

aproxima da costa, local ideal para instalação do cais para atracação de navios de até 280.000t. Em frente à ponta da Madeira, a baía de São Marcos apresenta seção de cerca de 14km de largura, que vai se alargando rapidamente até atingir a linha da costa com 40km, formando uma ampla bacia para manobras. O cais está protegido das ondas predominantes de Nordeste por uma ilha e pela configuração da costa. O afunilamento da bacia causa marés altas. De 3,5 metros na costa, atingem 7 metros no interior da bacia, formando correntes de até 5 nós.

Devido à sua grande extensão, circulam nesta baía grandes massas d'água formando canais profundos em toda a extensão da baía de São Marcos. A estabilidade destes canais foi comprovada comparando-se cartas náuticas de diferentes épocas. Existe amplo espaço para espera de navios. Estudos batimétricos mostraram que, sem dragagem, o canal de acesso permitirá o tráfego simultâneo, em duas direções, de navios de até 280.000t. A visibilidade é boa e os nevoeiros são raros.

O descarregamento do minério será por meio de dois viradores de vagões do tipo rotativo, cada qual projetado para descarregar dois vagões simultaneamente. Os pátios de estocagem do porto terão capacidade para 3.6 milhões/t, havendo amplo espaço para expansão. O granulado pode passar por uma planta de reapeamento para eliminação dos finos gerados durante o manuseio. A capacidade de embarque dos navios será de 16.000 t/hora, usando duas recuperadoras de roda de caçambas, ambas com capacidade nominal de 8.000 t/hora, e um carregador de navios.

Entretanto, além da linha da costa, em frente à baía de São Marcos, observa-se a formação de bancos de areia margeando o canal de acesso. Por esta razão, torna-se necessário o balizamento deste canal a uma profundidade mínima de 23 metros, 100km fora de ponta da Madeira. Serão construídos dois faróis com alcance de 28km nos recifes fora da costa e, deste modo, os navios alcançarão a entrada do canal amarrados a posições de terra.

O cais receberá navios de 20.000 a 280.000 toneladas. Para uma exportação de 35 milhões de toneladas anuais, o espaço necessário é de somente um navio por vez, mas a distância entre os enrocamentos de proteção do cais permitem a instalação futura de um segundo berço de atracação.

## BIBLIOGRAFIA

- BARBOSA, O; ANDRADE RAMOS, J.R. de; ANDRADE GOMES, F. de e HELMBOLD, R - 1966 - *Geologia estratigráfica, estrutural e econômica da área do "Projeto Araguaia"*. MME-DNPM-DGM. Mon. 19. Rio de Janeiro. 94 pp.
- BEISIEGEL, V.R.; BERNARDELLI, A.L.; DRUMOND, N.F.; RUFF, A.W. e TREMAINE, J.W. - 1973 - *Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás*. Rev. Bras. Geoc. 3(4): 215-242.
- BERNARDELLI, A.L. - 1977 - *Relatório de pesquisa Projeto Azul minério de manganês*. Relatório Final de Pesquisa AMZA-DNPM. Belém 5 v.
- CVRD/AMZA - 1981 - *Amazônia Oriental; Plano preliminar de desenvolvimento*. Rio de Janeiro. 2 v.
- CVRD-COPAN - 1980 - *Corredor de Carajás; Projetos potenciais*. Rio de Janeiro. 2 v.
- FARIAS, N.F. et alii - 1981 - *Relatório de pesquisa do Projeto Cobre-Carajás; Jazidas Salobo 3A e 4A*. Relatório final de pesquisa DOCEGEO-DNPM. Belém. 4 v.
- IDESP - 1972 - *Projeto Rio Fresco; Contribuição à geologia do Pré-Cambriano da Amazônia*. XXVI Congr. Bras. Geol. Res. Com. Simpósios. Bol. nº 2. Belém pp. 73-75.

JAMES, H.L. -  
of iron for  
235-293.

DOC. 261

LINDENMAYER, Z.G. - 1981 - *Aspectos geológicos da província mineral de Carajás*. Rio de Janeiro, 12 pp. (rel. int. Docegeo).

OLIVEIRA, A.I. e LEONARDOS, O.H. - 1943 - *Geologia do Brasil*. Serv. de inf. agrícola, R.J. 813 pp.

REZENDE, N.P. de e BARBOSA, A.L. de M. - 1972 - *Relatório de pesquisa de minério de ferro, Distrito Ferífero da Serra dos Carajás* - Estado do Pará. Relatório final de pesquisa AMZA-DNPM. Brasil. 5 v.

SANTOS, B.A. dos - 1980 - *Geologia e potencial mineral da região dos Carajás*. Simpósio sobre a província mineral da Serra dos Carajás. Rio de Janeiro, 46 pp.

SILVA, G.G. da; LIMA, M.I.C. de; ANDRADE, A.R.F. de; ISSLER, R.S. e GUIMARAES, G. - 1974 - *Projeto Radam, Geologia das folhas SB-22 Araguaia e parte de SC-22 Tocantins*. MME. DNPM. v. 4. Geologia pp. 1-143.

SUDAM - 1972 - *Pesquisa mineral no Tapajós/Jamanxim*; Relatório preliminar. Belém 161 pp.

VIVACQUA, P.A. - 1980 - *Projeto de minério de ferro de Carajás - breve descrição*. Simpósio sobre a província mineral da Serra dos Carajás. Rio de Janeiro. 6 pp.

1501961

Basei, M. ✓

Metodologia

KAWASHITA, K. ✓

# Novos Rumos em Geocronologia

O termo geocronologia foi aplicado pela primeira vez em 1893 por Williams para englobar todas as investigações nas quais a escala do tempo, em termos de anos se aplicaria à evolução da Terra e de todas as suas formas de vida. Mas recentemente, em 1955, Swiley redefiniu-a como uma ciência que engloba todos os métodos científicos que servem para fixar, em termos temporais todos os eventos da história da Terra.

A descoberta da radioatividade por H. Becquerel em 1896 traria um grande impulso à geocronologia. Este fenômeno, que constitui-se na desintegração de um radionúclídeo e sua transformação em um nuclídeo estável, e se processa com uma velocidade constante, é imutável por quaisquer dos processos físicos ou químicos conhecidos em laboratório.

O constante aumento do nuclídeo transmutado serve de chave para a determinação do tempo (idade) transcorrido desde o fechamento do sistema, que pode coincidir com um fenômeno geológico, cujo posicionamento no tempo pode ser de interesse prático ou científico.

