research Letters*, n.10, p.1-11, 2015. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/1/014006>>. Acesso em 15 de janeiro de 2015.
- CPRM-Serviço Geológico do Brasil. *Mapa geológico do Brasil ao milionésimo*, Sistema de Informações Geográficas – SIG. Brasília: CPRM, 2004. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br>>. Acesso em 26 de setembro de 2014.
- DNPM-Departamento Nacional da Produção Mineral. *Levantamento nacional dos garimpeiros – relatório analítico*. Série Tecnologia Mineral, n. 45, 90 p. il. Brasília: DNPM, 1993.
- DNPM-Departamento Nacional da Produção Mineral. *Anuário Mineral Brasileiro*. Dados preliminares de 2014, não publicados. Brasília: DNPM, 2014.
- FERREIRA, A.R. *Viagem filosófica ao rio Negro*. Belém: MPEG; CNPq. 775 p. 1983.
- FERREIRA, J. et al. Brazil's environmental leadership at risk – mining and dams threaten protected areas. *Science*, n. 346, p.706-707. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/content/346/6210/706>>. Acesso em 15 de janeiro de 2015.
- FUNAI-Fundação Nacional do Índio. *Arquivo digital das terras indígenas*. Brasília: FUNAI, 2014. Disponível em: <<http://www.funai.gov.br/index.php/shape>>. Acesso em 09 de outubro de 2014.
- FURTADO, J.; URIAS, E. *Recursos naturais e desenvolvimento – estudos sobre o potencial dinamizador da mineração na economia brasileira*. São Paulo: Ed. dos Autores; IBRAM, 311 p. 2013.
- IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Mapa geológico da Amazônia Legal*. Brasília: IBGE, 2012. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapeamento_sistemico/banco_dados_georeferenciado_recursos_naturais/amazonia_legal/>. Acesso em 26 de setembro de 2014.
- INPE-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *TerraClass – Mapeamento do uso e da cobertura da terra na Amazônia Legal Brasileira em 2012*. INPE, 2014. Disponível em: <www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/TerraClass_2012.pdf>. Acesso em 09 de outubro de 2014.
- INPE-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Projeto PRODES – Monitoramento da Floresta Amazônica brasileira por satélite*. Dados e imagens 1998-2014. INPE, 2015. Disponível em: <www.obt.inpe.br/prodes/index.php>. Acesso em 09 de outubro de 2014.
- ISA-Instituto Socioambiental. *Mapa da Amazônia Brasileira 2014*, escala 1:4.000.000. ISA, 2014. Disponível em: <http://www.socioambiental.org/sites/blog.socioambiental.org/files/nsa/arquivos/pamazonia2014_isa_portuguesmapa.pdf>. Acesso em 26 de setembro de 2014.
- KOLEN, J.; THEIJE, M.; MATHIS, A. Formalized small-scale gold mining in the Brazilian Amazon – an activity surrounded by informality. In: CREMERS, L.; KOLEN, J.; THEIJE, M. (Eds.). *Small-scale gold mining in the Amazon*. Amsterdam, Cuadernos del CEDLA, nº 26, CEDLA, p. 31-45. 2013.
- LESTRA, A. D.; NARDI, J. I. S. *O ouro na Amazônia Oriental – o mito e a realidade*. Belém, Grafisa, 395 p. 1982.
- MARTINS, H.; VEDOVETO, M.; ARAÚJO, E.; BARRETO, P.; BAIMA, S.; SOUZA JR, C.; VERÍSSIMO, A. Áreas protegidas críticas na Amazônia Legal. Belém: Imazon, 94 p. il. 2012. Disponível em: <<http://imazon.org.br/PDFimazon/Portugues/livros/AreasProtegidasCriticas.pdf>>. Acesso em 22 de novembro de 2014.
- MMA-Ministério do Meio Ambiente. *Delimitação das unidades de conservação*, Brasília: MMA, 2014. Arquivo digital disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em 09 de outubro de 2014.
- MONTEIRO, M.A. Meio século de mineração industrial na Amazônia e suas implicações para o desenvolvimento regional. *Estudos Avançados*, v. 19, n. 53, p. 187-207. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142005000100012>. Acesso em 05 de outubro de 2014.
- PARRA, M. et al. Orogenic wedge advance in the northern Andes: Evidence from the Oligocene-Miocene sedimentary record of the Medina Basin, Eastern Cordillera, Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, May 2009, v. 121, n. 5-6, p. 780-800, 2009.
- PINTO, V.N. *O ouro brasileiro e o comércio anglo-português: uma contribuição aos estudos da economia atlântica no século XVIII*. São Paulo: Ed. Nacional, Brasileira, v.371, 2ª ed., 347 p. il. 1979.
- SALOMÃO, E.P.; VEIGA, A.T.C. *Prospecção e pesquisa de depósitos aluvionares*. Belo Horizonte, Curso IBRAM, Publicação avulsa, 74 p. 1989.
- SALOMÃO, E.P. O ofício e a condição de garimpar. In: ROCHA, G.A. (Org.). *Em busca do ouro – garimpos e garimpeiros no Brasil* São Paulo, CONAGE; Marco Zero, p. 35-86. 1984.
- SANTOS, B.A. *Amazônia: potencial mineral e perspectivas de desenvolvimento*. São Paulo: T. A. Queiroz; EDUSP, 256 p. il. 1981.
- SANTOS, B.A. Recursos minerais da Amazônia. *Estudos Avançados*, v. 16, n. 45, p. 123-152, 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v16n45/v16n45a09.pdf>>. Acesso em 05 de outubro de 2014.
- SILVA, C. R. da (ed.). *Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro*. Rio de Janeiro, CPRM. 264 p. il, 2008.
- VEIGA, A.T.C. *Significado paleo-ambiental e econômico dos aluviões auríferos e estaníferos da Amazônia*. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica e Prospecção), Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 111 p. il. 1990.
- VEIGA, A.T.C. A geodiversidade e o uso dos recursos minerais da Amazônia. Brasília: NEAz/UnB. *Terra das Águas*, v.1, n.1, p. 88-102. 1999.
- VEIGA, A.T.C. Em busca do ouro limpo. In: VILLAS BÔAS, R.C.; BEINHOFF, C.; SILVA, A.R.B. (Eds.). *Mercury in the Tapajós Basin*. Rio de Janeiro: CNPq; CYTED, p.183-197, 2001. Disponível em: <<http://200.20.105.7/cyted-xiii/publicaciones.htm>>. Acesso em 26 de setembro de 2014.





VI

Recursos Humanos

Formação de recursos humanos para a mineração

Miguel Antônio Cedraz Nery

Marina P. P. Oliveira

Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI).

RESUMO

O artigo trata da disponibilidade de recursos humanos para as etapas da mineração, compreendendo a pesquisa mineral, a lavra e o beneficiamento de minérios. Tendo como base estudos e projeções produzidos em 2014 pela “Rede de Pesquisa: Formação e Mercado de Trabalho”, parceria da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e a participação do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e do Departamento Intersindical de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos (Dieese), busca revelar as perspectivas de futuro neste tema. Aborda a expansão do ensino superior nas Engenharias, com foco no curso de Engenharia de Minas e também de Geologia, formações mais diretamente ligadas ao setor mineral, bem como dados para cursos de Mestrado e Doutorado, nas áreas de Geologia, Geotécnica e Engenharia de Minas e o aproveitamento desses profissionais na indústria extrativa e de transformação no Brasil.

Palavras-chave Recursos humanos. Engenharia de Minas. Geologia.

INTRODUÇÃO

Os desafios para o desenvolvimento produtivo com inclusão social são múltiplos e conhecidos da maior parte dos gestores públicos e privados. Depois da retomada dos ciclos de políticas industriais no país, a partir de 2004, e do crescimento econômico mais acentuado experimentado na década 2000-2010, nos deparamos na atualidade com questões estruturais da economia, da educação, do mercado de trabalho e da sociedade brasileira. Tal cenário exige soluções de longo prazo de maturação, assim como uma compreensão mais profunda das dinâmicas e interações entre diferentes aspectos do nosso desenvolvimento – desde o ambiente de negócios até a questão da produtividade, passando pela educação e pela qualificação profissional.

A formação de recursos humanos em geral coloca-se, portanto, como uma categoria de análise fundamental para a necessária superação de nossos problemas estruturais. O descasamento entre a qualidade dos profissionais formados em todos os níveis, o perfil dos postos de trabalho gerados pela indústria e a configuração atual de nossa estrutura produtiva dão a exata dimensão do dilema ora colocado para o aprofundamento do desenvolvimento com inclusão social. O setor mineral, apesar de suas especificidades e dinâmicas próprias, não foge à regra.

As principais questões colocadas nesse campo e abordadas desde 2013 pelo grupo de estudo da Academia Brasileira de Ciências (ABC) que trata da formação de recursos humanos para a mineração são de natureza estrutural. Reavaliação de currículos, com o objetivo de torná-los mais práticos e aplicados, falhas no ensino básico, ampliação da oferta de cursos de

pós-graduação especializados em assuntos de fronteira no cenário mundial, como é o caso de terras raras, além da necessidade de aumentar o intercâmbio com instituições de ensino de outros países, internacionalizando a formação dos nossos profissionais para que se mantenham na ponta do conhecimento e dos debates globais do setor – principais pontos de atenção levantados pelo grupo – são alvo de preocupação em vários setores, sobretudo os mais intensivos em pessoal técnico-científico.

O presente artigo versa sobre a disponibilidade de recursos humanos para as etapas da mineração, compreendendo a pesquisa mineral, a lavra e o beneficiamento de minérios. Em sua primeira parte, trata das perspectivas futuras para a área, tendo como base, estudos e projeções produzidos em 2014 pela “Rede de Pesquisa: Formação e Mercado de Trabalho”, parceria da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e a participação do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e do Departamento Intersindical de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos (Dieese). Nessa seção, tratamos ainda da expansão do ensino superior nas Engenharias, com foco no curso de Engenharia de Minas e também de Geologia, formações mais diretamente ligadas ao setor mineral. Na segunda parte, apresentamos os dados disponíveis para cursos de Mestrado e Doutorado, nas áreas de Geologia, Geotécnica e Engenharia de Minas e o aproveitamento de profissionais com esse nível de formação na indústria extrativa e de transformação no Brasil. Na terceira parte, abordamos o Programa Nacional de Acesso ao Ensino Técnico e ao Emprego (Pronatec), principal instrumento de formação e qualificação

profissional da política industrial brasileira, iniciada em 2011 (o Plano Brasil Maior - PBM), com uma análise da demanda da área de extração mineral por vagas no programa. A quarta e última seção traz considerações finais com o objetivo de contribuir para o debate sobre a formação de pessoal como eixo estratégico para o desenvolvimento e fortalecimento de qualquer setor econômico, mas em especial da mineração.

CENÁRIO E PERSPECTIVAS

As projeções de oferta e demanda ocupacional para engenheiros e profissionais afins no Brasil, por setor econômico, realizadas por Maciente e Nascimento (2014) para o período de 2011-2020, trazem elementos importantes para compreender os cenários futuros de pessoal na área de extração mineral. Essas projeções foram realizadas com base no comportamento setorial da economia para a década de 2000-2010, e adotam três cenários diferentes de crescimento econômico para o período de 2011-2020, projetando a demanda setorial por engenheiros e profissionais afins.

