

**BIOGEOQUÍMICA DOS ELEMENTOS TERRAS RARAS NO COMPLEXO
ALCALINO – ULTRAMÁFICO DE CATALÃO I, GOIÁS**

M.C. Lima e Cunha¹, M.L.L. Formoso¹, V.P. Pereira²

1. Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica, CPGq, Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, RS

2. Curso de Pós-Graduação, Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, RS

ABSTRACT

Some aspects related to the biogeochemical behaviour of rare earth elements are studied, particularly with regard to the processes of absorption and concentration of these elements in *Solanum lycocarpum* St. Hil., species of common occurrence in soils that cover the weathering profile of alkaline complex of Catalão I, Goiás. The results obtained in the ashes of this species, particularly the ratio $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ (La/Lu)N and (La/Yb)N, show a significant enrichment of the LREE in the plant.

Therefore, these biogeochemical data agree with the ideas that the LREE remain available to the plant in the more surficial soil layers, in contrast to the HREE, less absorbed. In this way, the plant reflects the distribution pattern of REE in the more surficial layers of the lateritic profile and similarly these layers reflect the distribution pattern of these elements in the fresh rock, accordingly with other studies.

RESUMO

Neste trabalho, são abordados alguns aspectos relativos ao comportamento biogeoquímico dos elementos terras raras, no que se refere aos processos de absorção e concentração destes elementos na espécie *Solanum lycocarpum* St. Hil. (Lobeira), de ocorrência comum nos solos que recobrem o manto de alteração do Complexo Alcalino de Catalão I, Goiás. Os resultados obtidos nas cinzas da espécie considerada, particularmente aqueles representados pelas razões - $\Sigma\text{ETRL}/\Sigma\text{ETRP}$ (La/Lu)N e (La/Yb)N, comprovam um enriquecimento significativo dos ETRL na planta, em detrimento dos ETRP, muito pouco absorvidos.

Estudos biogeoquímicos, portanto, reforçam a teoria de que os ETRL permanecem disponíveis ao vegetal, nas camadas mais superficiais do solo, ao contrário dos ETRP. Desse modo, a planta reflete o padrão de distribuição dos ETR no perfil laterítico da mesma maneira que os materiais de alteração refletem o padrão herdado da rocha-mãe, conforme outros estudos.

INTRODUÇÃO

Este trabalho constitui um estudo preliminar, dentro de um projeto em desenvolvimento, sobre o comportamento geoquímico dos elementos terras raras (ETR) em perfis de alteração e, no caso presente, da biogeoquímica, com o envolvimento de pesquisadores do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica - CPGq/UFRGS e pesquisadores do NUPEGEL/USP.

Os ETR têm comportamento semelhante ao cálcio (tamanho, ligação, geometria de coordenação, átomo doador preferencial), porém, e principalmente, os elétrons 4f (La-4f⁰ a Lu-4f¹⁴) trazem um comportamento diferenciado dos ETR em relação ao cálcio. O cálcio é um elemento "silente" (diamagnético, sem cor e não luminescente), ou seja, difícil de detectar enquanto os ETR, em consequência de sua configuração eletrônica, apresentam significativa suscetibilidade magnética, absorção da energia radiante e luminescência.

A valência dos ETR é, em geral, 3⁺, mas Ce, Pr, Nd, Tb, Dy e Ho podem apresentar 4⁺ e Sm, Eu, Er, Tm e Yb podem ter 2⁺.

Apresentam ligações muito estáveis com a água, com números de coordenação de 8 a 13.

Com ligantes orgânicos (e também inorgânicos), formam complexos em que os principais átomos doadores são principalmente O>N>S e F>Cl. A quelatação é, no caso dos ETR, um processo importante (Tabela 1).

Acetatos, citratos, carbonatos, fosfatos, fluoretos e oxalatos de ETR são pouco solúveis. A hidrólise é comum em pH neutro, com formação de hidróxidos.

O intemperismo crustal leva os ETR aos alteritos, solos e águas superficiais e subterrâneas. Também a alteração (física e química) das rochas leva os ETR à atmosfera como aerossóis (Sugimae, 1980, *apud* Evans, 1990). Nos solos do Estado de Virginia (USA), Robinson et al. (1958) encontraram teores de ETR da ordem de 100 ppm, enquanto, nas águas da mesma área, da ordem de alguns ppb. Pressupondo uma concentração de 1-10 ppb nas águas, há uma diluição de 10⁻⁵ em relação aos solos.

Eisenbud et al., 1984 (*apud* Evans,

Tabela 1 - Log K (estabilidade) de quelatos (ETR) ácidos policarboxílicos-poliamina (Evans, 1990).

