

**EPIDOTIZAÇÃO E MOBILIDADE DE ELEMENTOS QUÍMICOS NOS METABASALTOS
DE CHAPADA, GOIÁS**

R.M. Kuyumjian

ABSTRACT

Chemical and modal analyses are presented for less and more epidotized amphibolites from the Chapada region, Goiás, Brazil. The less affected elements by the epidotization are aluminium, titanium, scandium, zirconium, yttrium, tantalum, niobium, hafnium and heavy rare earth elements.

RESUMO

Análises modais e química de anfibólitos muito e pouco epidotizados de Chapada, Goiás, são discutidos em relação a redistribuição de elementos químicos em decorrência da epidotização que afetou aquela região. A avaliação dos resultados permitiu concluir que os elementos menos redistribuídos foram alumínio, titânio, escândio, zircônio, ítrio, tântalo, nióbio, háfnio e elementos terras raras pesados.

INTRODUÇÃO

Estudos químicos efetuados ao longo dos últimos anos (Humphris, 1978; Hart et al., 1974; Gelinás et al., 1982; Ludden et al., 1982) evidenciam que, quando rochas vulcânicas são submetidas a processos de alteração hidrotermal e/ou metamorfismo, a composição química das mesmas sofre modificações. Este processo é gradual, podendo iniciar com alteração através da interação entre lavas basálticas e água do mar, seguida pelos metamorfismos de soterramento e regional. Segundo Gelinás et al. (1982) é quase sempre impossível distinguir, num mesmo terreno, os efeitos de cada um destes estádios de alteração.

Vários métodos têm sido empregados para identificar e avaliar as variações na composição química de rochas ígneas, decorrentes de alteração hidrotermal ou metamorfismo. O procedimento mais comum é o de comparar composições químicas de rochas menos alteradas e mais alteradas de um mesmo tipo litológico (Condie et al., 1977; Sun & Nesbitt, 1978). Alguns autores (por exemplo, Gelinás et al., 1977) têm utilizado os teores de voláteis (H_2O e CO_2) e de metais alcalinos (K e Na) para identificar as rochas menos alteradas. Objetivando identificar a redistribuição de elementos químicos devido a metassomatismo, Beswick & Soucie (1978) descrevem um método gráfico o qual envolve a correlação de dados analíticos na forma de razões de proporções moleculares de óxidos. Com base na assertiva de que em líquidos magmáticos existe uma consistência das razões de concentrações de elementos, Nesbitt et al. (1979) sugerem que o melhor método para identificar rochas alteradas é verificar a consistência da composição química em um grupo de amostras de um

mesmo tipo litológico aflorante numa determinada área.

Embora haja concordância entre os estudiosos de que, durante os processos de alteração hidrotermal e metamorfismo, vários elementos, tais como sódio, potássio, rubídio, estrôncio e bário sejam apreciavelmente móveis, tal concordância não existe em relação à mobilidade de vários outros elementos. Por exemplo, Condie et al. (1977) concluíram que, durante o processo de epidotização das rochas toleíticas do Greenstone Belt de Barberton, África do Sul, há enriquecimento em cálcio e ferro (íon férrico) naquelas rochas, enquanto que os elementos sódio, magnésio, ferro (íon ferroso), potássio, titânio, fósforo, níquel e nióbio são empobrecidos nas mesmas. Estes mesmos autores mostram ainda que, durante os processos de carbonatização-cloritização daqueles toleítos, os conteúdos de ferro (íon ferroso), titânio, ítrio, nióbio, tântalo e elementos terras raras leves são enriquecidos, enquanto que os de sódio, cálcio, ferro (íon férrico) e cromo são empobrecidos. Condie et al. (1977) concluíram que, durante a epidotização, os elementos menos mobilizados são háfnio, tântalo, escândio, cromo, tório e elementos terras raras, e que os elementos menos redistribuídos durante o processo de carbonatização-cloritização são háfnio, níquel, cobalto, zircônio, tório e elementos terras raras pesados. Por outro lado, Pearce & Cann (1973) e Humphris & Thompson (1978) afirmam que alumínio, titânio, cromo e zircônio permanecem imóveis durante a alteração de rochas basálticas através de água do mar.