Segundo os autores, na primeira década do século 21, a indústria extrativa mineral, excluindo o setor de petróleo e gás, tratado separadamente no estudo, registrou crescimento expressivo do número de engenheiros em sua força de trabalho. Uma análise dos níveis salariais para diversas ocupações típicas de Engenharia também trouxe entre as 10 ocupações que mais registraram ganhos salariais entre 2003 e 2010 – Engenheiro de Minas (planejamento) e Engenheiro de Minas (beneficiamento), comprovando o dinamismo do setor mineral na absorção de pessoal técnico-científico de nível superior, nesse período, conforme tabela abaixo.

A oferta de formandos em Engenharia, entretanto, registrou também forte expansão na década. Gusso e Nascimento (2014) estimam, a partir de dados do Censo da Educação Superior, que o número de conclusões nos cursos de Engenharia, Produção e Construção cresceu 200% entre 2000 e 2012, acima da média de 150% registrada nos demais cursos de nível superior. Portanto, houve, pelo menos do ponto de vista quantitativo, uma resposta vigorosa do sistema educacional e também da procura, por parte dos jovens, por cursos nessa área, principalmente a partir de 2009.

Uma análise dos dados sobre cursos de Engenharia de Minas permite um olhar mais detido sobre a indústria de mineração. Isso porque esse é o ramo da Engenharia que se ocupa da pesquisa mineral, a extração e o aproveitamento dos recursos minerais – atuando nas áreas de tecnologia mineral, desde a pesquisa mineral, que visa a descoberta de jazidas, a lavra, que consiste na extração do minério, até o beneficiamento, o qual envolve o processamento, separação e concentração do minério lavrado para adequá-lo às especificações exigidas pela indústria. Os dados sobre crescimento dos cursos de Engenharia de Minas mostram que a expansão acompanhou o movimento geral das Engenharias, ao longo da década de 2000.

De forma semelhante, a análise sobre o crescimento da oferta de geólogos, neste mesmo período, também permite algumas observações interessantes para a área de extração mineral.

O surgimento de novos cursos de graduação em Geologia depende da existência de condições muito particulares: corpo docente especializado, além de equipamentos, veículos de campo e laboratórios custosos. Seja por isso, ou pela superoferta de geólogos e o fato de existirem, no início da década de 2000, um número relativamente alto de cursos se comparado à Engenharia de Minas, o crescimento dos cursos de Geologia ficou abaixo da média do sistema (67%). A expansão de vagas (135%) e concluintes (155%), entretanto, permitiram ampliar a oferta de profissionais no mercado de trabalho, respondendo às demandas dos diferentes setores e da extração mineral, em particular.

Desde os anos 1960, quando foram implantados os primeiros cursos de Geologia, a oferta é majoritariamente pública. Esse padrão se manteve ao longo da década de 2000-2010, fazendo da Geologia uma exceção. Isso explica, também, o crescimento de cursos em número inferior ao registrado para o conjunto das Engenharias, que passaram a ter a maior parte da oferta de vagas vindas do setor privado, seguindo o padrão brasileiro geral para o Ensino Superior.

As tabelas abaixo mostram a evolução do número de cursos de Engenharia de Minas e de Geologia para o Brasil, no período de 2000 a 2013.

Tabela 1 Total de cursos Engenharia de Minas e Geologia

Total de cursos de Engenharia de Minas e de Geologia, Brasil, 2000-2013														
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Geologia	18	18	18	18	18	19	19	22	23	24	25	26	26	30
Engenharia de Minas	8	7	7	7	8	7	8	9	10	15	16	17	20	22

*Foram assumidos pelos autores, para os anos nos quais não havia informação disponível no site do INEP, a manutenção do mesmo número de cursos registrados no ano anterior.

(Fonte: Elaborada pelos autores, a partir de informações de INEP, 2000-2013)

Quando se analisa a formação de Engenheiros de Minas e de Geólogos pela ótica das vagas, percebe-se um aumento ainda mais acentuado, com um crescimento de quase cinco vezes no período. Mais uma vez o padrão segue a tendência geral do Sistema de Ensino Superior e das Engenharias, em particular, de forte expansão na década passada, demonstradas por Gusso e Nascimento (2014).

Um ponto interessante a ser observado é o desempenho particularmente forte tanto da Engenharia de Minas quanto da Geologia no que diz respeito ao aumento dos concluintes, que representou um acréscimo de 241%, na Engenharia de Minas e de 155%, na Geologia. Esse desempenho, sem dúvidas, é justificado

pelo aquecimento do mercado de trabalho especialmente no setor extrativo mineral entre os anos 2000 e 2013, capitaneado pelo ciclo das *commodities*, que garantiu uma empregabilidade maior para os egressos desses cursos, cujo grau de dificuldade costuma ser mais alto do que a média, estimulando a sua conclusão. Os dados se alinham às leituras para o conjunto da economia brasileira no período, que registrou um crescimento mais pronunciado de alguns setores como o extrativo mineral, principal demandante dos formados em Engenharia de Minas e Geologia. Na Tabela 3, são revelados os dados dos concluintes em Engenharia de Minas e Geologia.

Tabela 2 Total de Vagas em Engenharia de Minas e Geologia

Total de vagas nos cursos de Engenharia de Minas e Geologia, Brasil, 2000-2013														
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Geologia	682	720	715	713	723	714	788	831	864	954	991	1.048	1.048	1.606
Engenharia de Minas	240	230	230	230	260	230	440	621	431	787	881	1020	1160	1573

*Para o ano de 2012 foi assumido pelos autores o mesmo número de vagas do ano anterior, em que havia o mesmo número de cursos em funcionamento, já que não havia informações disponíveis para o período no site do INEP.

(Fonte: Elaborada pelos autores, a partir de informações de INEP, 2000-2013)

Tabela 3 Total de Concluintes em Engenharia de Minas e Geologia.

Total de concluintes nos cursos de Engenharia de Minas e Geologia, Brasil, 2000-2011													
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Geologia	226	250	294	294	294	350	350	350	438	449	414	577	577
Engenharia de minas	100	105	85	70	82	90	74	110	105	172	218	327	341

*Para os anos nos quais não havia informação disponível no site do INEP, os autores assumiram a manutenção do número de concluintes registrados no ano anterior mais próximo para o qual havia o dado.

(Fonte: Elaborada pelos autores, a partir de informações de INEP, 2000-2011)

Uma síntese da expansão dos cursos de Engenharia de Minas e de Geologia no país, na última década, portanto, pode ser observada no gráfico abaixo, mostrando a evolução dos cursos, vagas e concluintes para essas áreas de conhecimento no período (Figura 1).

Salerno et al. (2014). Os referidos textos apontam para a possibilidade de aplicação de soluções mais pontuais para a resolução de tais problemas, com resultado no curto e no médio prazo - investimentos em capacitações específicas e dentro da própria empresa, com

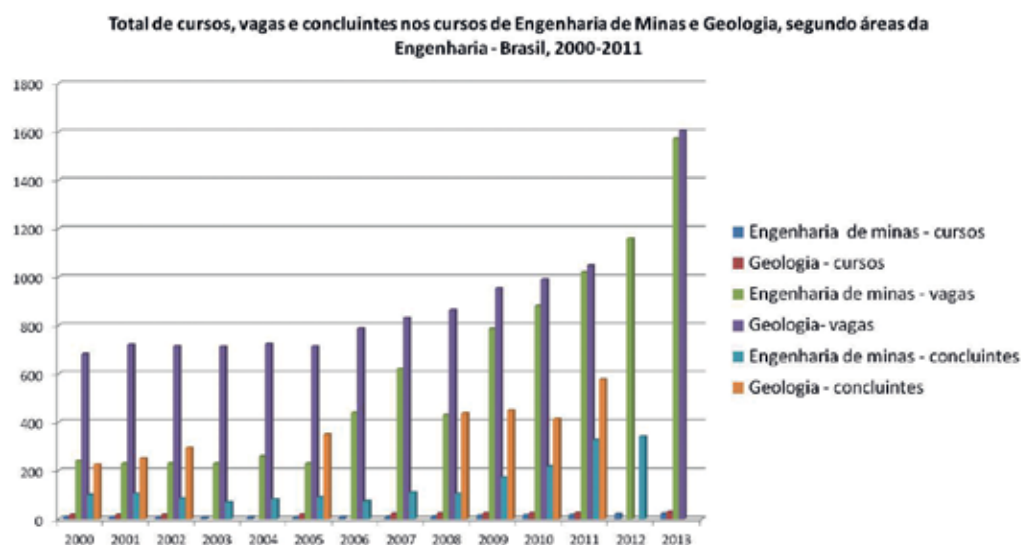


Figura 1 Evolução de cursos, vagas e concluintes em Engenharia de Minas e Geologia (Fonte: INEP, 2000-2013. Elaboração: Observatório da Inovação e Competitividade). * Os dados disponíveis para os concluintes são até 2011.

Ao se fazer o cruzamento dos dados da oferta com os da demanda por engenheiros e afins, percebe-se que o cenário de crescimento econômico médio abaixo de 2,5% ao ano, registrado a partir de 2011, tende a reduzir a contratação de novos engenheiros de maneira geral pela indústria. Tal cenário vale também para a contratação de engenheiros de minas e de geólogos também no setor mineral. Lidas em conjunto, tais informações indicam que não haverá problemas quantitativos de oferta de pessoal de nível superior para o setor mineral, especialmente tendo em vista a forte expansão dos cursos, vagas e concluintes de Engenharia de Minas e de Geologia na última década.

Questões de qualidade, experiência e especialização requeridas para atuação na área podem se apresentar, conforme apontado pela sistematização da literatura, dos dados empíricos e do debate sobre escassez de Engenheiros no Brasil realizadas por Nascimento (2014) e

recursos próprios das firmas ou em conjunto com o setor público, conforme será analisado mais adiante na seção sobre o Pronatec.

Aumentos salariais num cenário econômico de baixo crescimento, também podem reforçar a atratividade do setor para profissionais qualificados e equacionar de alguma maneira o problema da mobilidade de trabalhadores para regiões mais remotas, onde ocorre a extração.

MESTRES E DOUTORES

Uma análise das informações disponíveis para programas de Mestrado e Doutorado em áreas associadas à indústria de mineração (Engenharia de Minas, Geologia e Geotécnica) mostra uma expansão bem mais modesta, conforme a tabela 4.

Tabela 4 Mestrado e Doutorado em Engenharia de Minas, Geologia e Geotécnica.

Total de Programas de Mestrado e Doutorado em Engenharia de Minas, Geologia e Geotécnica, Brasil, 2000-2011												
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Geologia	9	9	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Engenharia de Minas	3	3	3	3	3	4	4	3	3	4	4	4
Geotécnica	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2

(Fonte: Elaborada pelos autores, a partir de informações de GEOCAPES, 2000-2011).

Nesse caso, o aumento registrado na área não condiz com o processo de crescimento do número total de programas de Mestrado e Doutorado nas Engenharias de uma maneira geral. Tal comportamento, fala muito mais do grande nível de especialização de um engenheiro com esse tipo de formação, altamente direcionado para o setor mineral, no caso da pós-graduação da Engenharia de Minas e de Geologia e, menos um pouco, no caso da Geotécnica, aproveitada em outros setores de atividade para mitigação de acidentes e desastres naturais. Trata-se também de um profissional que, se absorvido pela indústria, terá uma atuação mais direta na área de Pesquisa e Desenvolvimento e menos nas operações permanentes das minas e unidades de beneficiamento.