	EDTA	DTPA	DCTA
La ³⁺	15,50	19,48	19,15
Ce ³⁺	15,98	20,50	16,26
Nd ³⁺	16,61	21,60	17,35

1990) estudaram ETR em solos do Brasil (Minas Gerais), em áreas com elevadas concentrações desses elementos. Encontraram altos conteúdos de Ce (514-944 µg/g); La (79-405 µg/g); Nd (27-126 µg/g); e Sm (12-27 µg/g), em solos secos. Nas águas, encontraram 2 µg/l (2 ppb), compreendendo a diluição de concentração para La e Ce (os ETR com maior teor) também de 10⁻⁵. Os autores (Eisenbud et al., *op cit.*) atribuem essa muito pequena concentração à baixa solubilidade de fosfatos e hidróxidos. Os mesmos autores ainda calcularam uma mobilidade para o La de 1,6 x 10⁻⁹/ano. Em fontes quentes (Japão), as concentrações encontram-se entre 0,002 a 0,3 ppm. Na água do mar, há cerca de 0,3-0,4 ppb de ETR com predominância de Ce, La e Y, principalmente na forma particulada.

No meio biológico, as bactérias, algas, fungos, musgos e esporos podem acumular ETR, visto que as superfícies externas desses microorganismos são adequadas ao processo de absorção (Evans, 1990).

Os animais, em especial os vertebrados, têm absorção limitada de ETR pelos próprios alimentos. Nos órgãos dos mamíferos, os valores são baixos; desde ppm, até valores não detectáveis. Baço, fígado e pulmão são órgãos que apresentam valores relativamente elevados de ETR, assim como o esqueleto (Evans, 1990).

Os ETR nas plantas superiores retratam as concentrações destes nas águas. Milton et al. (1944) afirmam que os vegetais são seletivos no processo de absorção desses elementos ao observar que, embora concentrações de até 600 ppm (em peso seco) tenham sido registradas para folhas de castanheira, em carvalhos associados a estas não foram detectados ETR.

Segundo Robinson et al. (1958) as noqueiras têm capacidade de não somente absorver como de concentrar altos teores de

ETR, reportando valores entre 300 a 2300 ppm (em peso seco) em folhas desta árvore, no leste dos Estados Unidos. De acordo com estes autores, Y, La, Ce e Nd representam 91% dos ETR absorvidos pelas noqueiras. Por sua vez, Bowen, 1956 (*apud* Evans, 1990), através de trabalho experimental, mostrou que estas plantas não concentram ETR.

Laul & Weimer, 1982 (*apud* Evans, 1990), constataram que as plantas absorvem seletivamente os ETR, cuja concentração atinge valores de 10⁻⁴ a 10⁻⁵ daqueles encontrados nos solos, ou seja, 0,001-0,01 ppm em peso seco (ou 0,015-0,15 ppm em peso de cinzas). Algumas plantas mostram um enriquecimento seletivo de ETR leves e, em alguns casos, a exceção é o cério que, devido à oxidação, não é bem assimilado.

Kabata-Pendias & Pendias (1984) registram para as plantas terrestres concentrações que variam entre 0,08-3,0 ppm (em peso seco) ou 1,0 a 45 ppm (em peso de cinzas).

A partir dos dados acima, procurou-se estimar o ciclo superficial dos elementos terras raras, conforme a Figura 1, tomando-se, por base, principalmente as referências extraídas de Evans (1990).

OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é o de melhor se conhecer o comportamento biogeoquímico dos ETR, no que se refere aos processos de absorção e graus de concentração nos vegetais, permitindo assim, trazer mais dados para a compreensão do ciclo biogeoquímico desses elementos. A importância de estudos desta natureza reside, portanto, no fato de que muito pouco é sabido sobre a distribuição da maior parte dos elementos-traço nas plantas, particularmente dos ETR, e quais suas funções nas mesmas.

Do mesmo modo, o melhor entendimento dos processos inerentes à mobilidade desses elementos, em ambiente supergênico, permitirá avaliar a aplicabilidade do método biogeoquímico, mais especificamente em regiões sujeitas à alteração intempérica, como é o caso da área aqui considerada.

CARACTERÍSTICAS DA ÁREA

O Complexo Alcalino-Ultramáfico de

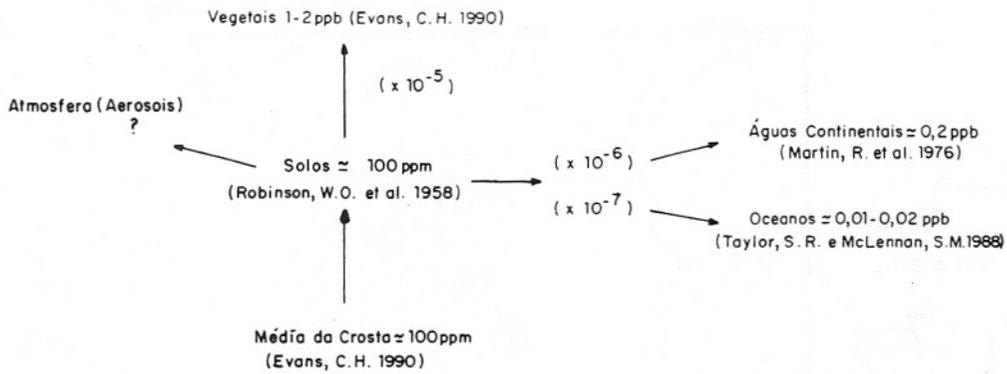


Figura 1 – Ciclo Superficial Estimado dos Elementos Terras Raras (Evans, 1990).

