



# EFEITOS DAS ALTERAÇÕES PÓS-MAGMÁTICAS E INTEMPÉRICAS NO COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS TERRAS RARAS: EXEMPLO DE ROCHAS BÁSICAS A SUL DO CRÁTON SÃO FRANCISCO

M.G.M. GARCIA<sup>1</sup>; S. ALMEIDA<sup>2</sup>; M.C. CAMPOS NETO<sup>1</sup>

1. Departamento de Mineralogia e Geotectônica, IG/USP

2. Setor de Petrologia e Mapeamento, DG/UFRRJ

## INTRODUÇÃO

O presente estudo tem como objetivo avaliar e quantificar o grau de mobilidade dos Elementos Terras Raras (ETR) durante processos pós-consolidação, tendo como exemplo rochas metabásicas que ocorrem intercaladas em mica xistos a cianita e granada, metagrauvacas e quartzitos da Nappe Carmo da Cachoeira (NCC), parte do sistema de nappes a sul do Cráton São Francisco (Campos Neto & Caby 1999). Os tipos litológicos caracterizam-se petrograficamente como epidoto anfibolitos, granada-epidoto anfibolitos, granada anfibolitos e anfibolitos, quartzosos ou não, xistosos ou não, alguns deles miloníticos, metamorfisados na transição entre a facies xisto verde e anfibolito e na facies anfibolito. De um modo geral, os epidoto anfibolitos são foliados, por vezes miloníticos, enquanto que entre os anfibolitos e granada anfibolitos, normalmente maciços, predominam texturas granoblásticas. O extremo fatiamento dos litotipos dificulta a caracterização das relações de contato entre os metabasitos e os metassedimentos encaixantes, mas em geral a foliação nos primeiros, quando observada, é concordante com a regional. No campo, ocorrem como lentes ou lascas de espessuras variáveis, desde centimétricas até decamétricas. Em locais onde se observam feições miloníticas os anfibolitos aparecem como *boudins* com eixos paralelos à direção de estiramento principal.

Apesar de, normalmente, guardarem o aspecto tabular e maciço original, os corpos anfibolíticos estão muitas vezes fraturados e com visíveis sinais de percolação de fluidos, encontrando-se frequentemente num estado de intensa alteração, o que prejudica em muito a coleta destas rochas para estudos litogeoquímicos tradicionais. A alteração das rochas ocorre preferencialmente das bordas para o centro, de forma concêntrica, e a partir de planos de fraturamento. As primeiras modificações são a descoloração gradual da rocha, que passa de uma cor verde escura para verde clara. Com o aumento do grau de alteração a rocha vai aos poucos adquirindo uma cor ocre/alaranjado que é típica da transformação intempérica de minerais ferromagnesianos. As amostras coletadas encontram-se, no máximo, no primeiro estágio de alteração.

## RESULTADOS

A Figura 1 mostra os padrões de ETR nas amostras analisadas normalizados segundo o NASC (North American Shales composite) de Haskin et al. (1968). A normalização por este padrão é preferida, no domínio exógeno, àquela em relação aos condritos porque permite suprimir os efeitos causados pelo enriquecimento da crosta continental em ETRL. Não há, aparentemente, relação entre o grau de alteração das amostras e as modificações nas razões (La/Yb)<sub>N</sub>, que variam de 1.62 a 4.84.