É importante ressaltar, no entanto, que de uma maneira geral existe uma baixa absorção de profissionais com Mestrado e Doutorado na indústria extrativa e de transformação no Brasil. A publicação “Mestres 2012: Estudos da demografia da base técnico-científica brasileira”, do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) revela, a partir de dados do último Censo Demográfico (2010), um percentual muito baixo de aproveitamento desses profissionais, principais responsáveis pelas atividades de P&D, na indústria extrativa e de transformação no país.

O estudo indica que apenas 1,28% dos Mestres residentes no Brasil, em 2010, estavam ocupados na indústria extrativa, que inclui a mineração. Com relação aos Doutores, o percentual era ainda mais reduzido, caindo para 0,57%. Na indústria de transformação, os percentuais estavam em 4,98% e 2,39%, respectivamente, refletindo pouco dinamismo com relação à inovação, pesquisa e desenvolvimento. Mais da metade dos profissionais com esse nível de formação atuava na Educação, na Saúde, na Administração Pública e nas instituições de Ciência e Tecnologia, em 2010.

PRONATEC

O Plano Brasil Maior, a política industrial do governo federal no período de 2011 a 2014 trouxe em seu bojo, pela primeira vez, instrumentos efetivos para a promoção da melhoria dos recursos humanos da indústria, em especial o Pronatec. Foi um exemplo de como o trabalho conjunto entre vários ministérios pode produzir resultados efetivos, do ponto de vista das políticas sistêmicas ou transversais. Inicialmente, dois grandes desafios foram colocados para o sucesso do programa:

1. Conseguir produzir um mapa das necessidades de formação e qualificação da indústria que de fato refletisse a realidade do país e que fosse dinâmico o suficiente para ser atualizado, a partir de novos cenários econômicos.
2. Induzir a rede ofertante dos cursos de formação e qualificação a modificar sua oferta e abrir turmas com o perfil adequado às necessidades levantadas.

Os dois pontos exigem um diálogo permanente entre as empresas – que detém (ou deveriam deter) as informações reais sobre as necessidades de formação numa perspectiva de curto, médio e longo prazos, o governo, que precisa captar e atualizar constantemente esses dados, e a rede ofertante, que precisa buscar profissionais novos com capacidade para formar pessoas em áreas menos tradicionais no sistema.

Entre 2011 e 2014, a Secretaria de Inovação do Ministério do Desenvolvimento, da Indústria e do Comércio Exterior (MDIC) desenvolveu uma metodologia para coleta e atualização de informações junto às empresas e associações setoriais que, de fato, conhecessem a demanda quantificada por ocupação profissional, localizadas por município. Essa metodologia está em fase de evolução para um banco de dados *online*.

Nesse período, foram contatadas cerca de três mil empresas, de todos os portes, resultando num mapeamento, em 2014, de 633 mil vagas, sendo 16.600 para a mineração, ou seja, 2,6% do total mapeado. Foram disponibilizadas 7.000 vagas, com 80% da oferta concentrada em municípios de Minas Gerais e do Pará, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 Municípios com maior demanda por cursos do Pronatec na área de mineração, por Estado (2014 e 2015).

Minas Gerais	Pará
Congonhas	Abel Figueiredo
Conselheiro Lafaiete	Canaã dos Carajás
Divinópolis	Dom Eliseu
Itaúna	Paraupabas
Mariana	Rondon do Pará
Nova Serrana	
Pará de Minas	
Paracatu	

(Fonte: Secretaria de Inovação do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2015. Elaboração realizada a pedido dos autores do artigo).

Em 2015, houve uma redução de recursos para o Pronatec devido ao ajuste fiscal do governo. Na pesquisa feita pelo MDIC, foram mapeadas 520 mil vagas, sendo 17.400 para a mineração com aumento da participação no total das vagas mapeadas para 3,3%. Mais uma vez, MG e PA responderam por 80% desse quantitativo.

É importante ressaltar que a atividade mineradora, pela necessidade de altos investimentos produtivos, está composta predominantemente por empresas intensivas em mão de obra. Do ponto de vista do aproveitamento dos recursos públicos existentes para a formação e qualificação profissional, esta característica faz com que uma parte significativa da área seja privilegiada para garantir o atendimento às suas demandas identificadas.

Isso porque tais empresas possuem informações bastante precisas sobre as necessidades de pessoal no curto, médio e longo prazo, podendo prontamente alimentar os gestores de política pública com tais informações. Ademais, a necessidade de realizar investimentos pesados para a manutenção das atividades cria e exige uma cultura de planejamento de todas as áreas da empresa, incomuns na média das firmas brasileiras.

Em geral, pequenas e médias empresas não tinham o hábito de planejar suas contratações, nem tampouco

enxergavam, até o início do debate público sobre uma possível crise de escassez de mão-de-obra, em 2010, os recursos humanos como um ativo importante da empresa, colocando a questão, muitas vezes, como um custo a mais da produção. Com isso, houve um aproveitamento muito menor da oportunidade representada pelo Pronatec, neste primeiro momento, por parte deste grupo de empresas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A questão da formação de recursos humanos é estrutural na economia e na sociedade e, portanto, apresenta características e problemas muito parecidos em todos os setores.

A mineração por suas especificidades tanto de padrão de inovação, quanto do porte das empresas que compõem a parte de exploração, é especialmente afetada pela oferta de pessoal técnico-científico, com destaque para o conjunto das Engenharias, Geologia e a área das Geociências.

Entretanto, projeções de oferta e demanda de engenheiros realizadas pelo Ipea para o período até 2020 para a indústria extrativa mineral (excluindo Petróleo e Gás), mostram que fatores de competitividade gerais desenham um cenário de demanda relativamente baixa, em termos quantitativos, por profissionais nos próximos anos, em comparação com a década anterior, especialmente tendo em vista o aumento expressivo da oferta de formados nessas áreas entre 2000 e 2012.

Uma análise específica dos cursos de Engenharia de Minas e de Geologia, intimamente ligados à atividade mineradora, confirmam um crescimento vigoroso do número de cursos, vagas e, principalmente, de concluintes na última década, desenhando um cenário de boa disponibilidade desse tipo de profissional no país.

O baixo número de Mestres e Doutores absorvidos pela indústria extrativa e de transformação no Brasil, com base em dados do Censo Demográfico de 2010, apontam para um dinamismo reduzido de inovação, pesquisa e desenvolvimento nessas áreas, essenciais para a mudança da inserção brasileira nas cadeias globais de valor.

Os dados trazidos sobre formação de recursos humanos para a indústria mineral mostram que, a despeito de questões de qualidade ou de especialização de parte dos formados, não há expectativa de escassez de pessoal técnico-científico no horizonte previsível, especialmente tendo em vista o aumento da oferta de cursos nessa área e da procura dos jovens pelos mesmos, a partir de 2009.

Entretanto, faz-se necessária uma gestão estratégica nos próximos anos, para evitar a repetição do fenômeno ocorrido nas décadas de 80 e 90, quando os Engenheiros acabaram sendo atraídos para o setor público e financeiro, devido ao baixo dinamismo do mercado de trabalho na área industrial.

Políticas de retenção de talentos experientes nos quadros das empresas, bem como de investimento na qualificação *in company* dos jovens promissores são fundamentais para garantir pessoal técnico-científico com especialização na extração mineral.

É importante também considerar a mudança do perfil etário da população brasileira. É prevista a redução do contingente de jovens, a partir de 2050, promovendo uma redução inevitável do número de graduados em todas as áreas de formação devido à diminuição gradativa dos adultos entre 15 e 24 anos no país. Tal fato tornará os engenheiros formados nos próximos anos ativos de grande valor, visto que haverá uma abundância de formandos nessa área que dificilmente se repetirá nos anos seguintes, em função da transição demográfica.

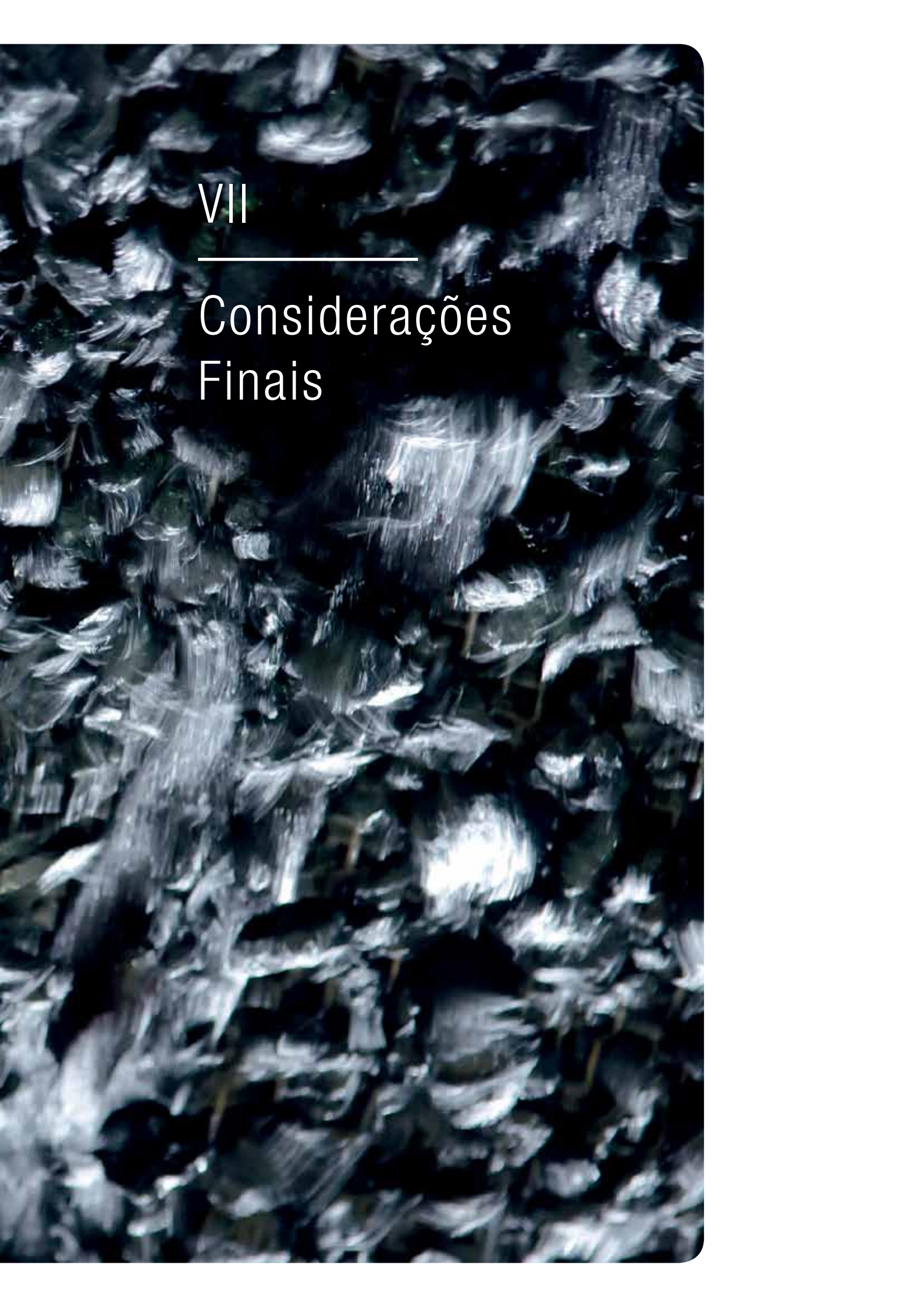
É preciso, portanto, aproveitar a próxima geração de formandos em Engenharia e outras áreas afins, mais numerosas do que as levadas anteriores, colocando em prática políticas eficientes de atração e retenção de talentos. Os setores industriais mais bem-sucedidos nessa tarefa certamente terão uma vantagem competitiva importante no Brasil, tendo em vista a redução inevitável do número de jovens formados a partir de 2050 em todas as áreas, devido a questões demográficas.