Verifica-se, portanto, que, com relação à mobilidade de elementos químicos em decorrência de processos de alteração hi-

drotermal e/ou metamorfismo, pressupor qualquer generalização pode conduzir a erros grosseiros na identificação de quais os elementos menos redistribuídos a serem utilizados em estudos petroquímicos e petrogenéticos.

No presente artigo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos do estudo sobre a redistribuição dos elementos maiores, menores e traço, ocorrida nos basaltos epidotizados de Chapada, Goiás (Fig. 1). A sistemática adotada neste trabalho foi a de estudar pares de amostras de anfibolitos mais e menos epidotizados, tendo-se restringido a amostragem a locais em que as

amostras de cada par pudessem ser coletadas em um mesmo afloramento de uma determinada unidade de anfibolito. As análises químicas foram estudadas nos laboratórios do Imperial College, Londres, Inglaterra, sendo que os elementos maiores, menores e traço foram dosados por ICP (Plasma), nióbio por fluorescência de Raios-X, e tântalo, tório e háfnio por ativação neutrônica.

Sugere-se que, para uma melhor compreensão dos métodos de avaliação da redistribuição de elementos químicos devido a processos de alteração hidrotermal e/ou metamorfismo, o leitor reporte-se às publicações mencionadas neste artigo.

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS E QUÍMICAS DOS ANFIBOLITOS

A seqüência vulcano-sedimentar de Chapada, Goiás, é constituída de metabasaltos, formação ferrífera, metacherts e metapelitos. Esta seqüência é atravessada por pequenos corpos dioríticos e gabróticos (Fig. 1). Metamorfismo regional da fácies anfibolito superimposto às rochas da seqüência transformou as vulcânicas basálticas em anfibolitos (granada anfibolitos, quartzo anfibolitos e clinopiroxênio anfibolitos almofadados) e os sedimentos em metapelitos com estauroлита, cianita e, muito subordinadamente, silimanita (Kuyumjian, 1989). A seqüência vulcano-sedimentar é atravessada por uma zona de cisalhamento de direção nordeste, ao longo da qual os anfibolitos mostram zonas de alteração hidrotermal (zona da clorita, zona da biotita, zona da sericita e zona do epidoto), às quais associa-se o depósito de cobre-ouro de Chapada. Segundo Richardson et al. (1986), a alteração hidrotermal seria semelhante aquela associada aos depósitos do tipo cobre-pórfiro e, posteriormente, submetida a metamorfismo regional. Kuyumjian (1991) sugere que as zonas de alteração hidrotermal em Chapada constituem produtos metamórficos (metamorfismo retrógrado ao longo da zona de cisalhamento) de hidrotermalismo semelhantes aos que ocorrem em ambientes de arco de ilha.

No presente trabalho será considerado apenas o anfibolito epidotizado, que constitui a litologia predominante ao longo da zona de cisalhamento. A composição modal das amostras de anfibolitos epidotizados consideradas no presente trabalho é indicada na Tabela 1. Anfibólio, plagioclásio e

