

Absorção e Fracionamento dos Elementos Terras Raras por Vegetais: Estudo Comparativo em Plantas Ocorrentes em Diferentes Contextos Geológicos

Absorption and Fractionation of Rare Earth Elements by Plants: a Comparative Study of Plants in Diverse Geological Contexts

Maria do Carmo Lima e Cunha (maria.cunha@ufrgs.br), Lauro Valentim Stoll Nardi (lauro.nardi@ufrgs.br), Milton Luiz Laquintinie Formoso (milton.formoso@ufrgs.br)
Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica - Instituto de Geociências - UFRGS
Av. Bento Gonçalves 9.500 - Caixa Postal 15.001, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, BR

Recebido em 11 de setembro de 2009; aceito em 17 de dezembro de 2009

RESUMO

Neste trabalho busca-se analisar o padrão de distribuição dos Elementos Terras Raras presentes nos vegetais, em relação ao padrão desses elementos no substrato, independente das especificidades metabólicas e fisiológicas de cada tipo de planta e da natureza do substrato, visto tratarem-se de espécies diferentes ocorrendo em ambientes geoquímicos distintos. Teores medidos por ICP-MS e ICP-3500 em cinzas de folhas foram confrontados com teores obtidos em amostras de solo ou de rocha ocorrentes em contextos geológicos diversos, quais sejam: carbonatito lateritizado, sienito e rocha ultramáfica. Como resultado observou-se que as espécies vegetais refletem o padrão do substrato com algumas variações decorrentes do fracionamento dos elementos da série, pelas mesmas. No ambiente representado por sienito, o padrão de ETR nas plantas é muito similar ao da rocha e com igual enriquecimento em ETRL. No ambiente ultramáfico, de um modo geral, os teores na planta são maiores que os teores do solo, com um padrão de distribuição caracterizado pela feição de tetrade nos ETRP. Na cobertura laterítica do carbonatito, o padrão de distribuição na planta diferencia-se daquele do solo por teores significativamente mais baixos e ausência de anomalia positiva de Ce.

Palavras-chave: Elementos terras raras; Vegetais; Fracionamento; Sienito; Rochas ultramáficas; Carbonatito.

ABSTRACT

This work investigates the behavior of REE in some plant species in relation to the concentration levels of these elements in the substratum, independent of the metabolic and physiological specificities of each type of plant and of the nature of the geochemical environment. REE concentrations of leaf ashes determined by ICP-MS e ICP-3500 techniques had been compared with the concentrations of the soil or rock samples of different geologic contexts such as carbonatitic, syenitic and ultramafic environments. In the syenitic environment the REE patterns in leaf ash are similar to those of the whole rock, reproducing the LREE enrichment. In the ultramafic environment the leaf ash contents are higher than those of soils, with REE patterns displaying the W-type tetrad effect. In the lateritic covering of the carbonatite leaf ash patterns have lower REE contents and lack positive Ce anomalies. The results show that the diverse species reflect the REE patterns of the substratum with some variations, such as the tetrad effect, resulting from the fractionation of the elements of the series by the plants.

Keywords: Rare earth elements; Plant species; Fractionation; Syenite; Ultramafic rocks; Carbonatite.

INTRODUÇÃO

Estudos sobre a absorção, acúmulo e distribuição dos elementos terras raras nos vegetais são pertinentes, considerando-se a importância direta ou indireta desses na cadeia alimentar. Nos países orientais, em especial na China, a biogeoquímica dos ETR tem sido motivo de pesquisas mais aprofundadas visto que o amplo uso desses elementos na agricultura vem causando um acúmulo excessivo no solo, o que pode acarretar danos ambientais pelo desconhecimento de seus efeitos no meio e, por consequência, nos organismos vivos (Ding et al., 2005; Wang et al., 2001; Brioschi et al., 2009).

Sob condições naturais, os vegetais geralmente absorvem pouca quantidade de ETR. A concentração nas plantas varia entre 1 e 45 ppm, em peso de cinzas (Kabata-Pendias e Pendias, 1984). Entretanto, algumas espécies são capazes de acumular altos teores apesar da baixa solubilidade desses elementos (Milton, Murata, Knetchel, 1944); Laul e Weimer, 1982 (apud Evans, 1990). Os primeiros registros relativos ao transporte e acúmulo de ETR em tecidos vegetais são reportados por Robinson, Bastron, Murata (1958), seguido pelos trabalhos de Dunn (1983b) e Markert et al. (1989).