Tal cenário aumenta ainda a pressão por maiores ganhos de produtividade e eficiência, compensando a redução dos jovens na população economicamente ativa e a maior competição pelos profissionais disponíveis nesta faixa etária. No caso da mineração, a crescente automação das minas será condição imperiosa, necessitando de aumento nos investimentos em inovação e na elevação da qualificação dos trabalhadores.

REFERÊNCIAS

- CGEE-Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Mestres 2012: Estudos da demografia da base técnico-científica brasileira. Brasília: CGEE, 2012.
- GEOCAPES. *Sistema de Informações Georreferenciadas*. 2000-2011. Capes. Disponível em: <<http://geocapes.capes.gov.br/geocapes2/>>. Acesso em 25 de junho de 2015.
- GUSSO, D.A.; NASCIMENTO, P.A.M.M. Evolução da formação de engenheiros e profissionais técnico-científicos no Brasil entre 2000 e 2012. Rede de pesquisa Formação e mercado de trabalho: coletânea de artigos, 6 volumes, Brasília: Ipea; *ABDI*, v. 4, cap. 1, p. 20-59. 2014.
- INEP-Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. *Censo da Educação Superior*. 2000-2013. Disponível em: <<http://portal.inep.gov.br/web/censo-da-educacao-superior/censo-da-educacao-superior>>. Acesso em 25 de junho de 2015.
- MACIENTE, A. N.; NASCIMENTO, P.A.M.M. A demanda por engenheiros e profissionais afins no mercado de trabalho formal. Rede de pesquisa Formação e mercado de trabalho: coletânea de artigos, 6 volumes, Brasília: Ipea; *ABDI*, v. 4, cap. 3, p. 102-122. 2014.
- NASCIMENTO, P.A.M.M. Escassez de força de trabalho: uma revisão da literatura internacional e interpretação dos resultados empíricos referentes ao Brasil. Rede de pesquisa Formação e mercado de trabalho: coletânea de artigos, 6 volumes, Brasília: Ipea; *ABDI*, v. 3, cap. 6, p. 186-210. 2014.
- SALERNO, M.S. et al. Uma proposta de sistematização do debate sobre falta de engenheiros no Brasil. Rede de pesquisa Formação e mercado de trabalho: coletânea de artigos, 6 volumes, Brasília: Ipea; *ABDI*, v. 4, cap. 4, p. 138-159. 2014.





VII

Considerações Finais

Considerações finais sobre o setor mineral brasileiro e visão de futuro

John Forman

JF Consultoria

Adolpho José Melfi

Aroldo Misi

Diogenes de Almeida Campos

Umberto Giuseppe Cordani

Organizadores da publicação

INTRODUÇÃO

Em 2013, a Academia Brasileira de Ciências (ABC), entendendo que a exploração de recursos minerais requer uma utilização maciça do conhecimento científico que se tem do subsolo e da gênese dos depósitos minerais, resolveu organizar o simpósio “Recursos Minerais do Brasil: Problemas e Desafios”. O evento, que teve a participação de figuras relevantes da política mineral brasileira, permitiu a troca de ideias e discussões sobre os setores mineral e energético brasileiros, neste último caso com ênfase em matérias primas energéticas.

Face aos bons resultados obtidos no simpósio de 2013, a ABC decidiu produzir uma publicação que refletisse o que foi abordado, analisando a situação atual do país e sugerindo estratégias para o futuro. Permeando os diferentes capítulos desta obra se encontram carências que afetam o setor mineral brasileiro, cuja origem está ligada à falta de informações básicas, à falta de recursos financeiros e humanos, de políticas permanentes e de um ambiente propício ao desenvolvimento do setor, a começar pelo pouco conhecimento sobre o território nacional, resultado da escassez de recursos aplicados ao longo dos anos para atender a necessidade básica de conhecer a geologia do país.

Entendemos que, apesar de inúmeras e bem intencionadas tentativas, iniciadas em diferentes governos, com o objetivo de realizar os levantamentos geológicos básicos imprescindíveis para o desenvolvimento do setor mineral, para o conhecimento de solos e as possibilidades de uso do mesmo, conhecimento dos reservatórios de água subterrânea, para a segurança de aglomerados urbanos e outros usos mais, infelizmente os resultados deixaram a desejar. Para que

seja possível chegar a um conhecimento ordenado da geologia do território Brasileiro e atingir um nível de escala e precisão crescentes em benefício de todas as atividades que dependem de tal conhecimento, o planejamento é absolutamente essencial. No entanto, embora isso tenha sido tentado, a sistemática falta de continuidade do que foi planejado levou a não execução das propostas e ao fracasso das iniciativas.

Levando em conta os resultados do seminário de 2013, e o que consta nos capítulos anteriores desta obra, produzidos por autores muito qualificados, a quem cabe a responsabilidade do que escreveram, os presentes autores procuraram incluir neste capítulo conclusivo o seu entendimento a respeito do histórico dos setores mineral e energético do Brasil, além de uma análise da situação atual, neste início de 2016, bem como uma possível visão de futuro.

PERSPECTIVA HISTÓRICA DO SETOR MINERAL BRASILEIRO

A organização inicial do setor

Ao tempo da Comissão Geológica do Império, seguido do Serviço Geológico da República, o que se buscava era conhecer e descrever, de forma mais limitada, o território nacional. As atenções eram voltadas para situações específicas locais, como uma bacia sedimentar descoberta, ou a um conjunto de rochas cristalinas que afloram em grandes massas em partes do território, ao curso de um rio e eventualmente de seus afluentes, ou mesmo de uma área geográfica restrita. A geologia desenvolvida, dentro das tradições europeias, era mais uma atividade de descrição do território e sua

classificação, tal como em outras ciências naturais, como a botânica ou a zoologia. Os recursos minerais se tornavam conhecidos pela sua utilidade e não se faziam correlações maiores com a geologia. Mesmo assim, vários dos trabalhos desenvolvidos no Brasil tiveram como motivação os recursos minerais, como, por exemplo, o carvão e o petróleo da Bacia do Paraná ou os levantamentos em outras bacias, com objetivos semelhantes. A garimpagem do ouro vinha da colônia, mas se esgotara antes da criação do serviço geológico. Deve ser lembrado o esforço realizado no início do século XIX, quando da vinda de D João VI, que trouxe o Barão de Eschwege, com o objetivo de revitalizar a produção de ouro no país, o que resultou na criação de empresas privadas de capital estrangeiro que vieram a abrir minas de ouro. As minas que se desenvolveram então foram o resultado da busca da continuidade das fontes de ouro.

A produção de ferro em Congonhas, Minas Gerais, com a utilização do forno catalão, antecedeu, em muito, a compreensão do enorme potencial de ferro da região. A Comissão Geológica do Império foi extinta em 1878 e, em 1907, foi criado o Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil. Com a República, os recursos minerais encontrados no subsolo passaram ao proprietário do solo e não mais ao governo, como acontecia no Império.

A atividade mineral teve pouco desenvolvimento, o que foi atribuído ao fato de que os proprietários do solo não permitiam a realização de pesquisas minerais em suas terras. As discussões sobre o tema levaram a que, em 1934, fosse criado o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e, pela Constituição do mesmo ano, os recursos minerais passaram à propriedade da União, como aconteceu no Império. O DNPM contava com a Divisão de Fomento Mineral, responsável pela parte de concessões minerais e pelo fomento das atividades de mineração, com a Divisão de Geologia e Mineralogia, que correspondia ao antigo Serviço Geológico, a Divisão de Águas, depois Departamento de Águas e Energia, e o Laboratório de Produção Mineral.

Em 1938, devido à polêmica criada com a descoberta do petróleo em Lobato, na Bahia, as atividades relativas ao petróleo foram retiradas do DNPM e passadas para o então criado Conselho Nacional do Petróleo. Em 1953, como resultado de uma grande campanha popular, foi criada a Petrobras e a ela atribuído o monopólio da exploração e produção de hidrocarbonetos no país.

A necessidade de geólogos, quer para o mapeamento geológico, quer para as atividades de exploração

mineral e em especial de petróleo, levaram, no governo Juscelino Kubitschek, à criação da CAGE (Campanha de Formação de Geólogos), a qual criou os primeiros cursos de geologia do país em Porto Alegre, São Paulo, Ouro Preto e Recife, com início de atividades em 1957. Em 1958, foram criados, ainda, os cursos do Rio de Janeiro e Salvador. Foram os geólogos formados nestes cursos e naqueles que se seguiram, os responsáveis pelo desenvolvimento do conhecimento geológico do país e pelas inúmeras descobertas minerais que ocorreram em todo território nacional desde então. Este é um claro exemplo do resultado positivo de um planejamento bem sucedido, bem como o seu impacto no desenvolvimento do conhecimento científico específico e na economia da nação.

O DNPM e os projetos minerais de âmbito nacional

A primeira tentativa de planejamento sistemático ocorreu na década de 1960, com a elaboração, pela Divisão de Geologia e Mineralogia (DGM) do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), do “Plano Mestre para Avaliação de Recursos Minerais do Brasil”, 1965-1974. Seria um plano decenal que deveria ter revisões, ao longo do seu desenvolvimento, visando sua adequação aos objetivos, revisões estas que não ocorreram. O plano previa o mapeamento geológico do Brasil, na escala do milionésimo. Com escalas maiores se mapeariam as regiões com potencial mineral já conhecido, como o Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, ou as que viessem a ser descobertas.

A Divisão de Geologia e Mineralogia do DNPM seria a responsável pelos trabalhos. Contava a DGM com quadros próprios muito reduzidos e praticamente concentrados no Rio de Janeiro. A ideia era que estes quadros se expandissem com a chegada ao mercado dos geólogos formados pelo programa da CAGE (Campanha de Formação de Geólogos). Um mapeamento geológico de detalhe ocorreu no Quadrilátero Ferrífero, na escala de 1:25.000, num projeto de colaboração do DNPM com o Serviço Geológico Americano (USGS), convênio que se extinguiu poucos anos depois.

O resultado do chamado projeto Araguaia, contratado pelo DNPM com a empresa PROSPEC, com o uso intensivo de fotografias aéreas, desvendou, pela primeira vez no país, a geologia da bacia daquele grande rio, sendo fonte de inspiração para o levantamento na escala do milionésimo. A consulta a esse projeto mostra que o planejamento foi bem elaborado, bem como a previsão de recursos adequados para sua execução.

O mapeamento ao milionésimo veio a ser concluído na primeira década deste século XXI, ou seja, praticamente meio século após sua proposição. A título de

Tabela 1 Cobertura geológica do Brasil a partir do Plano Nacional de Mineração-2030, de acordo com mapeamento em diferentes escalas.

Escala	1:1.000.000		1:250.000		1:100.000	
Ano	2010	2030	2010	2030	2010	2030
Brasil		100%	56%	91%	22%	47%
Território Não-Amazônico		100%	64%	78%	50%	100%
Território Amazônico		100%	50%	100%	3%	10%

(Fonte: Elaborada pelos autores).

comparação, o Plano Nacional de Mineração-2030 preconiza os números apresentados na Tabela 1 para a cobertura geológica do país.