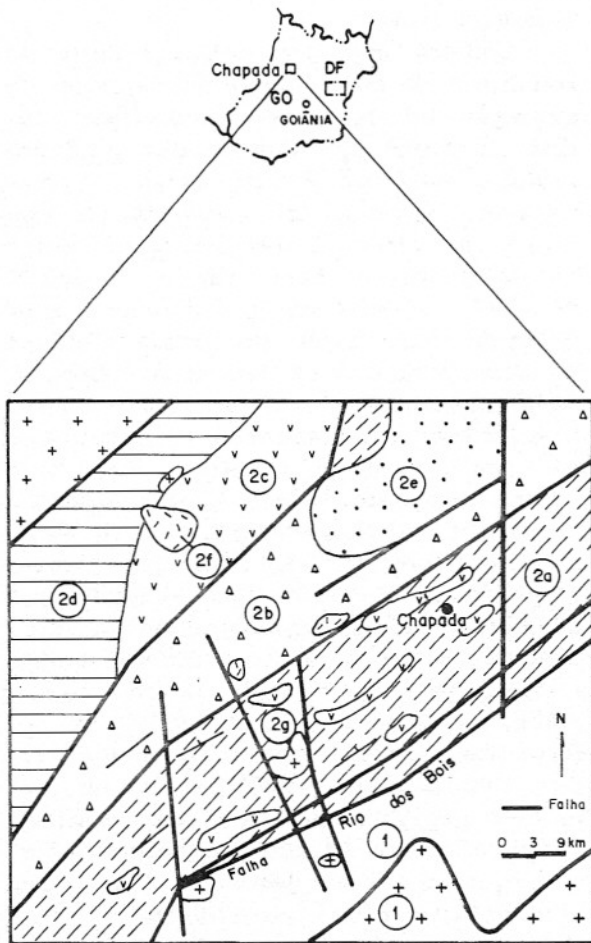


Figura 1 - Localização e esboço geológico da região de Chapada, Goiás. 1- Granito-greenstone belt arqueano; 2- Seqüência vulcano-sedimentar proterozóica; 2a- metassedimentos e metavulcânicas (quartzo anfibolitos e granada anfibolitos) intercaladas; 2b- epidoto anfibolitos; 2c- piroxênio anfibolitos; 2d- metassedimentos; 2e- gnaisses tonalíticos e granodioríticos; 2f- intrusivas básicas e ultrabásicas; 2g- intrusivas ácidas.

Tabela 1 – Composição modal (1a) e concentrações de elementos maiores (1b), traço (1c) e terras raras (1d) nos anfibolitos epidotizados de Chapada. O par de amostras RCH-183 (menos epidotizada) e RCH-179c (mais epidotizada) corresponde a um incremento de 7% de epidotização, enquanto que o par de amostras RCH-170b (menos epidotizada) e RCH-170a (mais epidotizada) corresponde a um incremento de 35% na epidotização. Elementos maiores em % de óxidos; elementos traço e terras raras em ppm.

(1a)	RCH-189	RCH-179c	RCH-170b	RCH-170a
Anfibólio	52,00	45,00	55,00	20,00
Plagioclásio	34,00	28,00	18,00	5,00
Epidoto	7,00	14,00	18,00	53,00
Piroxênio	3,00	5,00	-	-
Quartzo	Traços	6,00	2,00	6,00
Titanita	3,00	Traços	4,00	8,00
Opacos	Traços	Traços	Traços	7,00
Carbonato	-	Traços	-	-
Escapolita	-	Traços	-	-

(1b)	RCH-183	RCH-179c	RCH-170b	RCH-170a
SiO ₂	50,57	48,03	50,96	48,32
Al ₂ O ₃	14,34	13,80	16,13	15,15
FeO	8,35	7,27	5,69	3,45
Fe ₂ O ₃	2,78	3,98	3,10	5,18
MgO	6,89	7,22	7,77	6,61
CaO	10,89	14,33	10,97	17,01
Na ₂ O	3,34	2,15	1,25	0,41
K ₂ O	0,12	0,26	0,48	0,08
P ₂ O ₅	0,09	0,09	0,09	0,11
TiO ₂	1,23	1,09	0,48	0,41
MnO	0,21	0,20	0,16	0,17
H ₂ O ⁺	1,35	1,09	2,55	1,86
CO ₂	0,15	0,11	0,08	0,25
TOTAL	100,31	99,61	99,71	99,01

(1c)	RCH-183	RCH-179c	RCH-170b	RCH-170a
Cr	163	146	339	365
Cu	79	96	87	30
Ni	77	79	134	105
Sr	90	157	234	270
V	306	310	252	236
Zn	71	78	58	57
Zr	62	53	29	29
Sc	43	49	19	19
Y	31	22	15	15
Ta	0,17	0,14	-	-
Th	3,50	4,20	-	-
Hf	1,60	1,59	3,96	3,51