Catalão I é uma estrutura dômica do Cretáceo Superior, composto por rochas ultramáficas serpentinizadas e flogopitizadas, que são cortadas por veios carbonatíficos de espessura variada (Carvalho & Bressan, 1989). Segundo esses autores, este complexo tem sido submetido a intensos processos de alteração intempérica desde o Terciário, resultando na formação de uma espessa cobertura laterítica. Tais processos de alteração são também responsáveis pela formação supérgena de zonas mineralizadas que contêm importantes reservas de fosfato, nióbio, titânio, ETR e vermiculita.

Este maciço situa-se no município de Ouvidor, sul do Estado de Goiás, distando aproximadamente 23 km de Catalão e 10 km de Ouvidor.

O clima da região, tropical de altitude, tem um regime sazonal, representado no período de março a outubro, por estiagem e, de novembro a fevereiro, por chuvas.

Os solos da área do complexo são lateríticos; a espessura média do alterito é de 80 m e, não raro, ultrapassa os 100 m, com desníveis topográficos significativos.

A vegetação é típica de cerrado, com abundância de babaçus. É comum também, na área considerada, a presença de sub-arbustos, pertencentes à família das Solanaceas, cuja espécie *Solanum lycocarpum* St. Hil. (conhecida na região como lobeira), foi escolhida como meio de amostragem biogeoquímica.

METODOLOGIA

A coleta das amostras (20 exemplares) obedeceu a critérios de distribuição homogênea da espécie, em áreas com um mínimo de interferência antrópica e um espaça-

mento entre uma e outra estação de amostragem da ordem de 50 a 100 metros.

As amostras convencionadas como *População A* (11) foram coletadas nos solos sobrepostos às ocorrências mineralizadas em Ti e ETR no complexo (próximo ao Córrego do Garimpo). As amostras convencionadas como *População B* (9) foram coletadas entre as áreas I e II, cortando as seqüências enriquecidas em Nb e fosfato/Nb e também em ETR (cf. Pereira, 1992, inf. verbal) (Fig. 2). A coleta em áreas distintas teve como objetivo avaliar se as populações amostradas divergiam entre si, em termos de concentração dos ETR. Contudo, os resultados mostraram que ambas absorvem esses elementos de modo semelhante.

A metodologia analítica empregada abrangeu o tratamento comumente utilizado em biogeoquímica (Brooks, 1972) e a dosagem dos teores dos ETR foi feita por ICP, nos laboratórios de geoquímica analítica da Geosol, MG. Os resultados obtidos nas duas populações amostradas (Tabela 2) foram tratados de modo conjunto, estando representados pelo somatório dos ETRL e ETRP, bem como pelas razões $\Sigma\text{ETRL}/\Sigma\text{ETRP}$, $(\text{La}/\text{Lu})\text{N}$ e $(\text{La}/\text{Yb})\text{N}$ (normalizados aos condritos), na Tabela 3. Todos os valores estão em ppm de peso de cinzas de folhas da espécie *Solanum lycocarpum*.

A Figura 3 ilustra a concentração dos ETR em *Solanum lycocarpum* normalizada em relação aos folhelhos norte-americanos (NASC; Haskin et al., 1968, *apud* Henderson, 1984) e aos condritos (Wakita et al., 1971, *apud* Henderson, 1984). O fato de a normalização ter sido feita com base em folhelhos e em condritos, é devido a inexistência de medidas de concentrações de

