

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 Anfilópio de Carvalho 29 3º 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)

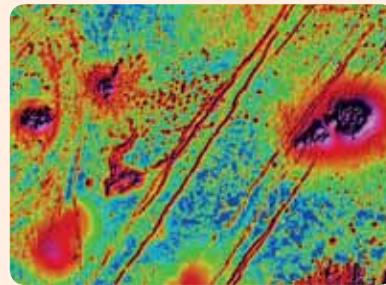
Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios /
Adolpho José Melfi, Aroldo Misi, Diogenes de Almeida Campos e
Umberto Giuseppe Cordani (organizadores). – Rio de Janeiro: Academia
Brasileira de Ciências, 2016.

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



I

Potencial Mineral do Brasil

Potencial Mineral do Brasil	18
Onílio 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 Khouri Rolim	
Ouro no Brasil: principais depósitos, produção e perspectivas	46
Lydia Maria Lobato / Marco Aurélio da Costa / Steffen G. Hagemann / Rodrigo Martins	
Níobio – 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 Cesar 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	
Zinc 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
Otavio 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 / Elves 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	

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 4 D 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 explotados. Comporta 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, budgeting*), 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 (BERTBERT, 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 ressalvando 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 Sêniors (*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, consequentemente, 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

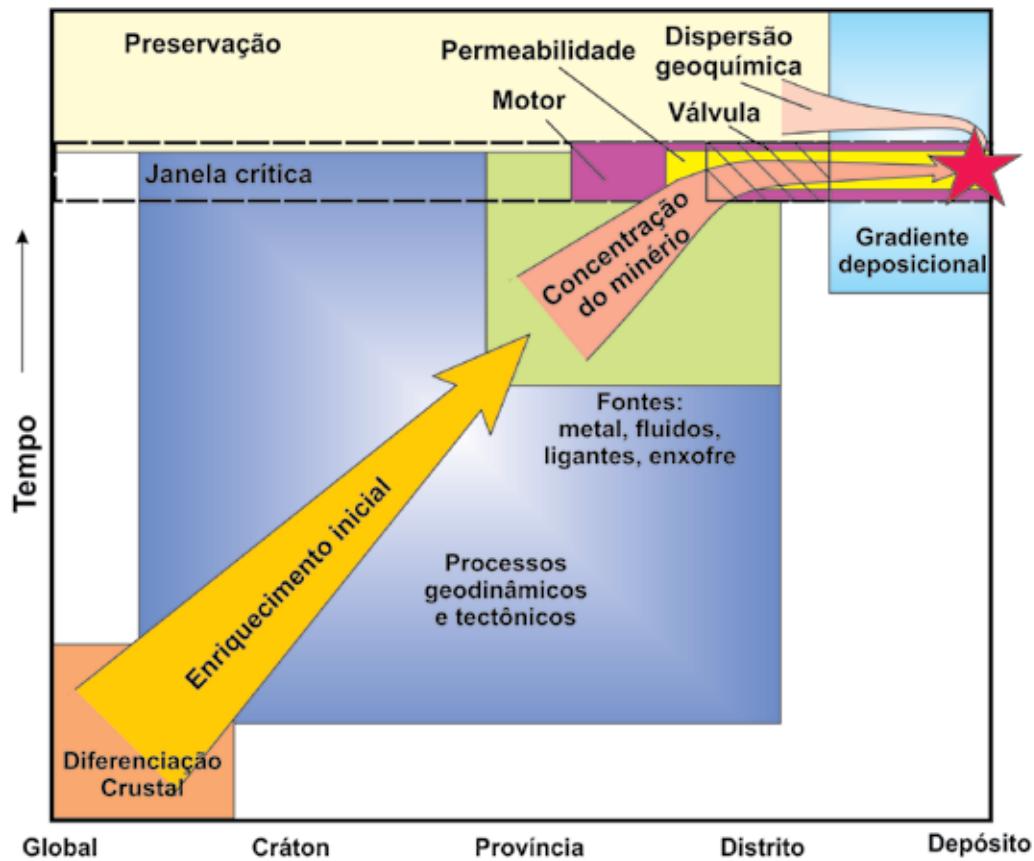


Figura 1 Conceito de Sistema Mineral e sua relação com as escalas temporal e espacial. Processos geodinâmicos concentram *commodities* em uma região fonte na escala regional e de distrito. Falhas e unidades estratigráficas permeáveis canalizam fluidos aos ambientes deposicionais onde gradientes químicos, físicos e termais 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).