(1d)	RCH-189	RCH-179c	RCH-170b	RCH-170a
La	0,40	2,30	-	2,10
Ce	3,87	5,96	2,07	2,17
Nd	7,15	8,28	12,76	6,61
Sm	2,91	2,50	9,90	1,65
Eu	1,14	1,11	0,13	0,13
Tb	0,64	0,68	-	0,33
Yb	3,81	2,92	1,05	1,02
Lu	0,41	0,40	0,26	0,24

epidoto são os minerais mais abundantes nas amostras de anfibolitos epidotizados estudadas, porém, clinopiroxênio constitui também um mineral essencial em alguns dos anfibolitos de Chapada. O plagioclásio ocorre parcialmente saussuritizado, e o clinopiroxênio mostra uralitização. A titanita é, geralmente, abundante, enquanto que minerais opacos ocorrem subordinadamente. Para o presente estudo foram considerados os pares de amostras RCH-183 - RCH-179c e RCH-170b - RCH-170a, os quais representam, respectivamente, 7% e 35% de aumento na proporção de epidoto modal.

Nos anfibolitos mais epidotizados, o epidoto aumenta na proporção de até cerca de 60% da composição modal, sendo que as relações texturais indicam que o mesmo é, quase sempre, produto de alteração de plagioclásio e hornblenda. Nos locais de epidotização mais intensa, os basaltos foram transformados em epidotito, rocha esta constituída essencialmente de epidoto e titanita.

FLUXO DE ELEMENTOS QUÍMICOS - MÉTODO DE GRESSENS

As variações nas concentrações dos elementos maiores, menores e traço, devido aos processos de alteração e/ou metamorfismo de rochas, podem ser estimadas através da avaliação das relações entre as variações de volume e concentração química de elementos da rocha transformada. Tal avaliação é efetuada utilizando-se a equação de balanço de massas estabelecida por Gresens (1967):

$$(\Delta W_i)/W_o = (V_d/V_p)(P_d/P_p)W_{id}-W_{ip}$$

onde,

ΔW_i = massa do componente i subtraída ou adicionada,

W_o = massa da rocha não alterada ou menos alterada,

V_d, V_p = volumes das rochas mais e menos alteradas, respectivamente,

P_d, P_p = densidades das rochas mais e menos alteradas, respectivamente,

W_i, W_p = frações da massa do componente i nas rochas mais e menos alteradas, respectivamente.

Utilizando-se a equação de Gresens, será possível estimar, para cada elemento químico, "perdas" e "ganhos" em consequência da epidotização dos anfibolitos de Chapada, e a representação de tais dados

em diagramas apropriados. Os diagramas das Figuras 2a e 2c mostram as variações nas concentrações dos elementos maiores, menores e traço decorrentes de um menor incremento na epidotização (par RCH-183 - RCH-179c). O aumento em Fe_2O_3 e CaO, e a diminuição em FeO, MgO e SiO_2 , reflete o aumento de epidoto às expensas de anfibólio e plagioclásio. O decréscimo em sódio pode estar refletindo a diminuição de plagioclásio. Nos anfibolitos mais epidotizados (RCH-170a - RCH-170b) (Figs. 2b e 2d), praticamente todo o titânio ocorre na titanita, a qual decresce muito pouco com o incremento da epidotização. O marcante acréscimo em estrôncio (Figs. 2c e 2d) sugere que o mesmo é, preferencialmente, hospedado pelo epidoto. O cobre mostra enriquecimento com o aumento da epidotização, enquanto que o zinco apresenta empobrecimento. Em relação aos elementos níquel e cromo, não há indicações consistentes. Considerando-se os dados obtidos verifica-se, portanto, que os elementos menos redistribuídos durante a epidotização dos anfibolitos de Chapada foram alumínio, fósforo, titânio, zircônio, ítrio, escândio, tântalo, tório e háfnio.

Substituindo-se os parâmetros W_d, W_p, P_d e P_p na equação de Gresens pelos seus respectivos valores para cada par de amostras, as incógnitas serão a quantidade de massa acrescida ou subtraída (ΔW_i) de um determinado elemento químico, durante o processo de alteração, e o fator volume ($F_v = V_d/V_p$). Os diagramas composição versus volume (Gresens, 1967) podem ser utilizados para expressar a relação entre as variações de massa e volume durante um processo de alteração de rocha. Gresens (1967) sugere que, se um número de componentes permaneceu imóvel durante a alteração, este fato será expresso, no diagrama composição versus volume, pelo cruzamento de segmentos de retas representativos daqueles componentes, aproximadamente, no mesmo ponto ao longo do eixo de variação de massa zero. Desta forma, a aproximação dos pontos de cruzamento naquele eixo é sugestivo de mesma mobilidade dos componentes, o que permitirá então a leitura de F_v a partir do próprio diagrama. Para a obtenção dos segmentos de retas dos componentes, foram assumidos, para F_v , os valores 0,6, 1,0 e 1,4, sendo que $F_v = 1,0$ significa nenhuma variação de volume.