Ou seja, quase meio século após o primeiro plano, a cobertura ainda não estava completa em toda a sua gama. A previsão atual é tão boa quanto as anteriores, o que é demonstrado pelo corte de verbas ocorrido após a publicação do mencionado Plano Nacional de Mineração. Quando comparamos o resultado brasileiro com o de países como os EUA, Canadá, Austrália ou África do Sul, que tem grande extensão, ou países europeus, com menor extensão, onde os territórios são praticamente cobertos por mapas na escala de 1:25.000, e as províncias minerais com escalas maiores, podemos avaliar a defasagem do Brasil.

Já em meados dos anos 1960 o Brasil passou a realizar os levantamentos geológicos utilizando radar, técnica introduzida nos anos 1950. É de interesse notar que foi a DGM do DNPM que deu partida e realizou nos anos 1970 o Projeto RADAM - Radar da Amazônia, utilizando a tecnologia do tipo SAR, que cobriu a totalidade da região amazônica, permitindo não só a melhor interpretação da geologia, como corrigindo geograficamente a localização de inúmeros rios e assentamentos urbanos. A penetração da camada de nuvens pelo radar permitiu, pela primeira vez, uma visão mais integrada do território da Amazônia.

A tecnologia do uso de fotos aéreas verticais utilizada no Projeto Araguaia se disseminou rapidamente pelo Brasil, com inúmeros levantamentos realizados, já o uso do radar ficou praticamente limitado à bacia Amazônica. Mais recentemente, o sensoriamento remoto evoluiu com novas tecnologias e aplicações, como foi comentado no subcapítulo **Sensoriamento Remoto em Exploração Mineral no Brasil**. Entretanto, a sua aplicação sofre da crônica falta de recursos.

Foi também pela DGM que se iniciou o Projeto Bahia nos anos 1960, primeiro levantamento geoquímico, de escala regional, realizado no Brasil. O objetivo foi o desenvolver a técnica e formar recursos humanos,

visando a prospecção mineral. Embora limitado pela tecnologia disponível, permitia a prospecção para Cu, Pb, Zn, Sn, W e Au e estava a altura do que se fazia fora do país. Na década de 1970 é que começaram os levantamentos com multimeios amostrais e multielementares, como foi descrito no subcapítulo **Prospecção Geoquímica no Brasil**, onde se propuseram as linhas gerais para o planejamento de um levantamento geoquímico do Brasil. Estava o país bem equipado no que diz respeito aos processos de mapeamento com tecnologias no estado da arte de então, as quais se deve acrescentar as técnicas da geofísica, descritas no subcapítulo **Prospecção Geofísica no Brasil**.

No Brasil, os primeiros levantamentos aéreos utilizando sensores para magnetometria e radiometria foram contratados nos anos 1950 pela Comissão de Energia Nuclear do Conselho Nacional de Pesquisas, visando a descoberta de possíveis mineralizações radioativas. Estes levantamentos levaram a descoberta das chaminés alcalinas no sudeste do país, tais como Poços de Caldas, Araxá, Catalão e outros mais, descritos nos subcapítulos **Fosfato no Brasil** e **Elemento Combustível Nuclear: Urânio**.

A partir dos anos 1950, a Petrobras também usou com grande frequência levantamentos geofísicos aéreos para o estudo das bacias sedimentares que careciam de informações geológicas. Surgiram várias empresas nacionais e estrangeiras que realizavam estes levantamentos e a técnica foi bem absorvida no país. Levantamentos geofísicos terrestres, em escalas menores, também foram realizados utilizando magnetometria, gravimetria, radiometria e métodos elétricos e eletromagnéticos, na prospecção mineral e na busca de água subterrânea. As técnicas de sísmica de refração e reflexão também foram utilizadas intensamente pela Petrobras.

Por outro lado, no setor de petróleo e gás, não se deve esquecer que com a criação da Petrobras, em 1953, o estudo das bacias sedimentares ficou a seu cargo, ficando o DNPM limitado a atuar nos escudos crista-

linos. Embora a Petrobras tenha realizado inúmeros trabalhos e levantamentos geológicos, geodésicos e geoquímicos, seus resultados não eram divulgados e nem faziam parte dos bancos de dados do DNPM. Com a criação da Agência Nacional do Petróleo (ANP), em 1997, pela Lei 9478, a Petrobras deveria a ela entregar todos os dados que dispunha, por serem considerados propriedade da União e que em grande parte estão no banco de dados da ANP, o BDEP, e disponíveis a consulta pública. Entretanto, a Petrobras não entregou as interpretações. De 1953 até 1997, os dados das bacias sedimentares brasileiras tiveram pouca divulgação, restrita, praticamente, a apresentações em congressos, seminários, etc.

A partir de 2000, a ANP, com seu programa de formação de recursos humanos para a área de petróleo e gás, desenvolveu e ainda desenvolve parcerias com inúmeras universidades que obtiveram recursos para construção de laboratórios, formação de bibliotecas, liberdade para contratação de professores e bolsas para os alunos. Também a Petrobras deu início a um extenso programa de colaboração e o Governo criou o PROMINP, programa voltado para a formação de pessoal para o setor de petróleo. Inúmeras universidades participaram e participam destes programas, agora bem mais restritos. Recentemente, a BG, em parceria com a Universidade Federal da Bahia, criou um laboratório de geoquímica dedicado à área do petróleo e gás.

Até a descoberta do petróleo no pré-sal, o grosso da produção nacional vinha de águas profundas da bacia de Campos. A produção de petróleo, para ser mantida, demanda a permanente adição de novos campos, com novas reservas. A descoberta no pré-sal teve várias consequências e, devido ao seu potencial, passou a receber as atenções concentradas da Petrobras, ficando prejudicado o programa de adição de novas reservas, em outras áreas. O país tem produção nas bacias de Campos (ainda a maior bacia), Sergipe-Alagoas (com grande potencial), além de outras, sem contar com muitos campos em terra, já maduros, mas sem perspectivas de aumento de produção. Atualmente, o pré-sal vem produzindo na ordem de 800.000 barris/dia com as maiores produções individuais, de um total de produção da ordem de 2.200.000 barris/dia. Por outro lado, é no pré-sal que serão buscados os acréscimos de produção para a manutenção do nível atual e futuro crescimento. Daí a preocupação com o nível de preços atuais vigentes no mercado. Com efeito, o petróleo e gás atravessam no momento uma fase muito interessante. Os preços de petróleo e gás caíram a níveis muito baixos, ficando abaixo dos

US\$ 30 o barril e US\$ 1,5 o BTU de gás. As explicações são as mais variadas, sendo real o fato de que a Arábia Saudita vem mantendo a produção a despeito da queda de preços. Estes preços afetam os países com custos de produção mais elevados, como Rússia, Venezuela e o óleo de folhelho (*shale*) dos EUA, e causa preocupação ao Brasil para a produção a partir do pré-sal.

O II Plano Decenal de Mineração foi elaborado para o período de 1981/1990. Menos ambicioso e cobrindo os anos da chamada década perdida, foi inócuo e pouco contribuiu.

A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM)

Em 1969, pouco após a aprovação da reestruturação do DNPM e início da sua implementação, ocorreu uma grande mudança na forma de atuar no setor mineral. Foi criada a CPRM, com o objetivo de realizar as tarefas inerentes aos órgãos de administração direta, como o DNPM, o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), órgãos estes que ficaram obrigados a contratar a CPRM para realização de seus projetos. O DNPM ficou restrito aos assuntos de ordem legal na concessão de autorizações para pesquisa e lavra mineral. A CPRM ficou também encarregada de realizar pesquisas minerais, com a presunção de que atuaria mais e melhor do que a iniciativa privada, embora impedida de minerar. Absorveu a maior parte do corpo técnico dos órgãos da administração direta e, com isto, passou também a orientar os projetos que realizava em nome de seus contratantes. Havia pouca eficiência administrativa e os custos cobrados reduziram em muito os recursos, já escassos, dos órgãos contratantes. A atuação da CPRM como empresa mineral já refletia uma tendência que se cristalizou na Constituição de 1988, que proibiu empresas estrangeiras de atuar na exploração mineral no Brasil. Esta situação só veio a ser modificada por emenda constitucional que definiu como empresa brasileira aquela criada no país e de acordo com suas leis.

Na década de 1970, foram criadas empresas estaduais para realização de estudos geológicos e prospecção mineral, como a Metais de Goiás (METAGO), a Metais de Minas Gerais S.A. (METAMIG), a Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM) e a MINEROPAR (hoje Serviço Geológico do Paraná). Essas empresas tiveram uma participação importante para o conhecimento geológico e dos recursos minerais dos estados aos quais estavam ou estão vinculadas. Algumas encerraram suas atividades, mas outras, como a CBPM e MINEROPAR, continuam atuantes.

Em 1994, foi apresentado o Plano Plurianual para o Desenvolvimento do Setor Mineral - 1994, o qual foi atualizado em 2000, com o título de Atualização do Plano Plurianual. No mesmo ano, a CPRM foi transformada em empresa pública com as responsabilidades de um serviço geológico. A mudança, importante para valorizar os estudos geológicos no país, atestou também os limitados resultados obtidos na atuação como empresa voltada para a prospecção mineral. A diminuição da atividade mineral no país refletiu, de um lado, o pouco apetite de empresas nacionais para entrar no setor de forma organizada e, de outro, a ausência das empresas estrangeiras que haviam atuado de maneira intensa, na década de 1970, trazendo grandes descobertas, inclusive a da província de Carajás.

Nos anos 1990, a CPRM evoluiu para um Serviço Geológico, título que passou a utilizar e que levou à modificação da sua forma de atuação, voltada para suas atividades próprias. Por um período no início deste século, contou com recursos para concluir o mapeamento ao milionésimo, e também produziu mapas em outras escalas, com a colaboração de universidades e outras organizações. Realizou também levantamentos aerogeofísicos, os quais trouxeram uma grande contribuição para o conhecimento do Brasil Central, onde foram responsáveis por várias descobertas minerais. Além disso, uma parte das contribuições das chamadas participações especiais destinadas por lei à ANP foram alocadas à CPRM, com a alteração da Lei 9478. O volume de recursos foi vultoso e poderia ter viabilizado a completa atuação do Serviço Geológico, por ser uma fonte permanente de recursos. Entretanto, o Ministério da Fazenda veio a utilizar sistematicamente o contingenciamento de verbas, o que reduziu, de fato, o montante de recursos disponíveis e tornou letra morta a possibilidade de executar adequadamente os planejamentos anuais de atividades pela CPRM.

LEGISLAÇÃO E POLÍTICA DO SETOR MINERAL

O baixo grau de agregação de valor na cadeia mineração/metalurgia/produto faz do Brasil um exportador de *commodities* sujeitas as variações do mercado. Trata-se das exportações primárias como fonte de recursos para o país, justamente aquelas mais sujeitas aos humores do mercado internacional por causa do preço que é fixado pelos países consumidores, quase sempre com diminuição do valor agregado. Até a criação da CPRM, o DNPM contava com duas divisões: a de Geologia e Mineralogia e a de Fomento da Produção Mineral, a

qual, além de tratar dos aspectos legais, realizava estudos e projetos no campo da mineração e tratamento mineral/metalurgia. Com a CPRM a ênfase foi na geologia e os demais setores tiveram pouca prioridade. A criação do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) no âmbito do Ministério de Minas e Energia (MME), deveria vir a atender a lacuna deixada pela Divisão de Fomento à Produção Mineral (DFM) do DNPM. Embora inaugurado com grandes esperanças, logo entrou na mesma problemática de carência de recursos e acabou sendo transferido para o Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação (MCTI), por se ter entendido que um órgão voltado à pesquisa e à inovação não caberia na estrutura do MME.