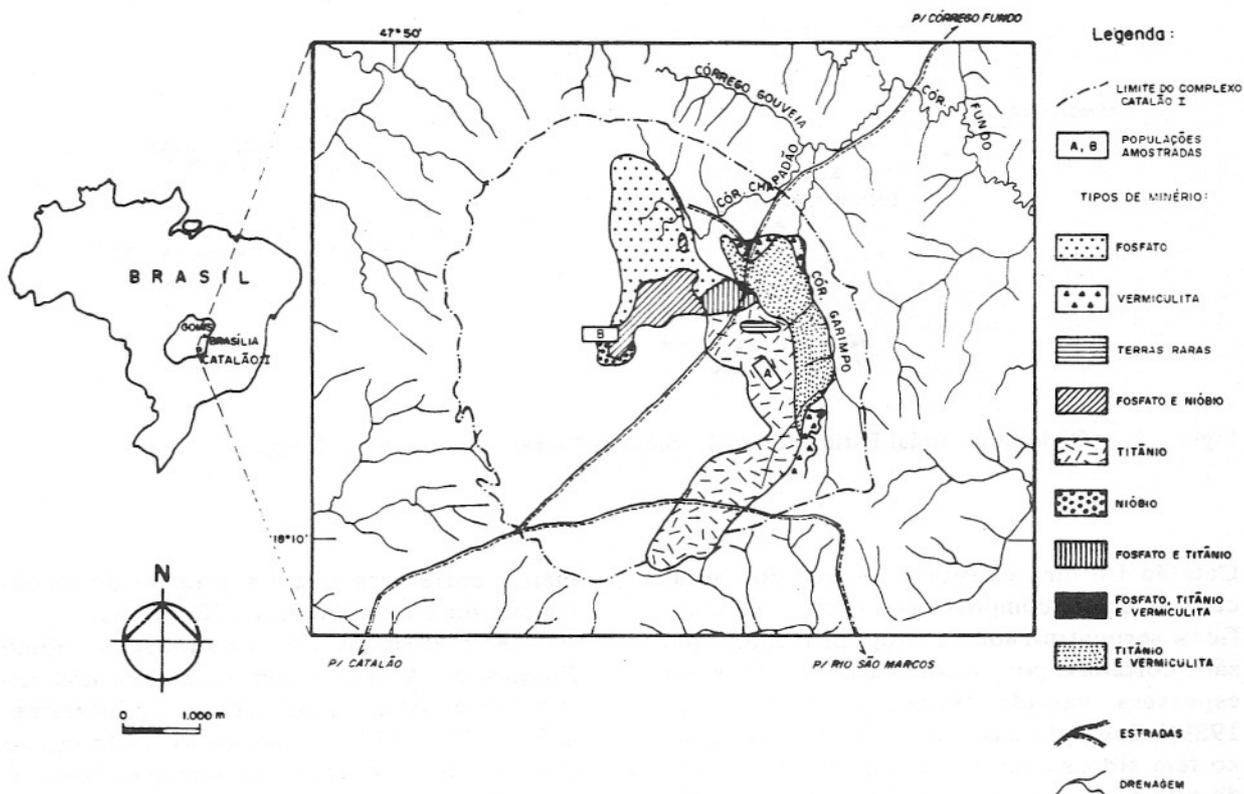


Figura 2 – Mapa de Localização do Complexo Alcalino-Ultramáfico de Catalão I, Goiás, com a localização da amostragem biogeoquímica (Bressan & Carvalho, 1989, modificado).

ETR em vegetais que permitam a padronização a partir de dados fitogeoquímicos. Este procedimento, mesmo tendo apenas como objetivo a representação dos dados, revela na Figura 3 que a concentração dos ETR na planta tem um padrão muito semelhante àquele das rochas alcalinas que, segundo Henderson (1984), se caracteriza por um grande enriquecimento em ETR, e mais em ETRL, relativamente aos condritos.

CONSIDERAÇÕES BIOGEOQUÍMICAS DOS ETR

Embora muitas plantas possam assimilar ETR, pouco se conhece das consequências metabólicas desses elementos.

Estudos feitos têm revelado que a aplicação de ETR como fertilizante induz a uma maior absorção e transporte dos fosfatos, tendo sido observado também que os ETR tanto podem inibir como estimular o crescimento dos vegetais (Evans, 1990).

Em se tratando da absorção dos elementos pelas plantas, como regra geral, estas são seletivas neste processo, admitindo preferencialmente aqueles elementos

que são indispensáveis ao seu desenvolvimento. Esta seletividade parece ser mais acentuada quando se trata de elementos-traço (Cu, Pb, Zn, etc.), pelos seus potenciais tóxicos.

No caso dos ETR, estudos feitos por Robinson et al. (1958) indicam que a absorção dos mesmos pelas plantas depende tão somente da sua disponibilidade no solo, ou seja, o vegetal não teria o poder de discriminar os diversos ETR no processo de absorção, assimilando-os substancialmente na proporção em que estão disponíveis no meio. Esta afirmativa é baseada na similaridade de concentração dos ETR na planta estudada pelos autores acima (nogueira) e nos complexos trocáveis do solo no qual a planta se desenvolve, indicando que a mesma não atua como um agente fracionador destes elementos. Do mesmo modo, Evans (1990) acredita que as plantas que absorvem os ETR podem fazê-lo sem fracionar os membros da série ou mostrando um enriquecimento seletivo em ETR leves.

Embora os estudos existentes sugiram uma mobilidade relativa dos ETR em perfís de alteração, pouco é sabido sobre a sua

Tabela 2 – Concentração dos ETR das populações A e B de *Solanum lycocarpum*, Complexo Alcalino-Ultramáfico de Catalão I, Goiás (valores em ppm de peso de cinza).