Os diagramas das Figuras 3a e 3b

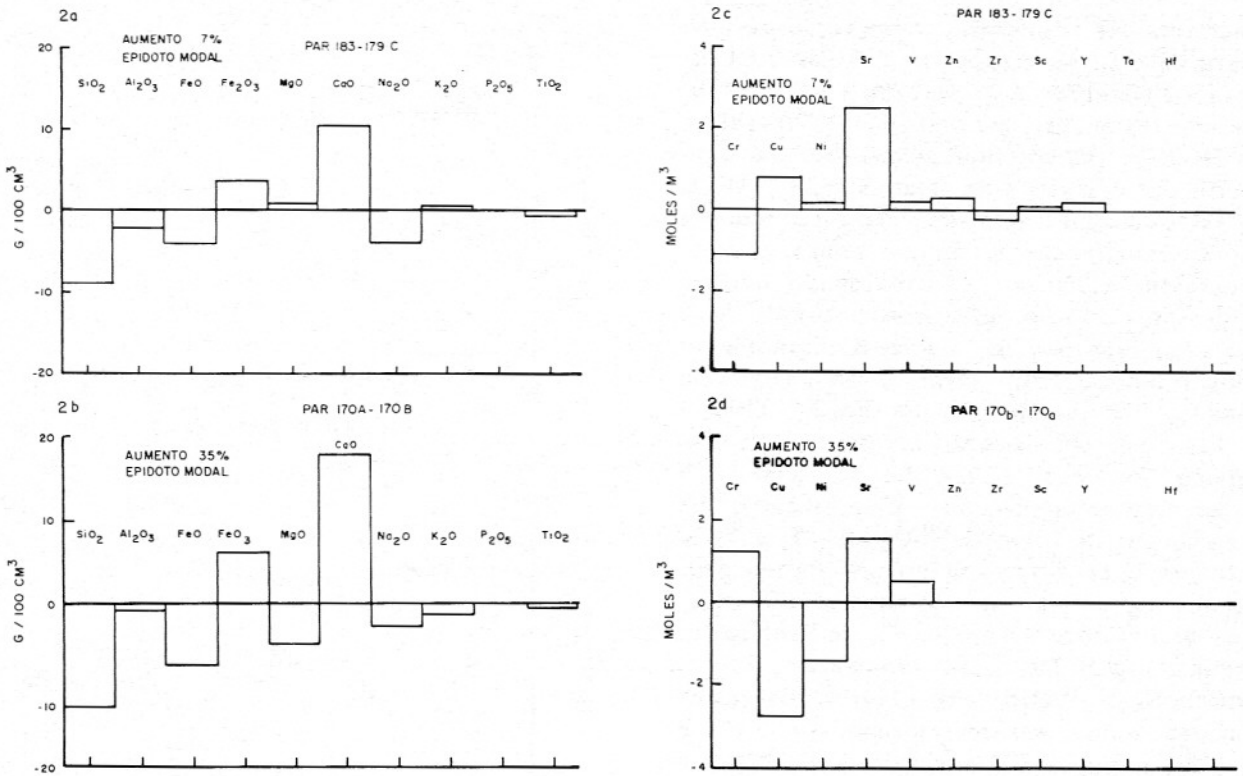


Figura 2 - Variações nas concentrações de elementos maiores em g/100 cm³ (2a, 2b) e traço em moles/m³ (2c, 2d) nos anfibolitos de Chapada em decorrência da epidotização. A não especificação de elemento no diagrama indica que o mesmo não foi dosado.