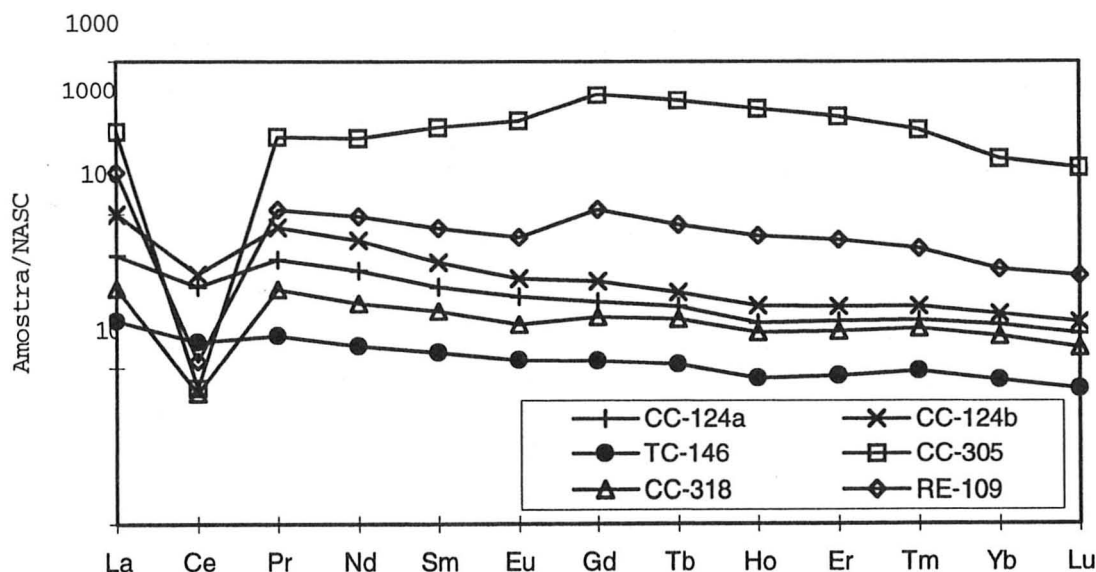


Fig. 1 - Curvas de distribuição dos ETR nas amostras estudadas. Normalização em relação ao NASC (Haskin et al., 1968).

A fim de quantificar as variações ocorridas nas abundâncias relativas de ETR durante os processos pós-magmáticos e intempéricos, os valores obtidos para as rochas mais e menos alteradas foram normalizados em relação à amostra TC-146, considerada representativa da composição mais original do anfibolito (Figura 2). O diagrama mostra que os

ETR têm suas abundâncias absolutas gradualmente aumentadas nas amostras sucessivamente mais alteradas em fatores que chegam a 60 vezes, no caso dos ETRP, e 20 vezes, no caso dos ETRL. Estes elementos foram incorporados à rocha intemperizada a partir dos fluidos percolantes, provavelmente através de fraturas.

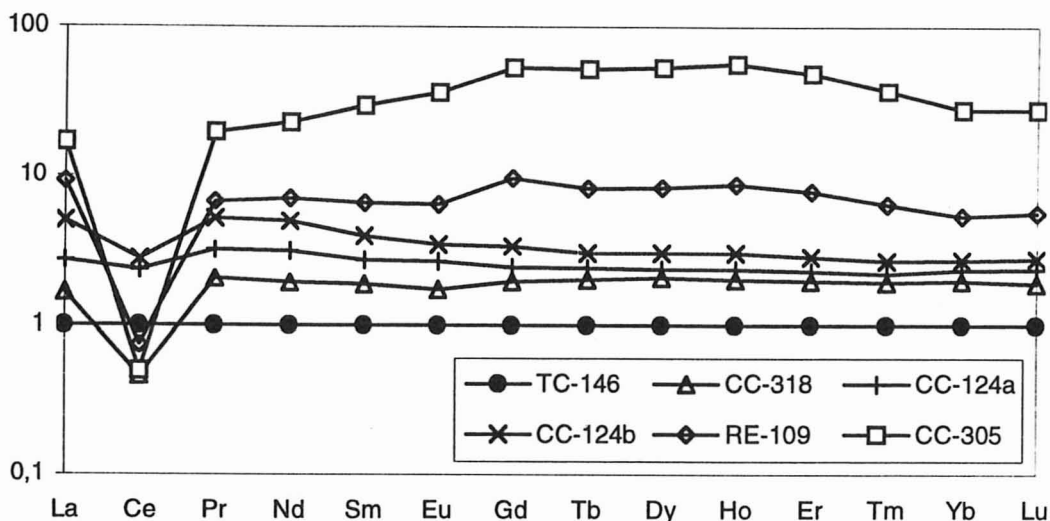


Fig. 2 - Curvas de distribuição dos ETR comparadas à rocha inalterada.

Nesbitt (1979) apresentou estudo sobre a mobilidade dos ETR em rochas da crosta e sua suscetibilidade aos processos intempéricos, enfatizando a importância do tipo da fase fluida envolvida no transporte de elementos para dentro e fora do sistema. Perfis realizados em rochas continentais afetadas por intemperismo químico mostram um enriquecimento progressivo e generalizado nos conteúdos de ETR nas amostras gradualmente mais alteradas e, comparativamente, um aumento ainda maior (entre 100 e 200 %) nos teores de ETRP. Estas observações estão em concordância com os tipos de padrões apresentados pelas amostras, indicando que estas foram, de fato, afetadas de alguma forma por processos de alteração intempérica.