Para o país, do ponto de vista político, o setor mineral não representa uma prioridade. A Constituição de 1988, com a proibição da realização de pesquisas por empresas não brasileiras, ocasionou uma grande retração nas atividades do setor. A modificação só veio a ocorrer com a redefinição de empresa brasileira, mais de uma década depois. Note-se que a conclusão a que chegaram os constituintes, de que o grosso das pesquisas minerais no Brasil eram realizadas por empresas de capital estrangeiro, indicava apenas a falta de vocação de empresas brasileiras a assumir os riscos inerentes a exploração mineral, o que permanece até hoje. A atividade genuinamente nacional é a da garimpagem, a qual ganhou *status* ao longo do tempo, tendo preferência sobre a mineração organizada.

Outro fator importante a ser mencionado e que perpassa inclusive uma grande parte dos profissionais do setor mineral, é a visão de que os recursos minerais do país devem ser buscados, lavrados e transformados pelo Estado. É a antiga visão de que recursos minerais são sinônimo de soberania, mesmo que fiquem inaproveitados no subsolo, sem beneficiar as gerações atuais ou futuras, uma vez que a tecnologia evolui e com ela o uso dos materiais. Infelizmente, esta visão está presente no Projeto de Lei para o novo marco mineral ora em apreciação pelo Congresso.

Não menos importante é o aspecto fiscal. A evolução da forma de taxação e do seu recolhimento, por sua modificação frequente, é outro fator de instabilidade para quem quer investir no setor. A visão fiscalista, que busca sempre aumentar o valor de taxas, impostos ou contribuições, não leva devidamente em conta a remuneração do capital empregado, o qual, nos estágios iniciais, corre riscos de grande porte, principalmente porque a possibilidade de redução de incertezas, trazidas pelos mapeamentos geológico, aerogeofísico ou geoquímico, é restrita em vista da pouca ação dos órgãos governamentais responsáveis por tais levanta-

mentos, cabendo às empresas arcar com mais custos para a obtenção de dados básicos. Até a Constituição de 1988, aplicava-se ao produto mineral o IUM - Imposto Único, que incidia sobre todas as etapas da produção, mais o imposto de renda. Em seguida foi criada a CFEM - Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais, que incide sobre a produção, acrescida dos impostos federais, como PIS, PASEP, etc, mais o imposto de renda acrescido do ICMS de responsabilidade estadual. É um sistema complexo e pouco prático e que coloca a indústria mineral em desvantagem comparativa com a de outros países, onde a taxa é menor.

O SETOR ACADÊMICO E A FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS

Além da falta de recursos já mencionada nos itens anteriores, há que se analisar a pouca interação entre a Academia e a indústria mineral. Existem, é verdade, esforços que, no entanto, não chegam a atingir um nível desejável, por tempo suficiente. A desconfiança entre as partes é grande e impede uma colaboração efetiva e profícua. É importante notar que a falta de colaboração Academia/Indústria, não se restringe ao setor mineral apenas.

Programa Nuclear Brasileiro, a NUCLEBRÁS procurou engajar o maior número de universidades nas atividades que desenvolvia em prospecção mineral. O programa, apesar do sucesso na descoberta de reservas de urânio, teve curta duração.

O CNPq, na década de 1960, juntamente com a FINEP, antecipando-se a criação da pós-graduação, que veio com a reforma universitária, incentivaram surgimento de centros de excelência nos cursos então existentes, buscando uma especialização que atendesse a demanda de profissionais do país. Foram criados os centros de excelência no Rio Grande do Sul, com ênfase em sedimentologia e estudos de bacias sedimentares e seu potencial; em São Paulo, os objetivos eram as chamadas rochas duras, petrologia, datação isotérmica exploração mineral; no Rio de Janeiro, a geologia de engenharia, como resultado dos inúmeros deslizamentos de encostas que haviam ocorrido na ocasião; em Ouro Preto, a ênfase foi em geologia estrutural; na Bahia, em geoquímica, como consequência do Projeto Bahia acima mencionado, e geofísica, para atender a Petrobras; em Recife, água subterrânea e também rochas duras. A SUDENE, em cooperação com BRGM francês, havia realizado um extenso levantamento do potencial de água subterrânea no Nordeste.

O MME criou no final dos anos 1960, um programa para formação de pessoal, o I Curso de Economia Especializada, em convênio com a Fundação Getúlio Vargas, o Projeto PLANFAP- CAEBB, visando a especialização de geólogos e engenheiros de minas em economia mineral. A parte de Economia dos Recursos Minerais cobriu todos os aspectos de avaliação econômica de jazidas, de minas, bem como exploração, lavra e beneficiamento mineral. Foi extremamente importante para a formação de profissionais com domínio dos aspectos econômico/financeiros do setor mineral. Infelizmente teve curta duração e formou um número restrito de profissionais.

É interessante refletir sobre o fato de que o conhecimento do estado da arte das técnicas e tecnologias aplicadas ao setor mineral são de conhecimento da Academia, mas, com uma frequência realmente indesejável, não permeiam o setor como um todo. Os esforços, no passado, de dotar as universidades de condições favoráveis e formação de pessoal de bom nível, equipando-as com bons laboratórios, bibliotecas, professores, etc, se frustram ante a realidade da indústria pouco competitiva e, por consequência, pouco interessada em aplicar os conhecimentos adquiridos e desenvolvidos. A parceria indústria/universidade, altamente desejável, é escassa entre nós, no setor mineral propriamente dito. Na área de petróleo e gás há uma colaboração maior e mais efetiva.

É de se notar que na indústria mineral no Brasil, a presença de profissionais com Mestrado e Doutorado é muito reduzida. Considerando o número de formandos nestes níveis, a conclusão é de que ficam restritos às universidades, com a consequente ausência de tecnologias mais avançadas nas atividades industriais. Por outro lado, a demanda de técnicos de nível médio é elevada e não vem sendo atendida a contento.

A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

“Aquele que prevê o futuro mente, mesmo quando acerta”. Esse ditado árabe se aplica bem ao setor energético como um todo e, em particular, ao óleo e gás.

Sendo a energia um insumo importante para indústria, comércio, serviços, etc. é conveniente que tenha um custo baixo para permitir competitividade nas atividades econômicas. Infelizmente, a energia no Brasil é das mais caras do mundo. O Brasil se orgulha, com razão, de ter sua matriz energética limpa, devido principalmente a geração de energia por fontes hidráulicas que correspondem a aproximadamente a 14% da energia total gerada, compondo os 43% de

energias renováveis. O país possui inúmeras barragens para a geração de energia e, além disso, existe potencial hidráulico a ser aproveitado na região Norte. Entretanto, por razões ecológicas, nessa região os reservatórios devem ser obrigatoriamente pequenos, gerando a fio d'água, o que reduz muito a capacidade de geração, especialmente nos meses de seca. Outro ponto a ser levado em conta na geração hidroelétrica é a competição pelo uso da água, como foi visto em 2015 em São Paulo e Rio de Janeiro, onde o suprimento de água para a população teve prioridade, como é natural. Portanto, o uso da água em irrigação aumentou muito, para a produção agrícola e para o atendimento das populações urbanas, o que deve ser levado em conta no cálculo de geração de energia, preocupação que praticamente inexistia.

No Brasil, as hidroelétricas trabalham na base da geração e as usinas térmicas nas demandas da ponta. No mundo, a situação é inversa. As térmicas na base e as hidroelétricas na ponta. Com a geração continua o custo de uma térmica se reduz, além de evitar os problemas de operação, uma vez que o processo de desligamento ou de posta em marcha, demanda tempo e é gradual. O controle do fluxo de águas é mais simples.

O etanol, outra fonte renovável de grande importância, que associado aos demais produtos da cana de açúcar soma cerca de 15,5% do total da energia gerada no país, foi gravemente afetado pelo processo de subsídios ao preço da gasolina e diesel e passou de uma indústria pujante no início do século a uma indústria claudicante e lutando para sobreviver, com o fechamento de inúmeras usinas.

As outras fontes renováveis, como eólica, solar, etc., as quais contribuem com cerca de 4% do total gerado, embora promissoras, não têm condições de suprir grandes massas de energia, nas tecnologias atuais, embora, principalmente as eólicas venham tendo um bom desempenho em termos de custos, ao longo dos últimos anos. Têm, ainda, geração intermitente, o que não traz a segurança de fontes de geração continua.

A contribuição da geração nuclear, da ordem de 1,5%, não tem como contribuir de modo relevante. Embora o país detenha reservas importantes de urânio e domine o ciclo do combustível nuclear, a previsão para o uso da geração nuclear é pequena e flutuante nas projeções para o atendimento da demanda futura. Continuamos presos à visão de um lixo atômico de difícil administração, e de um perigo permanente da geração nuclear, ignorando os avanços tecnológicos que tornaram a segurança intrínseca das usinas muito maior atualmente. Atualmente a China constrói usinas, o Irã constrói usinas, os países europeus começam e

rever suas prioridades e os EUA além de autorizar a operação das usinas por tempo maior, projetam novas. Olhando o passado, Chernobyl foi um acidente de operação fora dos padrões, em testes de gradientes térmicos que não se fazem em usinas industriais, além de ser um projeto antiquíssimo sem vaso de contenção e prédio adequado as condições operacionais. Three Mile Island foi um incidente e não um acidente, que não teve maiores consequências, a não ser a melhoria dos processos de segurança. Fukushima, também foi um projeto antigo em que o resfriamento dependia de bombas, o que não mais acontece nos projetos atuais.

MINERAÇÃO E AMBIENTE

Os aspectos de desenvolvimento sustentável e a preocupação com o meio ambiente são importantes e devem ser respeitados. Para tanto a regulamentação se faz necessária e deve ser clara e objetiva. Aqui, aspectos culturais resultantes da concentração das populações em centros urbanos, além da urbanização intensiva que vem ocorrendo, trazem dificuldades.

Nas cidades não há a preocupação quanto a forma que os diferentes produtos utilizados no dia a dia são obtidos. A energia está na tomada e não se vê que, para que ela chegue, são necessários fios de cobre, envoltos em plástico por segurança, e que chegou às residências ou prédios através de cabos de alumínio, sustentados por torres de aço, com isoladores de porcelana, etc. As construções demandam cimento, tijolos, vergalhões de aço, as janelas são de vidro, as tintas e seus pigmentos tem base mineral. Nossos meios de transporte são feitos de aço, alumínio, plásticos e por aí vai, e, além disso, dependem de combustíveis líquidos e gasosos, o uso de plástico em todas as suas formas, a química fina com seus medicamentos, como também cosméticos, dependem de petróleo e seus derivados.

A produção mineral que sustenta a civilização e permite sua expansão não é vista como a fonte dos produtos e coisas que nos permitem viver. Infelizmente, o que se constata hoje é a demonização dos setores mineral e de petróleo, sem a compreensão da importância que tem para a sociedade. A busca de bens minerais, e o seu aporte para a produção de todas as coisas que cercam as pessoas, é não somente importante, como imprescindível para a sobrevivência da humanidade. Ela deve ser harmonizada com os aspectos ambientais e de sustentação, sob pena da falência da sociedade como a conhecemos. Por outro lado, as lavras de minério têm que ser adequadamente controladas para evitar os possíveis danos ambientais,

que estão sujeitos a acidentes, como foi o caso da tragédia ambiental da Samarco, conforme descrição do subcapítulo **Desafios Sociais e Ambientais da Mineração no Brasil e a Sustentabilidade**.