A liberação de isótopos enriquecidos por meio de Calitrom (Califórnia Cicloton), logo após a 2ª guerra mundial, trouxe uma grande revolução na geocronologia. A utilização destes isótopos enriquecidos como traçadores (Spikes) permitiu determinar com grande precisão quantidades tão pequenas (concentração em ppb) de nuclídeos radiogênicos que diversos sistemas isotópicos, antes considerados promissores para medidas de tempo, passaram a se tornar viáveis. Na tabela 1 estão apresentados

os radionuclídeos mais utilizados em geocronologia com seus respectivos tipos de decaimento, abundância relativa, produto final e meia vida.

A utilização de espectrômetros acoplados (*on line*) com computadores constitui o último fator responsável pelo desenvolvimento da geocronologia. Como um dos pioneiros da aplicação de computadores em espectrometria pode-se destacar o grupo de G. Wassenburg, do Cal. Institute of Technology Pasadena, California-USA. Razões isotópicas, antes medidas convencionalmente mediante a utilização de registradores, propiciando precisão da ordem de 0,2%, passaram a ser medidas com precisão da ordem 1 para 10<sup>4</sup> ou melhor. Métodos antes tidos como inviáveis estão passando a ser utilizados de forma rotineira. Soluções com concentrações às vezes abaixo de 1 ppm são manipuladas em laboratórios super-limpas e medidas com precisão jamais esperada antes da era da computação. Estudos de meteoritos e de rochas lunares, que requerem análises de extrema precisão, concorreram também, se dúvida, para o aprimoramento e aplicação dos métodos geocronológicos.

A geocronologia está arraigada em todos os países do mundo. Nos Estados Unidos existem atualmente mais de 50 laboratórios, com média de um por estado, enquanto que na Europa são encontrados vários em praticamente todos os países. As idades radiométricas constituem uma ferramenta moderna, para as ciências geológicas, fornecendo não somente a datação dos eventos, como também importantes inferências de cunho petrogenético.

#### A PESQUISA GEOCRONOLÓGICA NA AMÉRICA DO SUL

No Brasil, as primeiras determinações de idade que utilizaram os princípios da radioatividade foram realizadas por D. Guimarães e W. Florêncio na década de 40, cujas análises, efetuadas pelo método U-Pb químico, concentraram-se em minerais de pegmatitos ricos em urânio. Entretanto as pesquisas geocronológicas somente tomaram corpo em 1964, com a criação do Centro de Pesquisas Geocronológicas - CPGeo - na Universidade de São Paulo - que começou operando com o método K-Ar. Atualmente dispõe o CPGeo de dois espectrômetros de massa, um deles marca Nuclide, tipo Reynolds, para análises do argônio, e outro marca Varian, tipo MAT-TH5, com um computador acoplado HP 9825 B, para medidas isotópicas Rb-Sr.

TABELA 1

#### PRINCIPAIS RADIONUCLÍDEOS UTILIZADOS EM GEOCRONOLOGIA

	Abundância %	Tipo de Decaimento	Nuclídeo Radiogênico	Meia Vida (10 <sup>9</sup> anos)
K <sup>40</sup>	0,01167	cap. Ke β <sup>-</sup>	Ar <sup>40</sup> e Ca <sup>40</sup>	1,39
Rb <sup>87</sup>	27,85	β <sup>-</sup>	Sr <sup>87</sup>	48,8
U <sup>235</sup>	0,72	7α + 4 β <sup>-</sup>	Pb <sup>207</sup>	0,71
U <sup>238</sup>	99,27	8α + 6 β <sup>-</sup>	Pb <sup>206</sup>	4,5
Th <sup>232</sup>	100,0	6α + 4 β <sup>-</sup>	Pb <sup>208</sup>	13,9
Sm <sup>147</sup>	15,09	α	Nd <sup>143</sup>	106
Re <sup>187</sup>	62,93	β <sup>-</sup>	Os <sup>187</sup>	43
U <sup>238</sup>	99,27	fissão espontânea	Traços de fissão	~10 <sup>7</sup>
Lu <sup>176</sup>	2,6	β <sup>-</sup>	Hf <sup>176</sup>	35

Nos demais países da América do Sul conta-se operando em rotina, desde 1971, somente o laboratório do Instituto de Geocronologia e Geologia Isotópica (INGEIS) de Buenos Aires, que também efetua análises Rb-Sr e K-Ar, contando para tal com dois espectrômetros Nuclide (um tipo Reynolds, para gases, e outro de fonte sólida) e um terceiro MM30 automático da Micromass. Em instalação existem dois outros laboratórios, um deles em Santiago do Chile, sob a coordenação do Instituto de Investigações Geológicas e outro em Caracas, na Venezuela no Departamento de Geologia de Ministério de Minas e Energia.

Ainda no Brasil, em Belém do Pará, junto ao núcleo de Ciências Geológicas e Geofísicas, está em adiantado estado de instalação outro laboratório de geocronologia, que dispõe de um moderno espectrômetro de massa, o Isomass 54 E com computador acoplado tipo HP 9845B. Essa aparelhagem, de grande resolução, poderá possibilitar a instalação de novos métodos, tais como U-Pb, Sm-Nd e Lu-Hf que, como será visto mais adiante, possuem alto valor interpretativo.

#### OS MÉTODOS K-Ar e Rb-Sr

Dispõe-se atualmente para o Brasil de cerca de 8-9.000 análises radiométricas por esses dois métodos, quase todas obtidas no CPGeo, ou por alguns laboratórios estrangeiros em pesquisas de colaboração científica. Esse número razoável de idades permitiu a caracterização dos principais eventos tectonomagmáticos do território brasileiro, bem como as suas áreas de ocorrência. Nesses estudos, deve ser levado em conta que os métodos utilizados fornecem informações diferentes, que se complementam, oferecendo ao geólogo uma ferramenta importante e de alto valor interpretativo

para os modelos de evolução geotectônica regional.