Um outro aspecto a ser considerado nos diagramas apresentados é a presença de fortes anomalias negativas no elemento cério. A observação do diagrama da Figura 2 indica que as amostras mais intemperizadas apresentam empobrecimentos segundo fatores de até 0.4 em cério em relação à amostra TC-146 tomada como padrão, enquanto outras, que não mostram sinais visíveis de quaisquer alterações intempéricas, são enriquecidas quando comparadas à amostra fresca. A intensidade destas anomalias apresentam uma forte relação com o grau de aumento nas abundâncias relativas dos ETRP e, consequentemente, com o grau de intemperismo da rocha. As amostras que possuem maiores valores de perda ao fogo (entre 1.13 e 2.02) são as que apresentam as maiores anomalias em cério. Similarmente, as amostras que exibem os maiores enriquecimentos relativos de ETRP são as que têm também os maiores empobrecimentos em cério em relação à amostra considerada. Entretanto, quando se compara este diagrama

ma com o da Figura 1, verifica-se que todas as amostras exibem empobrecimentos absolutos neste elemento, inclusive a própria amostra padrão e mais, as amostras mais ricas em ETR não são as que têm, necessariamente, as maiores anomalias. Isto sugere que outros processos pós-consolidação das rochas, além do intemperismo, tenham contribuído para a geração destas anomalias negativas.

Várias causas têm sido apontadas como responsáveis pela geração de anomalias negativas em cério, que são relativamente comuns em rochas básicas metamorfisadas, especialmente anfibolitos, e em rochas situadas em zonas de cisalhamento (Choudhuri 1991). Explicações sobre a origem destas anomalias incluem geralmente a relativa facilidade com que o  $Ce^{3+}$  é oxidado e transformado em  $Ce^{4+}$ , precipitando-se sob a forma de  $CeO_2$ , enquanto os outros ETR tendem a permanecer no estado  $3^{+}$ . Processos deste tipo teriam lugar tanto em ambientes marinhos profundos como em superfície.

Em processos de superfície, Braun et al. (1990) pondera que o  $CeO_2$  é bastante insolúvel, fazendo com que, à medida em que é precipitado, as soluções originais sejam gradualmente empobrecidas em cério. O óxido precipitado concentrar-se-ia, então, em locais próximos como o solo residual ou concreções lateríticas, que teriam, portanto, anomalias positivas neste elemento. Adicionalmente, devido à esta baixa solubilidade, as águas intempéricas seriam empobrecidas em cério e enriquecidas em ETRL, carregados preferencialmente em relação aos ETRP (Marsh 1991).

A distribuição dos ETR nas amostras enfocadas mostra uma nítida relação com seu grau metamórfico e posicionamento em campo. Como



tendência geral, as amostras mais enriquecidas e com as maiores anomalias negativas em cério são aquelas metamorfasadas em grau mais baixo, que têm epidoto equilibrado na paragênese principal e que estão, no campo, situadas na base de superfícies de cavalgamento que tiveram sua movimentação em níveis crustais rasos. Ao contrário, as amostras com conteúdos mais baixos de ETR tendem a apresentar texturas granoblásticas e metamorfismo na facies anfíbolito. É difícil precisar se as modificações observadas nos padrões de ETR são devidas unicamente à percolação de fluidos por meio de fraturas pós-cinéticas, em condições de superfície, ou se são resultado da entrada de fluidos que é normalmente facilitada em zonas de cisalhamento.

Humphris (1984) sugere que as anomalias negativas em cério possam ser resultado de processos pós-magmáticos ainda em fundo oceânico, provavelmente relacionados com a exposição das lavas à água do mar. A precipitação do  $\text{CeO}_2$  neste ambiente levaria a um fracionamento deste elemento na água do mar e em sedimentos marinhos e sua concentração em nódulos de manganês (Fleet 1984). Entretanto, a depleção em cério seria acompanhada, segundo a autora, de uma redução geral nos ETRL em relação aos ETRP, o que não está de acordo com o que ocorre nas rochas estudadas. Hole et al. (1984) estudou amostras de basaltos das Ilhas Marianas que apresentam anomalias negativas em cério e sugeriu que estes padrões estariam relacionados à incorporação de sedimentos pelágicos pela fonte do magma durante o processo de subducção de placas, que carregam consigo porções de metassedimentos de fundo oceânico. Estas mesmas lavas não mostram, contudo, anomalias de európio, que são comuns em metassedimentos, o que fez com que Ben Othman et al. (1989) apontem processos ligados à desidratação das placas e metassomatismo do manto acima delas como responsáveis por estes padrões. No caso das rochas em questão, acredita-se que, se processos deste tipo tivessem ocorrido, estes teriam atuado de maneira mais uniforme. Além disso, anomalias semelhantes foram reportadas por Almeida (1998) em metagabros com texturas cumuláticas, que não poderiam, portanto, ter sido contaminados por águas marinhas.