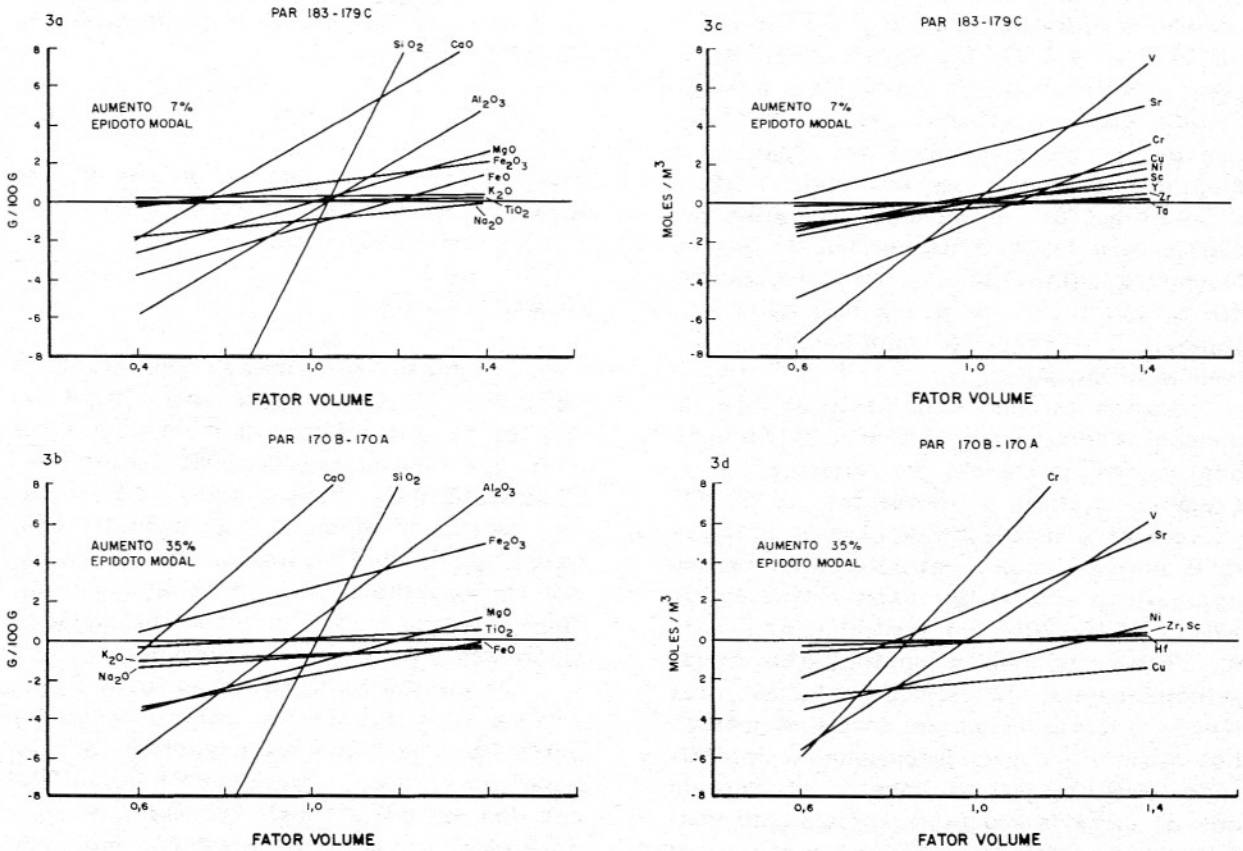


Figura 3 - Relações composição - volume para elementos maiores (3a, 3b) e traço (3c, 3d) nos anfibolitos de Chapada em decorrência da epidotização.

mostram as relações composição-volume para os elementos maiores dos pares RCH-183 - RCH-179c e RCH-170a - RCH-170b, respectivamente. Para o par RCH-183 - RCH-179c (menor incremento na epidotização), os segmentos de retas de SiO_2 , Al_2O_3 e TiO_2 cruzam o eixo de variação de massa aproximadamente no mesmo ponto, correspondente a $F_v = 1,07$, indicando que os elementos silício, alumínio e titânio são, para aquele par de amostras, igualmente pouco móveis (Fig. 3a). O mesmo diagrama mostra enriquecimento em Fe_2O_3 , CaO e K_2O , e empobrecimento em Na_2O . No diagrama do par RCH-170a - RCH-170b (maior incremento na epidotização), os segmentos de retas de SiO_2 , Al_2O_3 e TiO_2 cruzam o eixo isoquímico em pontos próximos entre si e correspondentes aos valores de F_v entre 0,95 e 1,03, implicando em pouca mobilidade dos elementos silício, alumínio e titânio (Fig. 3b). O diagrama mostra ainda enriquecimento em CaO e Fe_2O_3 , e empobrecimento em K_2O , Na_2O e FeO .