Amostra	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Ho	Er	Yb	Lu
População B											
1	1520,00	3100,00	1100,00	150,20	25,00	64,00	21,00	3,40	5,00	1,45	0,25
2	543,00	1085,00	364,00	45,50	8,10	22,00	6,30	1,00	1,75	0,45	0,10
3	665,00	1335,00	445,00	48,00	9,50	20,00	6,70	1,10	1,90	0,45	0,15
4	538,50	1100,00	378,00	47,00	8,30	22,00	6,60	1,10	1,70	0,50	0,09
5	639,00	1420,00	523,00	63,00	12,00	27,60	11,10	1,85	3,20	0,95	0,14
6	555,00	1148,00	395,00	46,00	9,00	23,00	7,50	1,25	2,00	0,65	0,17
7	632,00	1240,00	360,00	44,00	7,30	16,50	4,90	0,85	1,60	0,45	0,13
8	688,00	1365,00	415,50	46,00	8,90	19,20	6,00	1,00	1,70	0,40	0,08
9	173,00	392,00	135,00	16,00	3,20	8,90	2,90	0,50	1,10	0,20	0,10
População A											
10	280,70	635,50	247,70	40,20	7,35	24,15	9,50	1,60	2,83	0,73	0,13
11	170,50	380,50	135,10	21,20	3,30	9,00	3,20	0,55	1,00	0,28	0,79
12	235,50	490,50	163,00	19,00	3,55	7,50	2,50	0,40	0,75	0,17	0,07
13	280,40	610,50	214,00	26,00	4,50	9,40	3,35	0,55	1,04	0,28	0,08
14	135,00	316,00	129,00	17,00	3,25	9,45	3,80	0,65	1,35	0,30	0,10
15	120,00	285,00	142,00	23,00	5,40	21,10	9,50	1,60	2,85	0,90	0,11
16	300,00	680,00	343,00	52,00	11,30	43,00	20,00	3,65	8,00	2,40	0,28
17	294,00	665,00	254,00	32,50	6,00	15,85	6,00	1,00	1,65	0,70	0,09
18	270,00	598,70	263,60	36,40	7,45	23,00	9,95	1,70	3,00	1,10	0,15
19	250,00	574,00	270,00	42,00	9,40	30,30	11,00	1,90	3,20	0,70	0,09
20	265,00	593,00	283,00	40,00	8,40	32,00	15,50	2,80	6,15	1,60	0,25

Tabela 3 – Somatório dos ETRL e ETRP, razões $\Sigma\text{ETRL}/\Sigma\text{ETRP}$, $(\text{La}/\text{Lu})\text{N}^*$ e $(\text{La}/\text{Yb})\text{N}$ das Amostras Biogeoquímicas do Complexo Alcalino-Ultramáfico de Catalão I, Goiás.
 (*) - normalização em relação ao condrito.

Amostra	ΣETRL	ΣETRP	$\Sigma\text{ETRL}/\Sigma\text{ETRP}$	$(\text{La}/\text{Lu})\text{N}$	$(\text{La}/\text{Yb})\text{N}$
1	5905,50	62,10	62,10	647,48	707,97
2	2037,22	31,43	64,81	481,91	798,97
3	2501,52	30,57	81,82	518,54	948,08
4	2072,41	31,81	65,14	607,69	715,61
5	2657,46	44,87	59,22	460,47	441,30
6	2152,67	34,74	61,96	328,78	566,81
7	2283,92	24,39	93,64	500,70	903,60
8	2526,65	28,40	88,96	840,18	1215,53
9	721,08	13,77	52,36	177,69	503,10
10	1211,45	38,93	31,55	221,52	259,38
11	709,50	14,90	47,61	224,02	402,45
12	912,04	11,41	79,93	309,56	926,15
13	1136,42	14,74	77,09	342,42	688,82
14	597,85	15,69	38,10	136,89	277,83
15	573,92	36,05	15,92	108,13	88,85
16	1387,63	77,41	17,92	110,87	84,70
17	1249,86	26,36	49,28	335,13	283,28
18	1175,70	39,05	30,10	178,18	163,18
19	1144,17	47,28	24,19	276,18	235,75
20	1188,76	58,25	20,40	112,73	110,14
Intervalo de concentração			Variação das razões		
(573-5905)	(11-95)	(15-93)	(108-840)	(84-1215)	

magnitude ou o seu potencial de fracionamento.

Nesbitt (1979), estudando as diferentes fases de alteração de um granodiorito, constata que a mobilidade dos ETR, durante o intemperismo, se traduz mais em uma redistribuição dos mesmos dentro do perfil que em um transporte em solução a maiores distâncias. Para esse autor, as soluções ácidas que percolam os horizontes do solo removem esses elementos e os colocam em solução, como complexos ou íons livres. Em um segundo momento, a água continua a migrar e reage com a rocha sotoposta, menos alterada, convertendo seus minerais em argilo-minerais. Durante esta reação, o pH aumenta e os ETR abandonam a solução, sendo precipitados como compostos ou adsorvidos pelos argilo-minerais.

Lottermoser (1990), em Mt. Weld,

Western Australia, demonstra que a ampla variação de pH e as condições de alcalinidade e concentração de íons carbonato nas soluções em subsuperfície, influenciam nos diferentes graus de estabilidade dos ETR, tanto leves como pesados, o que causa o seu fracionamento e a sua deposição. Todas as amostras de laterita analisadas por este autor mostram-se distintamente enriquecidas em ETR leves, com a razão $(\text{La}/\text{Lu})\text{N}$, variando entre 8,7 a 395,3, sendo esta variabilidade atribuída ao fracionamento dos elementos, durante o processo de alteração.