O método K-Ar fornece em geral a idade do resfriamento em relação ao último evento térmico importante que afetou uma determinada região, enquanto que as isócronas Rb-Sr em rocha total indicam muitas vezes a época de formação das próprias rochas regionais. Através da combinação desses métodos pode-se saber se uma região foi afetada ou não por mais de um evento térmico. Valores K-Ar em rochas metamórficas precambrianas, sistematicamente 100 a 200 milhões de anos mais jovens do que as isócronas Rb-Sr obtidas no mesmo material, indicam o resfriamento regional do ciclo formador dessas rochas, definido pela idade isocrônica. Nos casos em que essa diferença é maior, caracteriza-se a atuação de novo episódio tectonomagmático, superimposto.

Exemplos da aplicação desses métodos em áreas brasileiras são vários, dentre eles podem ser destacados os resultados obtidos por Cordani et al, 1973 para os gnaisses do Grupo Paraíba, onde foi obtida a idade de 2.000 milhões de anos em rocha total pelo método Rb-Sr, e valores entre 500 e 600 milhões de anos para biotitas e anfíbios pelo método K-Ar, evidenciando a atuação do Ciclo Brasileiro em rochas formadas no episódio Transamazônico. Outro exemplo importante é o da região amazônica, foi possível caracterizar-se em nível de reconhecimento quatro grandes unidades geotectônicas: Cinturões Móveis Maroni - Itacaiunas, Juruena - Rio Negro e Rondoniano e Província Amazônia Central. Nessas áreas, as épocas principais dos eventos-tectonomagmáticos foram definidas por isócronas Rb-Sr, indicando os resultados K-Ar o resfriamento desses eventos. Esse estudo foi apresentado por Cordani et al 1979, onde é discutida a significação e a caracterização geológica das províncias radiométricas da Amazônia.

Pelo exposto, verifica-se que esses dois métodos, quando empregados em estudos regionais, e em escala de reconhecimento, fornecem resultados de grande significação geológica. Entretanto dentro do quadro atual do conhecimento da geologia brasileira, numa visão em maior detalhe, em situações geológicas melhor conhecidas, em que a sequência de eventos geológicos pode trazer importantes contribuições adicionais, são inúmeros os problemas geocronológicos ainda pendentes, em grande parte em função da própria limitação interpretativa dos métodos K-Ar e Rb-Sr. Um bom exemplo é aquele relativo aos grandes complexos básico-ultrabásicos de Goiás. Nessas rochas, em que o método Rb-Sr mostra-se inviável, nas condições atuais de precisão analítica, inúmeras datações foram efetuadas pelo método K-Ar (Matsui et al, 76 e Girardi et al, 78) sem porém conseguir definir a época da formação desses maciços, ficando claro que o problema transcende à resolução do método.

O aumento na sensibilidade das medidas, nos últimos anos, provocado com a operação de espectrômetros de massa acoplados a computadores, permitiu um avanço significativo da potencialidade do método Rb-Sr. Atualmente pode-se aplicar essa metodologia ao estudo de rochas pobres em potássio, onde os baixos teores de Rb limitavam sua utilização. Esse aprimoramento na qualidade dos resultados permitiu também o estudo sistemático das razões isotópicas "iniciais" do Sr, que, como será visto a seguir, abriu novos horizontes com sua aplicação direta em interpretações genéticas, funcionando como traçador dos processos maiores modificadores da crosta.

A razão  $Sr^{87}/Sr^{86}$  é um indicador importante para a área fonte do material analisado. Utilizando-se essa razão pode-se precisar, por exemplo, se uma rocha magmática qualquer teria sua origem relacionada com processos de diferenciação de material do manto, ou então com processos de fusão de rochas crustais anteriores. Essa afirmação é melhor compreendida com o auxílio da figura 1, onde está representada a curva da evolução da razão  $Sr^{87}/Sr^{86}$  no manto em função do tempo. Desta forma, rochas cujas razões situam-se sobre ou próximas a ela (reta A) teriam como origem materiais diretamente diferenciados do manto. Rochas com altos valores para a razão inicial, acima de 0,710 (reta B) possuiriam evolução mais complexa, interpretados como produto de fu-

são de material crustal, que por sua vez ter-se-ia diferenciado do manto em épocas anteriores. Os granitos estaníferos de Rondônia, com valores próximos a 0,727, são bons exemplos desse último caso.

Conforme foi verificado, na figura 1 os isótopos de Sr podem ser utilizados como indicadores de processos de diferenciação do manto. Um exemplo clássico é o estudo dos basaltos modernos das ilhas oceânicas, do assoalho e das dorsais médio-oceânicas. Os valores das razões  $Sr^{87}/Sr^{86}$  nestes casos, mostraram-se diferentes entre si, com os basaltos dos dorsais indicando razões sensivelmente inferiores às demais, caracterizando desta maneira áreas do manto com comportamento geoquímico diferente. As análises sistemáticas dessas razões isotópicas permitiram identificar certas variações sistemáticas, que posteriormente foram confirmadas por outros métodos.

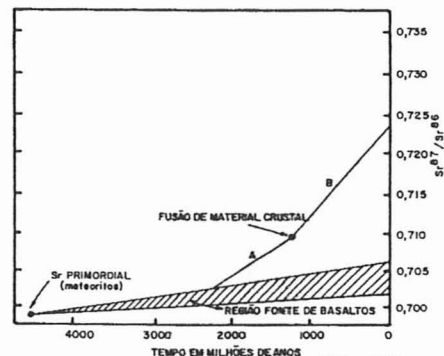


Fig. 1 - Evolução da razão  $Sr^{87}/Sr^{86}$  em função do tempo para o manto e materiais crustais (retas A e B).

### OUTROS MÉTODOS DE DATAÇÃO

Recentemente, a própria limitação interpretativa dos métodos K-Ar e Rb-Sr, rotineiramente utilizados no Brasil, em programas de reconhecimento das províncias geocronológicas maiores, somada à crescente complexidade dos problemas geológicos a serem estudados, estão a exigir a implantação de novas metodologias geocronológicas, mais sofisticadas, e capazes de fornecer informações decisivas na resolução de problemas específicos. Dentre os métodos mais promissores destacam-se o U-Pb, Pb-Pb, Sm-Nd e Lu-Hf, que serão discutidos a seguir.

### OS MÉTODOS DE CHUMBO

A aplicação de resultados U-Pb, Th, Pb e Pb-Pb, no estudo de problemas geológicos nos últimos 20-25 anos, demonstrou o grande potencial interpretativo desses métodos (Allegre, 67; Black et al, 71; Moorbath et al, 75 e Moorbath, em impressão). Apesar de seu desenvolvi-

mento inicial relativamente antigo, a otimização desses métodos radiométricos só recentemente foi conseguida. O avanço foi possível em função do aumento da capacidade analítica dos laboratórios, os quais, operando em condições de alta limpeza (*clean laboratories*), conseguem análises precisas em amostras com até algumas partes por milhão desses elementos.