Durante os processos de alteração hidrotermal e/ou metamorfismo, alguns elementos traço comportam-se aloquimicamente, pois são tolerados na estrutura do mineral neoforado. Para o par RCH-183 - RCH-179c (7% de aumento na epidotização), e valores de F_v entre 0,92 e 1,02, tântalo, háfnio, escândio, ítrio e níquel foram os elementos menos remobilizados. O diagrama referente ao par RCH-170a - RCH-170b (35% de aumento na epidotização) e para $F_v = 0,90$, verifica-se que os elementos háfnio, níquel, zircônio, escândio e ítrio foram os menos redistribuídos, enquanto que cobre foi empobrecido, e estrôncio enriquecido.

Vários estudos têm mostrado que os elementos terras raras sofrem redistribuição durante os processos de alteração (por exemplo, Hellman & Henderson, 1977). Os padrões de distribuição de elementos terras raras normalizados a condrito para os pares de amostras RCH-183 - RCH-179c e RCH-170a - RCH-170b são mostrados na Figura 4. Verifica-se que a epidotização afeta, principalmente, os elementos terras raras leves. O enriquecimento destes elementos nos anfibolitos mais intensamente epidotizados resulta, provavelmente, do fato de que os mesmos são preferencialmente hospedados por minerais de epidoto. O par RCH-170a - RCH-170b representa um maior incremento na epidotização e, neste

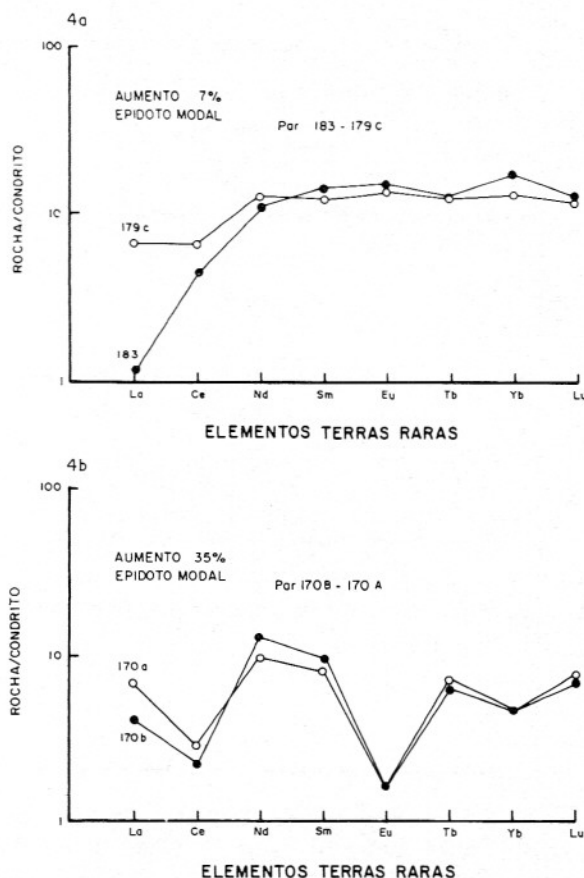


Figura 4 - Padrões de distribuição de elementos terras raras nos anfibolitos epidotizados de Chapada.

caso, é interessante notar o padrão de distribuição marcadamente errático dos elementos terras raras (Fig. 4b).

CONCLUSÕES

A intensa epidotização que afetou os anfibolitos de Chapada provocou transformações na composição química destas rochas. Os elementos alumínio, titânio, escândio, zircônio, ítrio, tântalo e háfnio foram os menos afetados pela epidotização, quer seja nos anfibolitos menos epidotizados (incremento de 7% de epidoto modal), como também naqueles mais epidotizados (incremento de 35% de epidoto modal).