A Amazônia, enorme ecossistema complexo e desafiante, representa para o Brasil grandes oportunidades de desenvolvimento, inclusive do setor mineral, conforme foi apontado no subcapítulo **Mineração - Presente e Futuro da Amazônia**. Aqui há que se distinguir dois vetores distintos: a grande mineração e o garimpo. Se tomarmos como exemplos o ferro do Carajás ou a bauxita do rio Trombetas, que são atividades realizadas com controles físicos e ambientais, visando a conservação do ambiente e a recuperação das áreas lavradas, é possível contabilizar os benefícios gerados localmente na região e para o país. Eles se desenvolvem em áreas restritas, sem afetar o ecossistema em escala regional.

Já o garimpo, resultado da exploração desordenada de recursos minerais, cujo exemplo mais marcante foi o de Serra Pelada, afeta, às vezes de forma irreversível, grandes extensões do território Amazônico. A lavra desordenada de ouro no rio Madeira contaminou com mercúrio uma parte considerável da bacia daquele rio. Da mesma forma, em outras áreas onde a atividade garimpeira se desenvolveu os danos foram reais e extensos. No entanto, há uma grande preocupação com a mineração organizada da qual são exigidos, corretamente, planos de lavra, de disposição de rejeitos, EIAS, RIMAS, estudos e avaliações de grande porte, longa duração e custos elevados, enquanto que nos garimpos nada disto é feito, e as áreas lavradas não são recuperadas. Os garimpeiros podem ser expulsos, mas os danos da atividade ao ambiente permanecem sem qualquer consequência.

Isto leva diretamente ao Poder Público, que se faz ausente, embora ambas as atividades, a grande mineração e o garimpo, devam se desenvolver sob regimes de concessão, com formas de atuação bem delineadas e fiscalizadas, para que nenhum dano irreversível venha a ocorrer. Os garimpos, na maioria das vezes, são tratados como problemas de polícia, com uma certa dose de erro, de dispensa de regras em função de hipotéticas dificuldades sociais.

A SITUAÇÃO PRESENTE E VISÃO DE FUTURO

O setor mineral e os recursos humanos

Conforme já foi comentado, a falta de uma política consistente para o setor mineral se demonstra pelos fatos ao longo dos anos. A partir de 1965, o DNPM formulou

planos decenais para atender as demandas do setor. Em 2011 foi divulgado O Plano Nacional de Mineração - 2030. Todos estes planos tiveram pouco impacto e contribuição modesta, sempre pelos mesmos problemas recorrentes de falta de verbas, recursos humanos, salários defasados, etc. O último, atingido pela crise econômico/financeira atual já mostra que não atingirá as metas propostas, o que é de se lamentar.

Como mencionado acima, planejamentos que partem de uma demanda que precisa ser atendida, levando em conta as estimativas de crescimento do PIB ou as necessidades de um setor específico, mantêm pouca relação com a realidade. As incertezas econômicas que afligem o país, de longa data, frustram as estimativas de crescimento e, por consequência, a disponibilidade de recursos que são atrelados ao crescimento previsto e não alcançado. Por exemplo, na formação de recursos humanos, muitas vezes os esforços se frustram pela brusca modificação do mercado. Para os planejamentos anteriores a década de 1980, conhecida como a década perdida, este foi um período de desastre total. Isto se refletiu também, nas Universidades e na indústria, esfriando parcerias que se haviam iniciado, como as formadas com a CVRD. Com a atividade da mineração diminuída pelas incertezas legais, fiscais e políticas, não há no momento um ambiente favorável à formação de parcerias.

A quantidade de cursos de geologia e de engenharia de minas hoje existentes no país poderia atender a uma demanda muito superior a que o mercado indica para os próximos anos. A proliferação de cursos e o pouco intercâmbio com a indústria são um fator de preocupação no que diz respeito a qualidade dos formandos e sua adequação ao mercado. Os currículos escolares são muito variados e tendem ao excesso de matérias, sem o aprofundamento imprescindível na formação básica dos alunos, produzindo profissionais com limitada capacidade e conhecimento, o que os desvaloriza. O fenômeno não é, infelizmente, restrito a geólogos e engenheiros de minas, mas afeta a grande maioria dos profissionais hoje formados no país.

O Brasil mineral no mundo

Com relação à plena realização do potencial mineral do Brasil, é interessante comparar o investimento brasileiro no setor com o investimento em exploração mineral, voltado aos metais preciosos, metais base e diamantes no mundo, que em 2012 foi de US\$ 21,5 bilhões. No Brasil, o gasto correspondeu a 3% do total, enquanto na Austrália o gasto correspondeu a 14% do total e no Canadá a 17% do mesmo valor. Sabendo que, conforme o capítulo **Potencial Mineral do Brasil** da

presente obra, o potencial mineral que o Brasil possui é grande, verifica-se que o conhecimento geológico-metalogenético de seus distritos mineiros e depósitos minerais, a política vigente, a confiança jurídica e a atratividade para investimentos em exploração mineral no país deixam muito a desejar. Dois exemplos caracterizam muito bem os problemas do setor mineral. O Brasil detém enormes reservas de minério de ferro e é um grande exportador, que alimentou a siderúrgica da China quando estas tinham uma demanda elevada. Com a queda da demanda Chinesa, o preço do minério de ferro despencou, ocasionando uma violenta queda de valor das exportações, que prejudicou grandemente as empresas produtoras e exportadoras. O preço do aço também caiu, mas em menor proporção na medida em que a demanda industrial, mesmo na China, não se desacelerou no mesmo ritmo. O outro exemplo é o do nióbio. Sabe-se que os equipamentos de análise, que se multiplicam no mundo, utilizam ligas especiais de nióbio. O Brasil detém as maiores reservas do mundo de um metal que encontra grande uso no mercado mundial. No entanto, durante muitos anos exportou apenas concentrados por falta de tecnologia para agregar valor, até chegarmos a exportação do óxido, ferro-nióbio, nióbio metálico das superligas e compostos especiais. Digno de nota é o fato que o desenvolvimento tecnológico foi feito pela empresa concessionária das jazidas de Araxá, a CBMM.

O setor energético brasileiro e os combustíveis fósseis

No tocante à matriz energética, baseada em grande parte em usinas hidroelétricas, devido às condições climáticas prevaletentes em 2014 e 2015, o país sofreu uma escassez de água que afetou a geração de energia, levando ao uso intensivo de usinas térmicas, que foram chamadas a suprir a energia faltante. Muitas delas, construídas para operar de forma intermitente, apenas para suprir necessidades de ponta, têm custo de geração muito elevado, levando ao aumento do custo final da energia. O quadro só não ficou mais grave devido à recente desaceleração da economia, que teve como consequência a redução do consumo, o que por sua vez reduziu a demanda por gás queimado nas térmicas de maior porte. Por esta razão, os terminais de importação de gás natural liquefeito (GNL) abertos pela Petrobras estão operando muito abaixo da capacidade, o que significa aumento de custo. A decisão do Governo de antecipar a renovação das concessões de usinas hidroelétricas atrelada a uma redução de tarifas criou um quadro perverso, quebrando as empresas do sistema Eletrobrás e levando praticamente ao colapso o sistema

nacional. A correção das tarifas, em valores elevados, cobrou da população a correção dos erros cometidos. A esperança é que no ano corrente de 2016 as chuvas elevem os reservatórios a níveis menos preocupantes.

Quanto a petróleo e gás, conforme foi comentado no item anterior, seus preços no presente flutuam muito e continuarão a flutuar no futuro. À preocupação com o nível de preços deve-se acrescentar a preocupação com a capacidade operacional da Petrobras. O subsídio que foi obrigada recentemente a dar a gasolina e diesel vendidos internamente, por orientação do governo, consumiu o total de recursos levantados em operação financeira exitosa, deixando-a sem recursos para tocar as operações do dia a dia, tornaram o endividamento a saída. Um endividamento elevado, da ordem de R\$ 500 bilhões, a ser atendido por um fluxo de caixa reduzido drasticamente pelos preços de mercado, a desvalorização do Real e a demanda de pesados investimentos para manter um nível de produção compatível com as necessidades, compõem um quadro difícil. Além disso, para a Petrobras, a obrigação de ser a operadora em todos os blocos do pré-sal e de manter uma participação mínima de 30% dos projetos, nas condições atuais de caixa, faz com que não seja conveniente abrir novas frentes. A consequência é a não realização de leilões que poderiam atrair outras empresas e assim contribuir para a solução dos problemas existentes. Finalmente, a venda de ativos, como forma de reforçar o caixa, ocorre em momento de preços de petróleo muito baixos e com poucas perspectivas visíveis de aumento no curto prazo, e com o real desvalorizado, o que dificulta alcançar as metas traçadas.

Para enfrentar a volatilidade do setor de petróleo e gás, é importante que a Petrobras tenha uma boa saúde financeira e perspectivas de investimento para quando a ocasião demandar. Por isso é que é importante sanear as contas para que a capacidade técnica que existe possa atuar de forma adequada. Para a aflição maior de todos, muito da volatilidade do preço do petróleo advém de um mercado de futuros que movimenta, em tese, volumes fabulosos de óleo e gás, mas se tivesse que fazer a entrega física destes bens, não teria condições de entregar tais volumes. Ou seja, além de problemas geopolíticos, de mercado, existem os resultantes da especulação.

Finalmente, os chamados recursos não convencionais como o óleo e gás de folhelho, as areias betuminosas, os *tight deposits*, terão que aguardar mais desenvolvimentos tecnológicos que reduzam os custos de produção, como vem sendo tentado, ou terão que aguardar melhores condições de mercado. Olhando

a nossa bola de cristal, é possível estimar que as condições de mercado, provavelmente, não terão uma recuperação rápida nos próximos anos, com todas as consequências para as partes envolvidas.

A mineração e a legislação ambiental brasileira

A respeito das interações socioambientais com o setor mineral, a ausência do Poder Público no entorno dos grandes projetos e nos garimpos faz com que problemas socioeconômicos persistam e fiquem sem solução adequada. Por exemplo, no subcapítulo sobre a Amazônia se propõe a retomada de áreas degradadas pelo garimpo, através de uma ocupação ordenada, com técnicas adequadas ao aproveitamento dos recursos remanescentes e à recuperação ambiental, visando sanar os danos e dar um assentamento digno a trabalhadores e suas famílias. Em alguns garimpos abandonados pela dificuldade de lavrar em profundidades maiores, algumas empresas têm agido de forma a aproveitar o minério mais profundo e, como consequência de seu trabalho, acabam fazendo a recuperação ambiental necessária. No entanto, a ausência do Poder Público é um problema antigo e não resolvido, e a fiscalização, quando e se ocorre, é tardia e sem efeito. Obviamente, é preciso harmonizar as atividades produtivas dos setores mineral e de petróleo e o meio ambiente de forma efetiva e eficaz e não ter uma atitude de negação cega e preconceituosa.

Comentários sobre a nova proposta de regulamentação do setor mineral

Finalmente, é motivo de grande preocupação no setor mineral a sua própria regulamentação através de seu marco legal, o código de mineração. Isto foi muito discutido durante o Simpósio de 2013, da ABC, e muitos participantes tiveram críticas importantes em relação à proposta de revisão encaminhada ao Congresso legislativo pelo governo brasileiro.