Poucas são as análises efetuadas com isócronas U-Pb, em função da alta mobilidade química do U, em ambientes oxidantes. Isócronas Th-Pb também não são de uso corrente, apesar do Th apresentar menos mobilidade do que o U. Por outro lado, recentes estudos demonstraram que em alterações atuais (recentes), os teores desses elementos praticamente não interferem na composição isotópica do Pb, permitindo a confecção de isócronas Pb-Pb. Estudo comparativo das possibilidades interpretativas desses três métodos foi efetuado por Rosholt et al 1973 em rochas graníticas do Wyoming nos Estados Unidos. Seus resultados demonstraram que houve sensível alteração nas concentrações de U, Th e Pb com perdas de até 88% do urânio, entretanto foi possível o traçado de uma isócrona Pb-Pb em rocha total, com idade de 2.79 bilhões de anos, o que reflete a estabilidade dos isótopos de Pb. (figura 2).

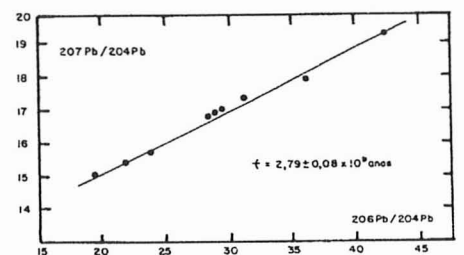


Fig. 2 - Isócrona Pb - Pb em rocha total para as rochas graníticas das montanhas graníticas, Wyoming, U.S.A. (Rosholt et al, 1973 - in Faure, G. 1977).

A metodologia Pb-Pb tem recebido grande impulso e deverá conhecer um desenvolvimento nos anos que se seguirão, visto que necessita para sua aplicação somente do conhecimento das relações isotópicas  $Pb^{207}/Pb^{209}$  e  $Pb^{206}/Pb^{204}$ . Inúmeras aplicações desses isótopos na resolução de problemas geológicos demonstraram a eficácia desse método. Um bom exemplo foi apresentado por Moorbath et al (1969), onde através de uma sócrona Pb-Pb em rocha total foi obtida, para os gnaisse de Lewisian na Escócia, uma idade de  $2,86 \pm 0,2$  bilhões de anos (figura 3). Nesse caso, ao contrário da constatação de Rosholt et al (op. cit.) os pontos se

situam abaixo da curva de evolução do chumbo ( $\mu = 8,68$ ), sendo sugestivo de que o sistema permaneceu fechado isotopicamente após a incorporação dessas rochas na crosta.

A concordância verificada em muitos casos entre as idades obtidas pelas isócronas Rb-Sr e Pb-Pb em rocha total, demonstra que esses métodos possuem valor interpretativo similar, indicando em geral a época da diferenciação geoquímica-metamórfica dos complexos graníticos. Quando essa diferenciação ocorre certo tempo após a época da acreção desse material à crosta a partir do manto, a datação Pb-Pb poderá apresentar problemas, sendo possível a obtenção de isócronas desvinculadas da idade do evento. Nesses casos, a comparação entre métodos diferentes evidencia a existência de problemas desse tipo.

Os estudos com isótopos de Pb estão voltados não só para aspectos geocronológicos mas também são utilizados para a caracterização de processos de evolução crustal. Ao contrário com o que ocorre no caso da razão Rb-Sr, a relação U-Pb mostra um empobrecimento muito grande na crosta continental inferior, em relação ao manto superior. Tal comportamento, evidenciado pelas relações isotópicas Pb-Pb permite caracterizar se o material é de origem juvenil, incorporado à crosta no evento estudado, ou se é produto de retrabalhamento de rochas crustais pré-existentes.

Como já foi discutido, análises pelo método U-Pb não são exequíveis em rocha total em função da alta mobilidade do urânio, e devem ser portanto utilizadas fases minerais de maior resistência às alterações, como por exemplo monazita, esfeno, apatita, xenotímio e zircão. Este último é sem dúvida alguma o mais requisitado, exatamente por apresentar-se como mineral acessório na grande maioria das rochas, e ser bastante refratário a processos de alteração intempérica.

O avanço mais significativo nesse método foi a possibilidade de se utilizar quantidades mínimas de zircão para a realização de uma datação. Valores da ordem de 3 miligramas desse mineral são suficientes para análises precisas, não só das relações isotópicas como também dos teores de U e Pb. Atualmente efetua-se até mesmo datações em monocristais (Lancelot et al 76 e Briqueu et al 80), e em casos mais extremos pode-se analisar o núcleo de um cristal isolado, que pode corresponder a um zircão reliquiar, bem como a sua parte externa, que pode corresponder a uma recristalização, num evento superimposto.

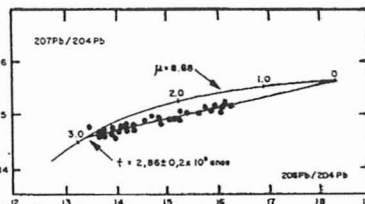


Fig. 3 - Distribuição dos pontos analíticos das diferentes razões isotópicas de chumbo em relação à curva de crescimento  $\mu = 8,68$  para embasamento Lewisiano no noroeste da Escócia. (Moorbath et al, 1969).

Os resultados obtidos, interpretados em diagramas Concordia (Wetherill 1956), fornecem para rochas ígneas e metamórficas a época da cristalização do mineral, correspondendo à colocação em níveis crustais superiores dos corpos ígneos, e à diferenciação metamórfica no segundo caso. Na hipótese das rochas terem sofrido um novo metamorfismo, distanciado no tempo dos fenômenos acima discutidos, o método U-Pb em zircões permite demontar as épocas de ambos os episódios principais, sendo as idades fornecidas pelos interceptos da reta Discordia com a curva Concordia. Um exemplo desse tipo de interpretação pode ser observado na figura 4, apresentado por Briqueu et al (op. cit.) onde para os migmatitos da formação Khan (Namíbia) foram obtidas duas idades de 2000 e 510 milhões de anos. A mais antiga é interpretada como a idade da rocha que forneceu os zircões detriticos datados, por conseguinte a idade da área fonte, e a mais jovem como sendo a época da migmatização.