Os elementos terras raras leves foram enriquecidos durante a epidotização dos anfibolitos de Chapada, e padrões de distribuição erráticos parecem ser característicos dos anfibolitos mais intensamente epidotizados, tal como demonstrado por Frey et al. (1974) para basaltos de cadeia meso-oceânica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BESWICK, A.E. & SOUCIE, G. (1978) A correction procedure for metasomatism in an Archean greenstone belt. *Precambrian Research*, **6**: 235-248.
- CONDIE, K.C.; VILJOEN, M.J.; KABLE, E.J.D. (1977) Effects of alteration on element distributions in Archean tholeiites from the Barberton Greenstone Belt, South Africa. *Contr. Mineral. Petrol.*, **64**: 75-89.
- FREY, F.A.; BRYAN, W.B.; THOMPSON, G. (1974) Atlantic ocean floor: geochemistry and petrology of basalts from Leg 2 and Leg 3 of the Deep Sea Drilling Project. *J. Geophys. Res.*, **79**: 5507-5527.
- GELINAS, L.; BROOKS, C.; PERREAULT, G.; CARINGNAN, J.; TRUDEL, P.; GRASSO, F. (1977) Chemostratigraphic divisions within the Abitibi volcanic belt, Rouyn-Noranda district, Quebec. In: *Volcanic Regimes in Canada*, W.R.T. Boraga, L.C. Coleman, J.M. Hall (eds.), *Geol. Assoc. Canada, Special Paper 16*, p. 265-295.
- GELINAS, L.; MELLINGER, M.; TRUDEL, P. (1982) Archean mafic metavolcanics from the Rouyn-Noranda district, Abitibi Greenstone Belt, Quebec. 1. Mobility of the major elements. *Can. J. Earth Sci.*, **19**: 2258-2275.
- GRESENS, R.L. (1967) Composition-volume relationships of metasomatism. *Chem. Geol.*, **2**: 47-65.
- HART, S.R.; ERLANK, A.J.; KABLE, E.J.D. (1974) Sea floor basalt alteration: some chemical and Sr isotope effects. *Contr. Mineral. Petrol.*, **44**: 219-230.
- HELLMAN, P.L. & HENDERSON, P. (1977) Are rare earth elements mobile during spilitization? *Nature*, **287**: 38-40.
- HUMPHRIS, S.E. (1978) Hydrothermal alteration of oceanic basalts by seawater. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**: 107-125.
- HUMPHRIS, S.E. & THOMPSON, G. (1978) Trace element mobility during hydrothermal alteration of oceanic basalts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**: 127-136.
- KUYUMJIAN, R.M. (1989) The geochemistry and tectonic significance of amphibolites from the Chapada sequence, Central Brazil. Tese de doutorado, Imperial College, University of London, 289p.
- KUYUMJIAN, R.M. (1991) A suggested hydrothermal exhalative origin for the Chapada copper-gold deposit, Brazil. *Proc. Symp. Brazil Gold'91*, Belo Horizonte, MG, 231-234.
- LUDDEN, J.; GELINAS, L.; TRUDEL, P. (1982) Archean metavolcanics from the Rouyn-Noranda district, Abitibi Greenstone Belt, Quebec. 2. Mobility of trace elements and petrogenetic constraints. *Can. J. Earth Sci.*, **19**: 2276-2287.
- NESBITT, R.W.; SUN, S.S.; PURVIS, A.C. (1979) Komatiites: geochemistry and genesis. *Can. Mineral.*, **17**: 165-186.
- PEARCE, J.A. & CANN, J.R. (1973) Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **19**: 290-300.
- RICHARDSON, S.V.; JONES, M.L.; KESLER, S.E. (1986) Origin and geochemistry of the Chapada Cu-Au deposit, Goiás, Brazil: a metamorphosed wall-rock porphyry copper deposit. *Econ. Geol.*, **81**: 1884-1898.
- SUN, S.S. & NESBITT, R.W. (1978) Petrogenesis of archean ultrabasic volcanics: evidence from rare earth elements. *Contr. Mineral. Petrol.*, **65**: 301-325.