Neste trabalho, busca-se analisar o padrão de distribuição dos ETR presentes nos vegetais em relação ao padrão desses elementos no substrato, independente das especificidades metabólicas e fisiológicas de cada tipo de planta e da natureza do substrato, visto aqui tratar-se de espécies diferentes, ocorrendo em ambientes geoquímicos distintos. Ressalta-se que o estudo não visa à prospecção geoquímica, mas sim a um entendimento sobre o comportamento biogeoquímico dos ETR uma vez que as plantas, ao absorver as soluções do solo, refletem a mobilidade dos elementos químicos na rizosfera.

MATERIAL E MÉTODOS

Teores medidos em cinzas de folhas de espécies vegetais foram confrontados com os teores obtidos em amostras de solo ou de rocha ocorrentes em diferentes contextos geológicos, quais sejam: carbonatito lateritizado, sienito e rocha ultramáfica.

As espécies vegetais *Scoparia montevidensis* (Scrophulariaceae) e *Adiantopsis cf. chlorophylla* (Pteridofita) representam as amostras vegetais coletadas em solos de rochas ultramáficas da região de Pedras Pretas, município de São Sepé, RS; as espécies *Dodonea viscosa* (Sapindaceae) e *Scoparia montevidensis* representam as amostras coletadas em solos de rochas sieníticas da região de Piquiri, Cachoeira do Sul, RS, e a espécie *Chusquea sp.* (Poaceae) representa as amostras coletadas em solos de carbonatito lateritizado proveniente de Lages, SC.

A preparação analítica prévia das amostras de plantas, solo e rocha foi feita de acordo com os procedimentos usados em geoquímica e biogeoquímica (Brooks, 1983). As amostras de planta foram secadas em estufa a 80°C e após submetidas à calcinação, a uma temperatura de 450-500°C, por um período de 6 a 8h. Das cinzas resultantes, 0,5 g foram digeridas com HClO₄-HNO₃-HCl-HF e analisadas por ICP-MS no Actlabs, Canadá (sienito e ultramáfica), com limite de detecção de 0,002 (La); 0,01 (Ce); 0,002 (Pr, Nd); 0,001 (Sm, Eu); 0,01 (Gd); 0,001 (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) e MR V7A, e por ICP-3500, com limite de detecção de 0,02 (La, Nd, Gd); 0,03 (Sm); 0,08 (Ce); 0,001 (Eu, Lu); 0,002 (Yb); 0,003 (Ho); 0,005 (Dy, Tm) e 0,008 (Er), na Geosol, Minas Gerais (carbonatito). O conteúdo de ETR dos dois meios amostrais foi padronizado pelo conteúdo de ETR do condrito C₁ (Evensen, Hamilton, O' nions, 1978), conforme o método geoquímico usual.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os valores médios referentes a concentração dos ETR nos diferentes tipos de amostras de planta, de solo e de rocha estão sumarizados na Tabela 1.

Pelos dados apresentados na Tabela 1, percebe-se que:

1. No ambiente de ocorrência do sienito, é a espécie *Scoparia montevidensis* que melhor reproduz a concentração dos ETR relativamente aos teores da rocha. No entanto, ambas as espécies apresentam o valor da razão ETRL/ETRP maior que o valor mostrado pela rocha, evidenciando maior absorção dos ETRL.

2. No ambiente ultramáfico, tanto *S. montevidensis* como *Adiantopsis cf. chlorophylla* apresentam valores mais altos de ETR em relação aos teores das amostras de solo e a razão ETRL/ETRP, mais elevada nas plantas, igualmente comprova que estas absorvem mais os elementos terras raras leves, comparativamente ao valor da razão obtida para as amostras de solo.

3. No ambiente do carbonatito, a planta amostrada (*Chusquea sp.*) concentra os ETR em proporções bem inferiores aos valores obtidos para as amostras de solo, embora mantenha um comportamento semelhante ao do solo em relação ao valor da razão ETRL/ETRP.

Substrato sienítico

Na área de ocorrência do sienito (Figura 1), as espécies *Scoparia montevidensis* e *Dodonea viscosa* apresentam teores de ETRL mais altos que os ETRP, à semelhança do que ocorre na rocha, ou seja, os ETR nas plantas exibem o mesmo padrão da rocha subjacente, embora as duas espécies apresentem uma sutil anomalia positiva de

Gd, também constatada por Ding et al. (2005) e Xu et al. (2003) em plantas.

Para esses autores, esta anomalia é considerada um fato inesperado visto que no meio mineral o Gd, em geral, não fraciona relativamente aos outros ETR. Embora seja um fenômeno ainda não compreendido, a anomalia positiva de Gd pode ser considerada um importante indicador do fracionamento dos ETR pesados nas plantas (Xu et al., 2003). Além disso, a detecção de anomalias positivas de Gd em efluentes de estações de tratamento de esgoto (Knappe et al., 2001) representa um novo indicador da contaminação por fertilizantes no sistema aquático urbano.