A geocronologia U-Pb está cada vez mais sendo aplicada aos estudos de jazidas de U, fornecendo informações sobre a gênese do depósito, sobre a época da mineralização e a ocorrência ou não de remobilizações do U por processos de alteração. Nesse último caso pode ser traçado o esquema da evolução das sucessivas fases de mobilização e reconcentração desse elemento. Estudos paralelos da tipologia de diferentes populações de zircões complementam os trabalhos geocronológicos, fornecendo dados sobre a geotermometria e petrogênese das rochas analisadas.

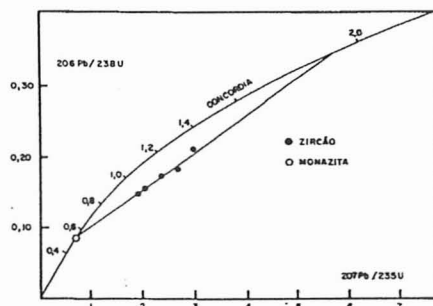


Fig. 4 - Modelo de perda episódica aplicado para os zircões detriticos da formação Khan (Briqueu et al, 1980).

## OS MÉTODOS SAMÁRIO-NEODÍMIO E LUTÉCIO-HAFNIO

Esses métodos tiveram seu desenvolvimento ligado às atividades intensas de pesquisa com rochas lunares e meteoritos. Por serem de aplicação muito recente, poucos são os laboratórios no mundo em condições de realizar essas análises em rotina. A aplicação dessas técnicas em rochas terrestres mostrou-se tão frutífera, que atualmente inúmeros laboratórios estão se preparando para aplicá-las, sendo esperado para os próximos anos um volume significativo de novas informações.

O conhecimento atual do método Sm-Nd é bem superior ao do Lu-Hf, entretanto como o comportamento deles é bem parecido ambos podem ser utilizados no mesmo campo de pesquisa. Esses elementos possuem uma baixa mobilidade química quando comparados aos demais, principalmente aos alcalinos. Isso os torna especialmente interessantes, havendo estudos que demonstraram que mesmo quando a rocha se encontra sensivelmente alterada e/ou metamorfozada, esses fatores não interferem na relação Sm/Nd, permitindo a aplicação desse método ao mesmo tempo que a utilização dos demais é muito limitada.

As análises Sm-Nd são efetuadas preferencialmente em rocha total sendo os resultados analíticos interpretados segundo diagramas isocronicos semelhantes aos utilizados para o método Rb-Sr. São também utilizáveis grande parte dos minerais formadores de rocha e mesmo dentre esses aqueles que dificilmente são empregados em outras metodologias, como clino e ortopiroxênios, granadas, olivinas e plagioclásios.

As idades Sm-Nd podem ser obtidas em qualquer tipo de rocha, desde graníticas até ultrabásicas. Nesse aspecto, o método vem preencher uma lacuna até agora existente, em função da dificuldade dos métodos mais tradicionais em estudar rochas básico-ultrabásicas. Esse fato abre grandes perspectivas da aplicação desse método no estudo de *greenstone belts*, onde as idades obtidas até o presente, em tais casos, refletiram a época real da colocação do material vulcânico. Um bom exemplo dessa aplicação foi apresentado por Hamilton et al (1977), que estudaram o *greenstone* de Bulawayan, na Rodésia. Tratam-se de rochas metavulcânicas que repousam sobre uma seqüência metasedimentar, e ambas sobre o tonalito Mashaba (2,97 b.a.), sendo cortados pelo Grande Dique (2,51 b.a.). Os mencionados autores obtiveram uma idade isocronica Sm/Nd de

2,64 b.a., utilizando-se de amostras de komatiitos peridotíticos e basálticos, andesitos basálticos e outras litologias da mesma seqüência. As mesmas amostras, devido ao grau de alteração e/ou de metamorfismo, foram rejeitadas nos estudos efetuados pelo método Rb-Sr. A idade obtida está em total acordo com a situação geológica e com o intervalo de idade indiretamente definido por outros métodos.

A conclusão atual a respeito das determinações Sm-Nd é de que estas idades normalmente fornecem a época da diferenciação do material original, no sentido manto-crosta. Um dos melhores exemplos dessa interpretação, dos vários já conhecidos, é o estudo em rochas gnáissico-granulíticas (Lewisian) do noroeste da Escócia já comentadas por ocasião do item relativo ao método Pb-Pb. Análises efetuadas através dos métodos U-Pb, Pb-Pb e Rb-Sr mostraram que a época do metamorfismo foi próxima à 2,7 b.a. A isócrona Sm-Nd em rocha total destas rochas forneceu uma idade de 2,92 bilhões de anos conforme verificado na figura 5. Esse último valor é interpretado por Hamilton et al (1979) como sendo a época da acreção desse material à crosta que ter-se-ia dado cerca de 220 milhões de anos antes da diferenciação metamórfica principal.

Até o presente, os resultados Sm-Nd tem sido empregados principalmente nos problemas da crosta continental arqueana, datando às épocas da derivação desse material do manto superior. Hawkesworth et al, em trabalho recente, aplicaram esse método ao estudo da evolução do conturão Damariano na Namíbia, de idade panafricana (800 a 400 milhões de anos). Foram analisados xistos, anfíbolitos, diabásios, dioritos e rochas granitoides ácidas como os granitos alaskíticos de Valencia e Rossing. A datação dos nifeis anfíbolitos de origem ígnea caracterizou o episódio vulcânico, fornecendo uma idade aproximada para a época da sedimentação do material que deu origem ao xistos regionais, dos quais anteriormente conhecia-se somente a idade do metamorfismo. Foi demonstrado também que as rochas panafricanas da Namíbia tiveram sua origem, em parte, diretamente do manto superior, e que em outros (casos por exemplo os granitos alaskíticos) são produtos da fusão de material crustal cuja idade inicial é mais antiga, próxima a 2.000 milhões de anos.

O método Lutécio-Hafnio está ainda em estágio inicial de pesquisa, com os

estudos concentrados em rochas extraterrestres. A principal limitação para a aplicação desse método é a dosagem precisa do hafnio. Várias fases minerais ricas em lutécio podem ser utilizadas, como por exemplo apatita, granada e monazita. O zircão, apesar de teor elevado em lutécio, não é um sistema favorável em função do alto conteúdo em hafnio.