Topp et al. (1984), em um trabalho relativo à distribuição vertical dos ETR em solos lateríticos do Suriname, observaram que os elementos La e Ce são fortemente enriquecidos em profundidades entre 2,5 a 5 metros, enquanto o enriquecimento mais pronunciado do Sm e do Eu ocorre próximo

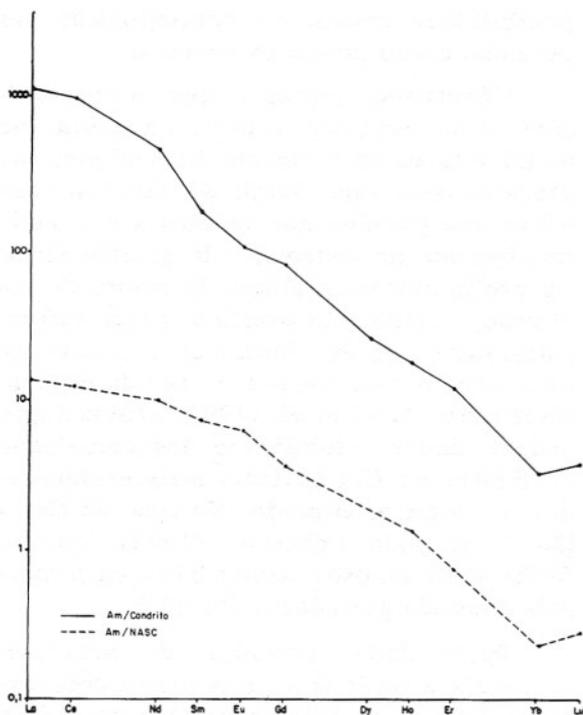


Figura 3 - Concentração de ETR em *Solanum lycocarpum* (Populações A e B) normalizada em relação aos condritos e aos folhelhos norteamericanos (NASC).

à base do perfil (11 m), e, em relação aos pesados, nenhum enriquecimento significativo foi constatado. Segundo estes autores, na medida em que todos os minerais primários foram dissolvidos durante o processo de alteração, a variável distribuição dos ETR deve ser, portanto, devida aos diferentes graus de mobilidade destes e, também, à capacidade de se incorporarem na estrutura dos minerais secundários. Como não há um enriquecimento de Sm e de Eu nas zonas superiores do perfil, deduzem que estes dois elementos têm maior mobilidade quando comparados ao La e ao Ce. Além disso, a ausência de concentração dos ETR pesados em toda a extensão do perfil parece indicar uma remoção dos mesmos, ou seja, uma ainda maior mobilidade para estes.

A comparação dos estudos de Topp et al. (*op. cit.*), e os dados biogeoquímicos destes pares, na região aqui considerada (Fig. 4), mesmo sendo por analogia, é válida porque parece reforçar a idéia destes autores, ou seja: pela Figura 4, observa-se que os ETR pesados (ou os intermediários) apresentam uma maior mobilidade que os leves, em um perfil de alteração, enrique-

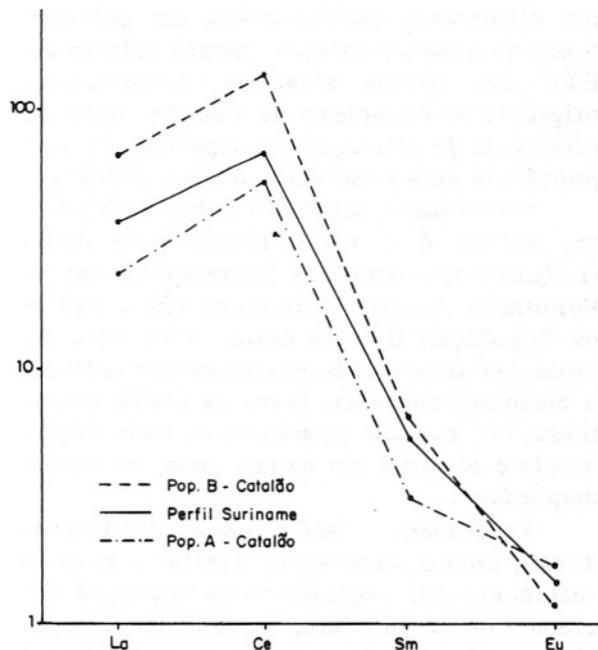


Figura 4 - Concentração média de La-Ce e Sm-Eu do perfil laterítico do Escudo Guiano (Topp et al., 1984) comparada com a concentração média de La-Ce e Sm-Eu das populações biogeoquímicas (A e B) de Catalão I.

cendo-se somente a profundidades maiores, região não atingida pelas raízes do vegetal.