Com relação ao comportamento geoquímico do Gd, reportamo-nos a McLennan (1994), que refere um significativo aumento da estabilidade dos níveis eletrônicos dos lantanídeos que têm o nível 4f 50% preenchido - Gd - e totalmente preenchido - Lu. Em menor grau, observa o mesmo autor, constata-se o mesmo quando ocorre o preenchimento de 25% - Nd, Pm, e 75% - Ho, Er. Configura-se assim, uma periodicidade nos padrões de elementos terras raras decorrente destas discontinuidades para os elementos citados, denominada efeito tétrade. Sastri et al. (2003) relacionam o efeito tétrade à possibilidade destes elemen-

tos formarem complexos. Decorre daí que um meio lixiviado por fluídos que complexem as terras raras, ficará com um padrão onde Nd, Gd, Ho-Er e Lu estarão relativamente enriquecidos - padrão tipo W, já que estes elementos formam complexos com maior dificuldade. Já o fluido onde as terras raras ocorrem sob a forma de complexos possuirão padrões do tipo M, complementares do W e empobrecidos nos elementos citados.

Bau (1999) constatou que a interação de águas naturais com oxyhidróxidos de Fe pode produzir anomalias positivas de Y, La, Gd, e Lu e também padrões tipo W nas amostras das soluções, enquanto os precipitados de oxyhidróxidos de Fe podem mostrar padrões com anomalias negativas do tipo M. Sugere-se a partir destes argumentos, que as anomalias positivas de Gd e Er, observadas nas amostras de plantas coletadas em substrato sienítico, são adquiridas das soluções absorvidas, provavelmente possuidoras de padrões de ETR do tipo-W como observado por Bau (1999). Esses padrões seriam causados pela precipitação de complexos de ETR durante o intemperismo, provocando o enriquecimento relativo de Gd e Er nas soluções com correspondente enriquecimento nas plantas.

Tabela 1. Médias dos Elementos Terras Raras nas espécies vegetais coletadas em diferentes ambientes geoquímicos (ppm em peso de cinzas).

<u>Geologia</u>	<u>Espécie</u>	<u>Espécie</u>	<u>Substrato</u>
Sienito	<i>S. montevidensis</i>	<i>D. viscosa</i>	Rocha
ΣETR	559,86	61,07	425,12
ΣETRL	537,90	58,85	407,23
ΣETRP	21,74	2,22	18,23
ΣETRL/ETRP	24,74	26,50	22,33
<u>Geologia</u>	<u>Espécie</u>	<u>Espécie</u>	<u>Substrato</u>
R. Ultramáfica	<i>S. montevidensis</i>	<i>A. cf. chlorophylla</i>	Solo
ΣETR	35,71	49,17	8,50
ΣETRL	39,34	56,94	4,76
ΣETRP	3,10	4,34	0,58
ΣETRL/ETRP	12,69	13,12	8,20
<u>Geologia</u>	<u>Espécie</u>	<u>Substrato</u>	
Lat./Carbonatito	<i>Chusquea sp.</i>	Solo	
ΣETR	23,98	2.316,50	
ΣETRL	22,95	2.231,80	
ΣETRP	0,90	84,75	
ΣETRL/ETRP	26,64	26,33	

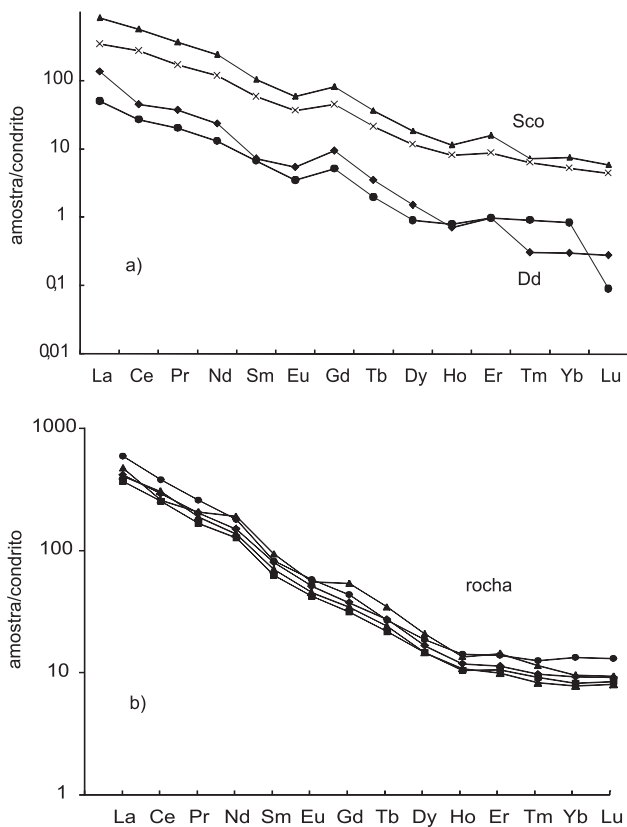


Figura 1. a. distribuição dos ETR nas espécies *Scoparia montevidensis* (Sco) e *Dodonea viscosa* (Dd); b. distribuição dos ETR em amostras de rocha sienítica (Sienito Piquiri, RS).