Recentes pesquisas de Patchett e Tatsumoto (1980b) demonstraram a aplicabilidade desses isótopos no estudo de certos tipos de meteorito. Foram analisadas inúmeras amostras em rocha total sendo os valores interpretados segundo diagrama isocrônico — similar aos adotados para os métodos Rb-Sr ou Sm-Nd. A idade de 4,5 bilhões de anos é a mesma obtida por outros métodos, o que atesta a possibilidade de aplicação

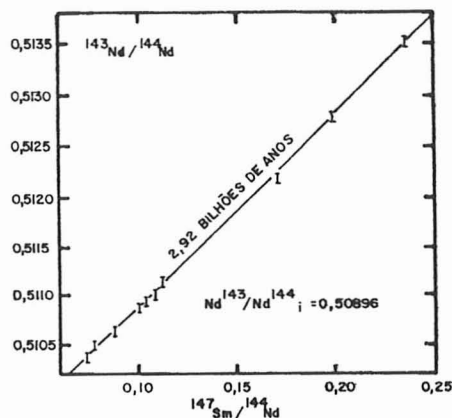


Fig. 5 - Diagrama isocrônico Sm/Nd para os gnaiesses Lewisian (NW - Escócia). (Hamilton et al, 1979).

da nova metodologia, em materiais rochosos, e a razão inicial  $Hf^{176}/Hf^{177}$ , de  $0,27973 \pm 0,00012$ , é atribuída por analogia a estudos semelhantes efetuados com isótopos de Sr e Nd ao valor da composição isotópica inicial do Hf para os planetas do sistema solar.

Considerando-se que o método Lu-Hf deverá ter um desenvolvimento semelhante ao Sm-Nd, a sua aplicação sistemática em rochas terrestres é apenas uma questão de tempo. Os isótopos de hafnio, de maneira semelhante aos de Nd e Sr, deverão revelar-se bons indicadores de processos de diferenciação da crosta e do manto superior.

#### OS ISÓTOPOS DE Nd E Hf COMO INDICADORES GENÉTICOS

Os isótopos de Nd e Hf permitem, de maneira análoga aos de Sr, a aquisição de informações importantes para a compreensão dos processos envolvidos na evolução química da crosta e do manto superior (litosfera). Nesse sentido a po-

tencialidade de tais isótopos parece inclusive ser maior do que a do próprio Sr.

Os estudos comparativos entre esses elementos no manto superior mostram uma correlação positiva entre as relações  $Nd^{143}/Nd^{144}$  e  $Hf^{176}/Hf^{177}$  e negativa entre essas duas e a razão  $Sr^{87}/Sr^{86}$ . Tal fato é explicado pela transferência muito maior para a crosta do elemento Rb em relação ao Sm e Lu. Essa última afirmação é visualizada na figura 6, onde

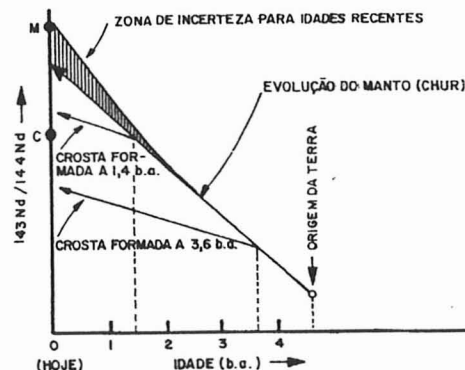


Fig. 6 - Modelo da evolução isotópica do Nd para a crosta e o manto. Valores médios para a crosta (C) e para a cadeia meso-oceânica (M). (De Paolo, 1981).

verifica-se que a linha de evolução da razão  $Nd^{143}/Nd^{144}$  do manto é, de modo contrário ao gráfico  $Sr^{87}/Sr^{86}$  da figura 1, superior a observada para rochas crustais dele derivadas em diferentes épocas (por exemplo 3,6 e 1,4 milhões de anos). Esse modelo explica a formação da crosta por um processo de extração de material geoquimicamente fracionado, a partir do manto superior, provocando um aumento contínuo da razão Sm/Nd, no manto.

Recentes pesquisas desenvolvidas com os isótopos de ND confirmaram a existência de heterogeneidades do manto mostrando, através da relação  $\epsilon Nd$ , que as fontes dos basaltos modernos diferiam isotopicamente entre si. Essa relação, definida como

$$\epsilon Nd = \left( \frac{Nd^{143}/Nd^{144} \text{ inicial da amostra}}{Nd^{143}/Nd^{144} \text{ do meteorito Juvinas}} - 1 \right) \times 10^4$$

(Basu e Tatsumoto 1980) torna-se um parâmetro indicativo do grau de fracionamento desses materiais. Baseados nessa relação foi possível confirmar estudos anteriores realizados com isótopos de Sr, ficando caracterizadas diferenças de até 10% entre basaltos das cadeias meso-oceânicas e continentais, com valores intermediários, para aqueles provenientes de arcos magmáticos e ilhas oceânicas intraplacas (De Paolo 1981). Esses

valores estão representados na figura 7. Nesse campo de estudo o problema atual é a definição das formas e das causas dessas heterogeneidades, uma vez que sua comprovação é inequívoca.

Os isótopos de Hf estão sendo utilizados dentro da mesma linha de pesquisa dos elementos já discutidos. Entretanto por concentrar-se preferencialmente ao Lu, Sm, Nd, Sr e Rb nas fases líquidas mais silicáticas o Hf poderá ser aplicado ao estudo de zonas do manto residuais, empobrecidas (*depleted mantle*) por processos de fusão parcial durante o tempo geológico. Esse é o caso das regiões de dorsais oceânicas, onde a aplicação desses isótopos poderá contribuir para a história da geração dos magmas aí produzidos.