Ainda, de acordo com Robinson et al. (1958), a razão $Ce/(La+Nd)$, tanto em rochas ígneas como em folhelhos, é da ordem de 1,0, sendo que baixas razões indicam que o Ce foi separado dos outros elementos do seu grupo. Isto porque, diferentemente dos demais ETR leves, o Ce passa de Ce^{3+} para Ce^{4+} . Este é precipitado, na forma de composto pouco solúvel e assim, não está disponível à planta. Portanto, o Ce somente permanece solúvel no solo, na sua forma trivalente, e mantém a sua abundância no conjunto dos ETR disponíveis, em ambiente redutor.

Na amostragem biogeoquímica de Catalão I, os exemplares da População A apresentam uma razão média de $Ce/(La+Nd)$ de 1,1, e na População B de 1,3, indicando portanto que o Ce se encontra em sua forma trivalente (e assim disponível) e abundante nas camadas mais superficiais do perfil de alteração.

Além disso, considerando-se as idéias de Nesbitt (1979), a absorção dos ETR pelos vegetais deve ocorrer na fase em que as soluções ácidas que percolam as camadas mais superficiais do solo removem es-

tes elementos, colocando-os em solução. Soma-se a isso o enriquecimento natural em ETR das rochas alcalinas, constituintes originais do Complexo de Catalão, onde os processos de alteração intempérica são responsáveis pela remobilização dos mesmos.

Outro dado sugestivo sobre as hipóteses acima, é o valor obtido pela razão (La/Lu)N nas amostras biogeoquímicas: na População A, esta varia entre 108 a 342, e na População B varia entre 177 a 840. As variações observadas nestas razões indicam o enriquecimento em leves na planta amostrada, ou seja, ela concentra os mais disponíveis e absorve em menor grau, os menos disponíveis.

Perel'man, 1966 (*apud* Fortescue, 1980), com o objetivo de avaliar o grau de influência dos organismos na migração dos elementos na biosfera, estabeleceu um parâmetro descritivo, bastante empregado em biogeoquímica, denominado Coeficiente Biológico de Absorção, assim representado: $BAC = 1_x/N_x$, onde 1_x é o conteúdo do elemento nas cinzas de plantas e N_x é o conteúdo do elemento no solo, rocha ou crosta terrestre. Este autor observou que os elementos mais intensamente absorvidos têm um valor de BAC acima de 100 n (onde n é um número qualquer entre 1 e 10), e aqueles fracamente absorvidos têm um valor tão baixo quanto 0,00 n. Segundo Fortescue (1980), o grau de concentração de um elemento na crosta, raramente está diretamente relacionado com a sua absorção pelos organismos. Por exemplo, o alto BAC para ânions como P, S e Cl, que são fortemente absorvidos pela planta, contrasta com o baixo BAC para os cátions Si, Al e Fe, muito pouco absorvidos.

Brooks (1972), usando este coeficiente para elementos maiores, menores, traço e ETR, constata que os valores de BAC, para os elementos essenciais às plantas, são geralmente bem mais altos que o BAC dos demais. Para o caso dos ETR, o valor de BAC obtido por este autor foi de 0,03.

Em Catalão I, o BAC da espécie amostrada, usando-se como referência os valores do NASC (pelos motivos já acima mencionados), apontou um valor para os ETR leves de 11,5 e, para os pesados, de 0,38, evidenciando, portanto, uma forte absorção dos primeiros, e uma pouco significativa dos segundos. Este fato leva a crer que o maior enriquecimento em leves, na planta, está diretamente relacionado à maior dis-

ponibilidade destes, em contraposição aos pesados, muito pouco absorvidos.

Observa-se, portanto, que as constatações acima expostas, reforçam a teoria que os ETR leves permanecem disponíveis, nas camadas mais superficiais do solo, ao contrário dos pesados que tendem a sair mais rapidamente do sistema, indo se concentrar em profundidades maiores do manto de alteração, região não sondada pelas raízes, particularmente de plantas com características xerofíticas, como é o caso da espécie amostrada. Pagel et al. (1992) afirmam que dada a maior solubilidade dos complexos de ETRP, os ETRL ficam mais enriquecidos no material alterado. No caso de Catalão I, segundo Imbernon (1993), são os fosfatos aluminosos secundários, os principais minerais portadores dos ETR.

Pelos dados extraídos de Imbernon (*op. cit.*), a razão (La/Lu)N para a cobertura superficial do maciço de Catalão I é de 170; para as amostras de laterita, a razão é de 185 a 287 e, para o saprólito é de 183 a 396. Para os vegetais, a razão encontrada é de 345. No caso de (La/Yb)N, para a cobertura superficial esta razão apresenta um valor de 133; para a laterita, de 120 a 259 e, para o saprólito, de 128 a 290. No caso dos vegetais, o valor é de 516.

Pelas conclusões de Imbernon (*op. cit.*), há um enriquecimento progressivo e uniforme dos ETR em direção às camadas mais superficiais do perfil de alteração de Catalão I, sendo o padrão de distribuição desses elementos, nos materiais de alteração, herdado da rocha-mãe.