Na década de 1970, com a colaboração dos geólogos formados a partir de 1960, uma grande atividade exploratória teve lugar, e inúmeras descobertas foram feitas pelas empresas privadas, em particular na Amazônia. Vigia então o Código de Minas, de 1934, que se entendia desatualizado e necessitando de revisão. Esta ocorreu em 1976, com mudança de nome para Código de Mineração, que sofreu algumas alterações em 1979. Mais tarde, sempre associada à visão de planejamento, ao longo do tempo, houve uma permanente preocupação em modificar a legislação mineral vigente, com o objetivo de torná-la adequada aos “novos” tempos. A nosso ver, o Código de Mineração nunca superou a permanente demanda por modificações.

Nos últimos três anos, tentativas de adotar medidas propostas no chamado Novo Marco Legal da Mineração, antes de sua aprovação pelo Congresso, freou a atividade de pesquisa e mineração no país. O texto, em análise pelo Congresso, pretende voltar ao passado e dar a CPRM, mais uma vez, o papel de centralizadora da prospecção mineral no país. Os resultados limitados e a inconveniência de uma empresa pública se dedicar a atividades de risco parecem não ter deixado uma impressão definitiva na memória burocrática do setor. Além disso, o projeto cria a figura de *royalties* em mineração, que, em substituição ao sistema atual, aumenta as alíquotas e torna a atividade de mineração menos competitiva. A permanente discussão quanto a modificação da legislação mineral traz consigo uma incerteza quanto ao que será modificado e assim as empresas se sentem inseguras e o ambiente para investimentos se torna desfavorável. A indústria mineral no Brasil reflete as variações da legislação de forma muito clara.

No momento, início de 2016, a última revisão do código está no Congresso aguardando votação. Nela esperam-se modificações profundas quanto aos problemas ambientais relacionados com mineração, conforme foi tratado no capítulo **Ambiente e Sustentabilidade**. Outra preocupação referente ao novo texto em análise no Congresso é que ele não trata das dificuldades encontradas na garimpagem.

A mineração no Brasil tem futuro?

A demanda por bens minerais no mundo tende sempre a aumentar e o Brasil, com sua grande extensão territorial, associada à enorme diversidade de ambientes geológicos, pode ser beneficiado em médio prazo, desde que corrigidas as distorções históricas da nossa política para o setor mineral.

Vale lembrar que a Indústria Mineral é um setor muito valioso para a economia brasileira, com uma participação de 4% no PIB, tendo representado um saldo comercial (superávit) de US\$ 27 bilhões em 2012¹, como bem demonstra Fernando Lins no capítulo **Tecnologia Mineral**.

Isto sem incluir o Setor de Petróleo e Gás, que representou 13% do PIB em 2014, porém com um saldo comercial negativo. O Setor Agropecuário, que está entre os mais importantes, responde por 6% do PIB com superávit de US\$ 79 Bi (ver Tabela 1 do subcapí-

1 O comércio exterior do setor mineral inclui minérios, metais/ligas e produtos não-metálicos. Dentre os minerais mais importantes estão os de: Fe, Mn, Nb, Al e Sn. O Fe representa 73% das exportações de produtos minerais.

tulo **Tecnologia Mineral: Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação - Panorama da Mineração Brasileira**). Em 2014, a produção mineral do Brasil atingiu o valor de 40 bilhões de dólares.

A queda do valor da produção após 2011 (que foi de 53 bilhões de dólares) atribui-se em grande parte aos problemas da economia mundial (incluindo o crescimento menos acentuado da China) e à queda de preços das *commodities*. No Brasil, adicionam-se a esses fatores as incertezas sobre o Marco Regulatório, já comentadas, assim como e principalmente os baixos investimentos em exploração mineral em comparação com outros países com dimensões territoriais semelhantes e com grande diversidade geológica, conforme foi bem demonstrado por Onildo Marini no subcapítulo **Potencial Mineral do Brasil** (ver Figura 1): Enquanto Canadá e Austrália investiram, em 2013, respectivamente, US\$ 287 e US\$ 226 por km², o Brasil investiu apenas US\$ 76/ km² no mesmo período.

Apesar de tudo, não se pode concordar com aqueles que afirmam, face às dificuldades do momento, não haver futuro para o Setor Mineral no Brasil. Muito pelo contrário, no médio prazo, com a diminuição dos estoques mundiais (dentre outros fatores), as *commodities* minerais necessariamente voltarão a ser fortemente demandadas e valorizadas, como tem ocorrido em diversos ciclos nos últimos anos. O país deverá, então, investir mais na busca da valorização de seu enorme potencial nessa área. Entretanto, algumas ações deverão ser implementadas, não apenas pelo poder público, mas pelas empresas de mineração e pela academia, como por exemplo:

- O Marco Regulatório, em tramitação no Congresso há cerca de três anos, mas sem qualquer discussão séria até agora, precisa ser amplamente discutido, com a participação de todos os envolvidos (sobretudo do meio empresarial) e não apenas dos congressistas e dos representantes do MME. É necessário corrigir regras e introduzir outras que estimulem as empresas a aplicar mais recursos na exploração mineral.
- O Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) necessita readquirir governança sobre os distritos, capacitar-se qualitativa e quantitativamente em pessoal técnico e tornar-se um órgão de fomento efetivo da produção mineral e não apenas fiscalizador e arrecadador.
- Recursos devem ser assegurados a fim de que o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e os serviços geológicos estaduais, passem urgentemente a in-

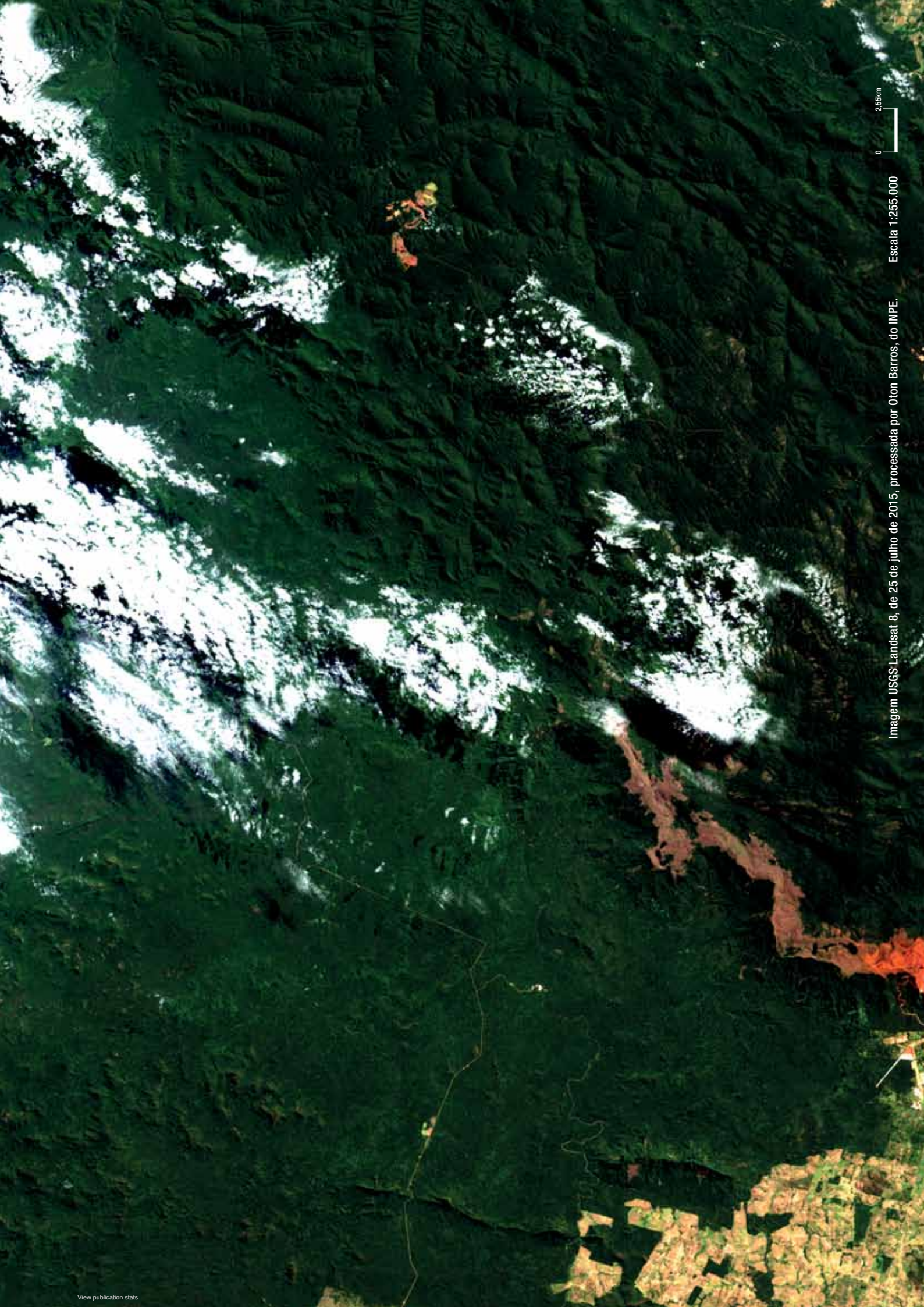
vestir em mapeamentos geológicos em escalas maiores (1:100.000 ou até maiores) e em levantamentos aerogeofísicos, dando foco para regiões com potencial para presença de minerais considerados estratégicos, tanto pela ausência de reservas importantes no país como pela necessidade da indústria mineral em termos mundiais.

- É necessário investir muito mais, por exemplo, na busca de bens minerais para o Setor Agropecuário. Não é possível que o país que mais produz carne e grãos no mundo, que são suportes para nossa economia, dependa da importação de nitrogênio, fosfato e potássio.
- A parceria das empresas de mineração e dos órgãos do governo com a Academia precisa ser estimulada por meio de ações efetivas, que devem incluir até mesmo contatos diretos do Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação (MCTI) e do Ministério das Minas e Energia (MME) com as empresas, no sentido de encontrar meios para eliminar desconfiças que muitas vezes partem de profissionais pouco informados atuando nas empresas e, por vezes, de acadêmicos insensíveis aos valores e necessidades empresariais.
- O **Setor Mineral** precisa ser incluído na relação dos itens de *Tecnologias Críticas ou Estratégicas*, da mesma forma como o **Setor Agropecuário** foi incluído no documento recentemente elaborado pelo MCTI (PROPOSTA DA ESTRATÉGIA NACIONAL DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO: 2016-2019). Isto porque todas as fases do desenvolvimento de projetos na Área Mineral que resultem em valor econômico requerem o desenvolvimento de modelos construídos em bases científicas sólidas e tecnologias inovadoras em todas as suas etapas, desde a exploração mineral (pesquisa de novos depósitos ou o aumento de reservas minerais já existentes), à lavra ou exploração (extração dos depósitos minerais econômicos) e ao beneficiamento (produção de concentrados para uso na indústria). Além, é claro, de inovações tecnológicas para geração de novos produtos minerais. Ver o caso recente da produção de didímio metálico a partir de minerais de terras raras, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT-SP) e pela Companhia Brasileira de Mineração e Metalurgia (CBMM).



Foto: Kaique Alves / Agência Vale





2,55km

Escala 1:255.000

Imagem USGS Landsat 8, de 25 de julho de 2015, processada por Otton Barros, do INPE.