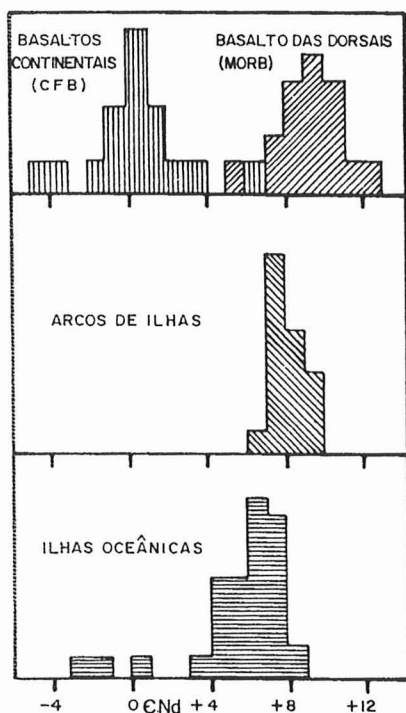


Fig. 7 - Valores médios  $\epsilon Nd$  em basaltos modernos: dorsais médio oceânicas  $\epsilon Nd = +10$ ; continentais  $\epsilon Nd = 0$ ; arcos magmáticos  $= +8$  e ilhas oceânicas  $= +6$ . (De Paolo, 1981).

## COMENTÁRIOS FINAIS

Como vimos, pelo exposto nos itens precedentes, a pesquisa isotópica atual requer sofisticadas aparelhagens e laboratórios super-limpas, oferecendo em contrapartida informações de grande relevância para a caracterização dos principais processos geológicos inerentes à formação e evolução dos materiais crustais. Sua contribuição não se prende à datação desses fenômenos, mas também à sua caracterização geoquímica e petrogenética.

Do ponto de vista geocronológico, a possibilidade de se escolher entre um número cada vez maior de métodos radiométricos e de sua resposta interpretativa diferencial, particular de cada um deles, tornou possível o posicionamento no tempo dos principais eventos responsáveis pela história geológica de uma região.

A geoquímica isotópica, já tradicional no caso do Sr e ainda em desenvolvimento no que se refere aos isótopos de Nd e Hf, participa ativamente na definição dos processos petrogenéticos principais, tais como a origem de magmas, o estudo da natureza e composição da crosta continental, a natureza, a composição e eventualmente a própria estrutura do manto superior, a caracterização de contaminações por material crustal, etc.

Desta maneira, verifica-se ser bastante amplo o espectro de utilização de isótopos radiogênicos estudo de problemas geológicos. No Brasil, em função das limitações analíticas de momento, ainda não se tem uma precisão de medidas que possibilite investigações sistemáticas em pesquisas isotópicas aplicadas a problemas genéticos, sendo os estudos concentrados na área da geocronologia, mediante o emprego das metodologias tradicionais, Rb-Sr e K-Ar. Esse quadro modificar-se-á em futuro próximo, com a adequação dos laboratórios de São Paulo e Belém para utilizarem em rotina algumas das técnicas aqui discutidas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão a todos colegas do Centro de Pesquisas Geocronológicas da USP pelas discussões proíficas e em particular ao Prof. Dr. U.G.Cordani pela leitura e comentário do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ALLEGRE, C. J. - 1967 - Methode de discussion geochronologique Concordia Generalisée. *Earth and Planetary Science Letters*, 2: 57-66.
- BASU, R. and TATSUMOTO, M. - 1980 - Nd isotopes in Selected Mantle - Derived Rocks and Minerals and their implications for Mantle Evolution. *Contr. Mineral. Petrol.* 75: 43-54.
- BLACK, L.P.; GALE, N.H.; MOORBATH, S.; PANKHURST, R.J. and Mc GREGOR, V.R. - 1971 - Isotopic dating of very early Precambrian amphibolite facies gneisses from the Godthaab district, West Greenland. *Earth and Planetary Science Letters* 12: 245-259.

- BRIQUEU, L.; LANCELOT, J.R.; VALOIS, J.P. et WALGENWITZ, F. - 1980 Géochronologie U-Pb et Genèse D'un type de mineralisation uranifère: Les alaskites de goanikontes (Namibie) et leur encaissant. *Bull. Cent. Rech. Explor. - Prod. Elf-Aquitaine* - 4(2): 759-811.
- CORDANI, U.G.; DELHAL, J.; LEDENT, D. - 1973 - Orogenèses Superposées dans le Precambrien du Brésil Sudoriental. *Rev. Bras. Geoc.*, 3(1): p. 1-22.
- CORDANI, U.G.; TASSINARI, C.C.G.; TEIXEIRA, W.; BASEI, M.A.S. e KAWASHITA, K. - 1979 - Evolução Tectônica da Amazônica com base nos dados geocronológicos. *Actas II Congr. Geol. Chileno*, J. - 137-148.
- DE PAOLO, D.J. - 1981 - Nd Isotopic Studies: Some New Perspectives on Earth Structure and Evolution *EOS*, 62 (14): 137-140.
- FAURE, G. - 1977 - *Principles of Isotope Geology*. Wiley, New York, 464 pp.
- GIRARDI, V.A.V.; KAWASHITA, K.; BASEI, M.A.S.; CORDANI, U.G. - 1978. Algumas considerações sobre a evolução geológica da região de Cana Brava, a partir de dados geocronológicos. *An. XXX Congr. Bras. Geol.* 1:337 - 348 - Recife.
- GUIMARÃES, D. e FLORENCIO, W. - 1949 - L'age de quelques pegmatites bresiliennes - *Anais da Academia Brasileira de Ciências* - Tomo XXI: 315-328.
- HAMILTON, P.J.; O'NIONS, R.K. and EVENSEN, N.M. - 1977 - Sm-Nd dating of basic and ultrabasic volcanics. *Earth and Planetary Science Letters*, 36: 263-268.
- HAMILTON, P.J.; EVENSEN, N.M.; O'NIONS, R.K. and TARNEY, J. - 1979 Sm-Nd systematics of Lewisian gneisses: implications for the origin of granulites. *Nature* (London), 277: 25-28.
- HAWKESWORTH, C.J.; KRAMERS, J.D. and MILLER, R.McG. - 1981 - Old model Nd ages in Namibian Pan-African Rocks. *Nature*, 289: 278-282.
- LANCELOT, J.R.; VITRAC, A. and ALLÈGRE, C.J. - 1976 - Uranium and Lead isotopic dating with grain by grain zircon analysis; a study of a complex geological history with a single rock. *Earth Planet. sci. Lett.*, 29: 357-366.
- MATSUI, K.; GIRARDI, V.A.V.; BASEI, M.A.S.; HASUI, Y. - 1976 - Idades K-Ar do Maciço básico-ultrabásico de Cana Brava, Goiás. *Anais XXIX Congr. Bras. Geol.* 4:269-278. B. Horizonte.
- MOORBATH, S.; WELKE, H. and GALE, N.H. - 1969 - The significance of lead isotope studies in ancient, high-grade metamorphic basement complexes as exemplified by the Lewisian rocks of north-west Scotland. *Earth and Planetary Science Letters*, 6: 245-256.
- MOORBATH, S.; O'NIONS, R.K. and PANKHURST, R.J. - 1975 - The evolution of Early Precambrian crustal rocks at Isua, - West Greenland - geochemical and isotopic evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, 27, 229-239.
- MOORBATH, S. e TAYLOR, P.N. - Isotopic Evidence. For Continental Growth in the Precambrian: in *Precambrian plate tectonics* Ed: A. Kroner (in press).