Sun & McDonough (1989) reportam a existência de muitos toleitos enriquecidos em ETR e ítrio em relação a outros elementos incompatíveis, destacando que algumas amostras apresentam anomalias negativas em Ce e padrões côncavos de ETR, com enriquecimento relativo de ETRM. Os autores apontam ainda a detecção, nestes toleitos, de pequenas quantidades de carbonatos e fosfatos secundários ricos em ETR, o que reforça a hipótese de enriquecimento pós-magmático. As rochas estudadas possuem, com efeito, carbonato secundário gerado a partir de anfíbólio e plagioclásio, principalmente, além de duas delas apresentarem enriquecimento em ítrio.

## CONCLUSÕES

Os processos de alteração pós-magmática atuam sobre as rochas gerando modificações nas concentrações absolutas e relativas dos ETR. No caso das rochas básicas pesquisadas, estas modificações podem ser sintetizadas da seguinte maneira:

1. Aumento da concentração absoluta de todos os ETR;
2. Aumento nas concentrações relativas destes elementos em proporções que podem chegar a 60 vezes, nos ETRP e a 20 vezes, nos ETRL;
3. Redução significativa no teor de cério produzindo teores mais baixos deste elemento tanto em relação ao NASC como em relação ao exemplar inalterado.

A maior parte das variações observadas tende a se intensificar com o aumento do grau de alteração intempérica, sendo portanto o intemperismo físico/químico proposto como o principal responsável pela mobilização dos ETR nas rochas estudadas. A ausência de uma rígida relação entre os dois parâmetros, entretanto, sugere que outros fatores, como a ação de fluidos metamórficos em zonas de cisalhamento e retenção preferencial de alguns ETR por minerais acessórios, tenham contribuído, de maneira secundária, para as modificações verificadas.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA S. (1998) Petrologia de rochas ultramáficas associadas ao Grupo Andrelândia e seu embasamento na região de Liberdade, Arantina, Andrelândia, São Vicente de Minas e Carrancas, MG. Tese de Doutorado. IG/USP, 194p.
- BEN OTHMAN D., WHITE W.M. & PATCHETT J. (1989) The geochemistry of marine sediments, island-arc magma genesis, and crust-mantle recycling. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 94:1-21.
- CAMPOS NETO, M.C. & CABY, R. (1999) Neoproterozoic high-pressure metamorphism and tectonic constraint from the nappe system south of São Francisco Craton, southeast Brazil. *Precambrian Research* (in press)
- CHOUDHURI A. (1991) Anomalia negativa de Ce em rochas metabásicas - Considerações preliminares. In: Cong. Bras. Geoq., 3 e Cong. Geoq. Países Ling. Port., 1, São Paulo, SBGq. Resumos..., 2:662-664.
- CULLERS R.L. & GRAF J.L. (1984) Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: predominantly basic and ultrabasic rocks. In: P.Henderson (Ed.) *Rare earth element geochemistry*. Elsevier Sci. Pub. Co. Inc., 275-316.
- FLEET A.J. (1984) Aqueous and sedimentary geochemistry of the rare earth elements. In: P.Henderson (Ed.) *Rare earth element geochemistry*. Elsevier Sci. Pub. Co. Inc., 343-373.
- HASKIN L.A., HASKIN M.A., FREY F.A. & WILDEMAN T.R. (1968) Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. In: L.H. Ahrens (Ed.) *Origin and distribution of the elements*. Pergamon Press, 889-912.
- HUMPHRIS S. (1984) The mobility of the rare earth elements in the crust. In: P.Henderson (Ed.) *Rare earth element geochemistry*. Elsevier Sci. Pub. Co. Inc., 317-342.
- HOLE M.J., SAUNDERS A.D., MARRINER G.F. & TARNEY J. (1984) Subduction of pelagic sediments: implications for the origin of Ce-anomalous basalts from the Mariana Islands. *J. Geol. Soc. Lond.*, 141:453-472.
- NESBITT H.W. (1979) Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature*, 279:206-210.
- SUN S. & MCDONOUGH W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders & M.J. Norry (Eds.) *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. Sp. Pub., 42:313-345.