Os vegetais, pelas razões (La/Lu)N e (La/Yb)N confirmam este padrão, o que leva a se concluir que: assim como os materiais de alteração refletem o padrão da rocha, as plantas refletem o padrão de distribuição dos ETR nas camadas mais superficiais do perfil.

Segundo Turner & Whitfield, 1979, *apud* Henderson, 1984, em materiais biogênicos (carapaças, conchas, etc.), os ETRL são incorporados mais prontamente que os ETRP. Este fato é atribuído ao efeito do número de coordenação (maior nos ETRL) predominando sobre o efeito do poder de polarização, que aumenta com o número atômico. Comparativamente, é possível que a absorção "preferencial", dos ETRL, pela planta, seja decorrente de processos dessa natureza.

CONCLUSÕES

1. Os vegetais, no caso, *Solanum lycocarpum*, apresentam um padrão de ETR, semelhante aos alteritos e solos em Catalão, herdados da rocha original;
2. Não há um fracionamento conspícuo dos diferentes ETR, mas observa-se um enriquecimento em ETRL nos vegetais, atribuído à maior lixiviação dos ETRP para as camadas mais profundas, ficando nas camadas mais superficiais, os ETRL, que no caso, se tornam mais disponíveis;
3. O coeficiente biológico de absorção (BAC) (Brooks, 1972) é de 11,5 para os ETRL e 0,38 para os ETRP, enquanto, segundo o autor acima, é de 0,03 para os ETR em geral;
4. A razão $Ce/(La+Nd)$, tanto para a População A (1,0) como para a População

- B (1,3) é cerca de 1, mostrando que o cério, na forma de Ce^{3+} , é absorvido pela planta e mais na População B;
5. As razões $(La/Lu)N$ variam, para a População A, de 108 a 342 e, para a População B, de 177 a 840. Representam não somente o enriquecimento em ETRL, mas também, maior absorção pela maior concentração de ETR no substrato;
6. Por fim, é possível que a absorção preferencial dos ETRL pela planta seja decorrente de processos semelhantes aos que ocorrem em materiais biogênicos, onde esses elementos são incorporados mais prontamente que os ETRP, fato este que é atribuído ao efeito do número de coordenação (maior nos ETRL) que predomina sobre o efeito do poder de polarização, que aumenta com o número atômico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROOKS, R.R. (1972) Geobotany and Biogeochemistry in Mineral Exploration. Harper & Row Pub., New York, 290p.
- CARVALHO, W.T. & BRESSAN, S.R. (1989) The phosphate deposit of Catalão ultramafic alkaline complex, Goiás, Brazil. In: A.J.G. Notholt, R.P. Sheldon, D.F. Davidson (Eds.) Phosphate Deposits of the World. 2: 104-110.
- EVANS, C.H. (1990) Biochemistry of the Lanthanides. Plenum Press, vol. 8, 444p.
- FORTESCUE, J.A.C. (1980) Environmental Geochemistry - A Holistic Approach. Springer Verlag, New York, 347p.
- HENDERSON, P. (1984) Rare Earth Elements Geochemistry. Developments in Geochemistry, Elsevier, Amsterdam, vol. 2, 510p.
- IMBERNON, R.A.L. (1993) Evolução geoquímica e mineralógica dos produtos de alteração intempélica sobre as rochas do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I, Goiás. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências/USP, 132p.
- KABATA PENDIAS, A. & PENDIAS, H. (1984) Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Florida, 250p.
- LOTTERMOSER, B.G. (1990) Rare earth element mineralisation within the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia. Lithos, 24: 151-167.
- McLENNAN, S.M. (1989) Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary process. In: B.R. Lipin & G.A. McKay (Eds.) Geochemistry and Mineralogy of Rare Elements. Miner. Soc. Am., vol. 21, Washington, D.C., 348p.
- MILTON, M.C.; MURATA, K.J.; KNETCHEL, M.K. (1944) Weinschenkite, yttrium phosphate dihydrate from Virginia. Am. Mineral., 29: 92-107.
- NESBITT, H.W. (1979) Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. Nature, 279: 206-210.
- PAGEL, M.; BRAUN, J.J.; MULLER, J.P. (1992) Mécanismes de fractionnement géochimique de terres rares, de l'uranium et du thorium lors altérations supergenes. In: Séminaire ORSTOM, Bondy, 1990. Collection Colloques et Séminaires, Paris, ORSTOM, 1992, p. 219-226.
- ROBINSON, W.O.; BASTRON, H.; MURATA, K.J. (1958) Biogeochemistry of the rare earth elements with particular reference to hickory trees. Geochim. Cosmochim. Acta, 14(1/2): 55-67.
- TAYLOR, S.R. & McLENNAN, S.M. (1988) The significance of the rare earths in geochemistry and cosmochemistry. In: K.A. Gschneider Jr. & L. Eyring (Eds.) Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. Elsevier, Amsterdam, 11: 485-578.
- TOPP, S.E.; SALBU, B.; ROALDSET, E.; JORGENSEN, P. (1984) Vertical distribution of trace elements in laterite soil (Suriname). Chem. Geol., 47(1/2): 159-174.