integralmente 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-

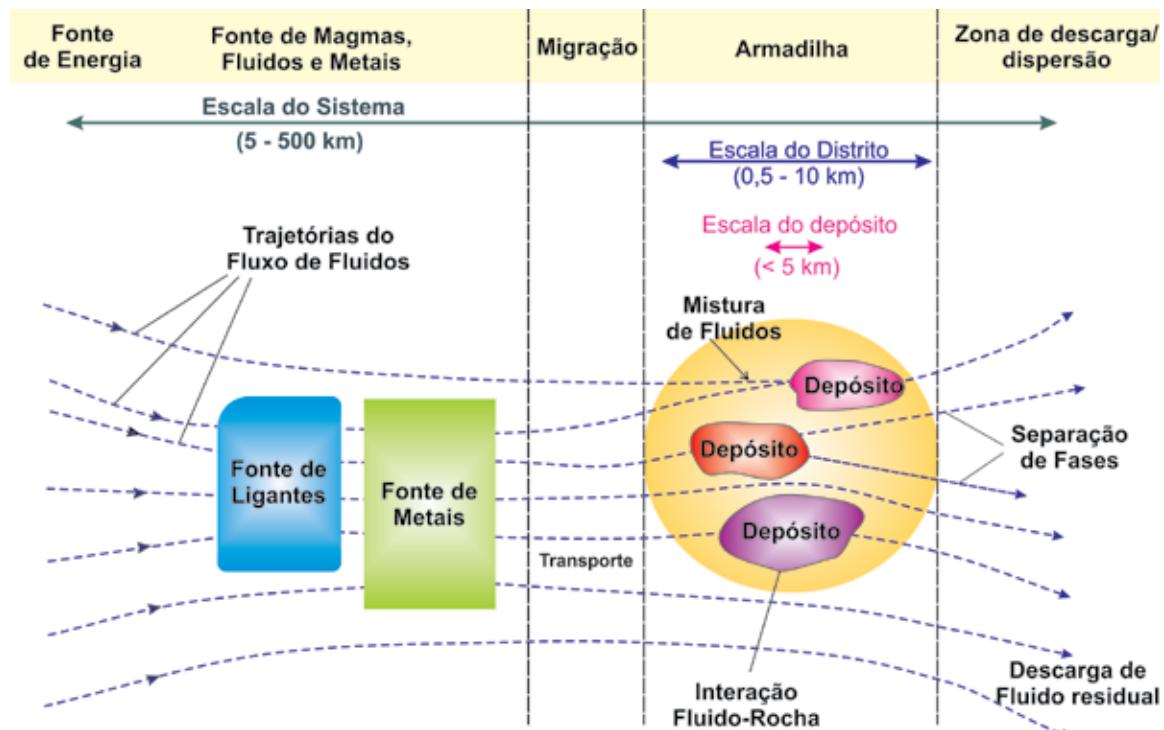


Figura 2 Modelo conceitual de Sistema Mineral e seus atributos críticos (Fonte: KNOX-ROBINSON; WYBORN, 1997).

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 crátions, 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 pôrfiro (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 Pojuca (JACOBI, 2004; VALE, 2004).

Nesse período houve incremento substancial da exploração mineral a partir de ações exploratórias governamentais (DNPM, CPRM, RADAM, PETRO-BRAS), 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 magnéticas 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 Desenvolvimentos 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 PACT, 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 radioisotópicos e estáveis, às inclusões fluidas, análises microanalíticas, litogeocronologia, 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 sofáveis 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 si*, 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. 1885.
- 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. (Ed.). *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*, 2^a. 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, JR.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.; WALSH, J.L. Mineral systems of Australia: an overview of resources, settings and processes. *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 49, p. 623-660. 2002.
- JÉBRAK, 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 Willemitic
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 Economic, 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:
DOGGETT, 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/novoboomdaexploracao.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.