PATCHETT, P.J. and TATSUMOTO, M. – 1980a – Hafnium Isotope variations in Oceanic Basalts – *Geoph. Res. Letters*, 7(12): 1077-1080.

PATCHETT, P.J. and TATSUMOTO, M. – 1980b – Lu-Hf total rock isochron for the eucrite meteorites. *Nature*. 288: 571-574.

ROSHOLT, J.N.; ZARTMAN, R.E. and NKOMO, I.T. – 1973 – Lead isotope systematics and uranium depletion in the Granite Mountains, Wyoming. *Bulletin of the*

*Geological Society of America*, 84: 989-1002.

WETHERILL, G.W. – 1956 – Discordant uranium lead ages 1 – *Trans. Am. Geophys. Union* 37: 320-326.

Miguel A. S. Basei  
Koji Kawashita

Centro de Pesquisas Geocronológicas – USP

## Fotogeologia

# O Astroblema de São Miguel do Tapuio (PI)

A cerca de 20 quilômetros a sudoeste da cidade de São Miguel do Tapuio, na região centro-este do Piauí, foi localizada nos arenitos da Formação Cabeças, uma estrutura circular com cerca de 20 quilômetros de diâmetro. Nunes et al (1973) descrevem-na como sendo o resultado da intrusão de uma rocha ígnea que não chegou a aflorar. Lima (1978), apresenta uma fotografia da imagem de radar e a sua interpretação estrutural e igualmente admite origem ígnea para a sua formação.

Através do estudo da fotografia aérea da região, dos mapas de radar e cartográfico e de uma visita ao local, apesar de, recentemente ter sido descoberto a cerca de 50 quilômetros a sudeste de São Miguel do Tapuio, já no Estado do Ceará, uma rocha granítica cortando e turmalinizando os arenitos da Formação Serra Grande, chegamos à conclusão que será mais pertinente mudar a idéia de estrutura criptovulcânica para astroblema.

As razões que nos levam a pensar assim, foram:

1. A presença de uma estrutura circular principal associada com várias outras de menores dimensões, mas com as mesmas características.
2. A transformação do arenito da Formação Cabeças num quartzito róseo, precisamente no local onde pensamos

que se deu o impacto.

3. A presença de escarpas assimétricas com bordos elevados a oeste e muito suaves a sudeste, mostrando que o corpo meteorítico atingiu aquele local vindo desta última direção e fazendo um ângulo com a superfície terrestre.
4. O grande desnível, superior a 50 metros, que existe entre os bordos da escarpa principal e o centro da cratera.
5. A forma morfológica atual. Se fosse uma estrutura criptovulcânica, não haveria nenhuma razão plausível para que a erosão atuasse mais profundamente sobre as rochas mais silicificadas.

Tomando por base as razões expostas, vê-se não ser possível aceitar a existência de uma rocha ígnea não aflorante mas sim, pensar na presença de uma cratera de impacto.

Os arenitos da Formação Cabeças, regionalmente de cores claras, apresentaram-se no centro da estrutura profundamente modificados para um quartzito de cor avermelhada e de granulação muito fina. A passagem do arenito para o quartzito faz-se de maneira gradual, mas rápida.

O local do impacto principal é grosseiramente de forma circular com fraturas ovaladas segundo a direção do cho-

que e dimensões máximas de cerca de 20 quilômetros no sentido NW-SE e 15 quilômetros no sentido NE-SW. O núcleo da cratera formada tem cerca de 4 quilômetros de diâmetro e a forma de um anfiteatro aberto para sudeste.

A presença de crateras laterais poderá ser explicada ou por estilçamento do corpo meteorítico ou por meteoritos menores que acompanhavam o mesmo curso, o qual, curiosamente é semelhante ao determinado para a cratera meteorítica da Serra da Cangalha, a sudoeste da cidade de Carolina, no Maranhão.

Na região da cratera, as bancadas arenítica da Formação Cabeças apresentam mergulho centrífugo, em relação às escarpas laterais, variável e diminuindo à medida que nos afastamos da estrutura.

A presença na região de Picos (cerca de 150 quilômetros a sul) de uma outra estrutura circular de menores dimensões talvez possa igualmente ser associada à queda de outro meteorito, no entanto, a presença próxima de rochas básicas extrusivas tem sido tomada como uma evidência para a sua origem criptovulcânica. De salientar, no entanto, que os grandes derrames básicos conhecidos na Bacia do Parnaíba (Formação Orozimbo), pelas suas características estruturais, deverão ser possivelmente decorrentes de extrusões do tipo fissural e não do tipo pontual, fato este que, embora não elimine a hipótese criptovulcânica para Picos, torna igualmente viável a do astroblema.

Por fim, duas palavras sobre quando se deu o impacto. Pelas formas morfológicas atuais e pela baixa resistência à erosão que o arenito apresenta poderíamos pensar num choque de idade Terciária/Quaternária, no entanto, o profundo, retrabalhamento tectônico a que a região foi submetida, perfeitamente evidenciado na interpretação estrutural de Lima (1978), com dois sistemas de falhas ortogonais (NE e NW), cortando inclusive as falhas radiais do núcleo da estrutura, leva-nos a uma idade mais antiga, possivelmente pré-abertura do Atlântico Norte, idade provável para muitas destas falhas.

João Raul Torquato

## REFERÊNCIAS

- LIMA, M.I.C. de (1978) – Potencialidades das imagens de radar em mapeamentos geológicos. *Anais do 30º Congresso Brasileiro de Geologia*, Recife, 1: 164-178.
- NUNES, A. de B., LIMA, R.F. da F. e FILHO, C.N.B. (1973) – Geologia da folha SB-23 Teresina e parte da folha SB-24 Jaguaribe. In *Projeto Radam – Levantamento de recursos naturais* 2: 1/1 a 1/33.