Substrato ultramáfico

No ambiente ultramáfico, o padrão de distribuição dos ETR nas plantas (V2A, V2B, V3A e V3B) difere do padrão do solo (Figura 2). Os valores nas espécies vegetais, com exceção da amostra V2A, são mais elevados e o padrão de distribuição dos ETR lembra a feição de tetrade em W pelo leve enriquecimento em Gd e Er (Figura 2), não observada nas amostras de solo. Segundo Fu, Akagi e Shinotsuka (1998) e Fu et al. (2001), este padrão é comumente notado em plantas terrestres e pode se originar durante o transporte dos ETR do ambiente para a planta. Já para Liang et al. (2008), os mecanismos que originam a feição de tetrade em W nas partes aéreas das plantas permanecem ainda pouco claros. Segundo esses autores, o fracionamento dos ETR nas plantas é devido ao efeito combinado de fatores físicos, químicos e biológicos, indicando que alguns parâmetros geoquímicos convencionais como $(La/Yb)_{CN}$, $(La/Lu)_{CN}$ ou $(Ce/Lu)_{CN}$ usados para medir o grau de fracionamento entre o Σdo grupo do Ce e grupo do Y, podem ter algumas limitações quando aplicados ao sistema solo-planta.

Substrato carbonatítico

No ambiente laterítico do carbonatito, o padrão de distribuição dos ETR na planta (*Chusquea sp.*) é semelhante ao padrão do substrato, embora com teores significativamente mais baixos (Figura 3). Diferencia-se deste por uma sutil anomalia negativa de Eu e pela ausência de anomalia positiva de Ce observada nas amostras de solo.

A partir das observações acima, nota-se que além das variáveis físico-químicas do substrato que influenciam na distribuição dos ETR nas plantas, como o pH, por exemplo, as características bioquímicas individuais dos vegetais também o fazem. No presente estudo, no ambiente sienítico, o padrão de distribuição dos ETR em espécies diferentes é muito semelhante. Por outro lado, indivíduos da mesma espécie podem apresentar uma considerável variação na característica dos ETR, dependendo das propriedades químicas do substrato, como é o caso de *S. montevidensis* que no ambiente ultramáfico apresenta um padrão de distribuição diferente daquele mostrado quando ocorrente no ambiente sienítico (Figuras 1e 2). Já os estudos relativos à concentração dos ETR em *Solanum lycocarpum* (Maria, Figueiredo, Ceccantini, 2000) revelam um padrão de distribuição muito semelhante, mesmo quando os indivíduos desta espécie ocorrem em substratos distintos.

Dados da literatura sugerem que várias espécies de plantas de um mesmo lugar absorvem os ETR de modo diverso, apesar da similaridade de suas propriedades químicas, numa razão não constante. Wytttenbach et al. (1998) relata a experiência com duas espécies ocorrendo em um mesmo ambiente: ambas apresentaram significativa diferença, não somente em relação aos teores do solo, como também entre si e entre indivíduos de mesma espécie. A

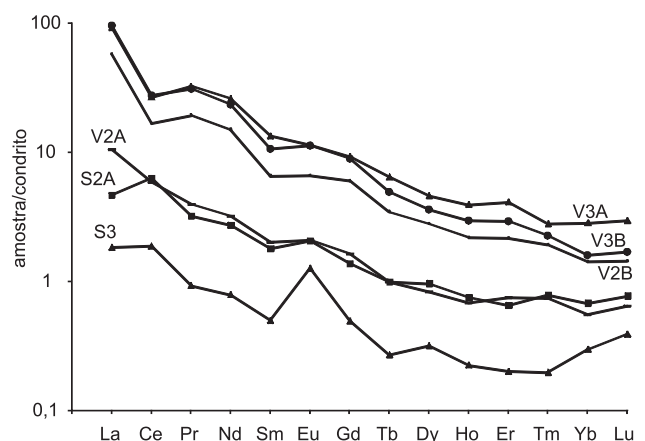


Figura 2. Padrão de distribuição dos ETR nas espécies *S. montevidensis* (V2A; V2B) e *A. cf. chlorophylla* (V3A; V3B) e nos solos (S2A; S3) de rochas ultramáficas (Pedras Pretas, RS).

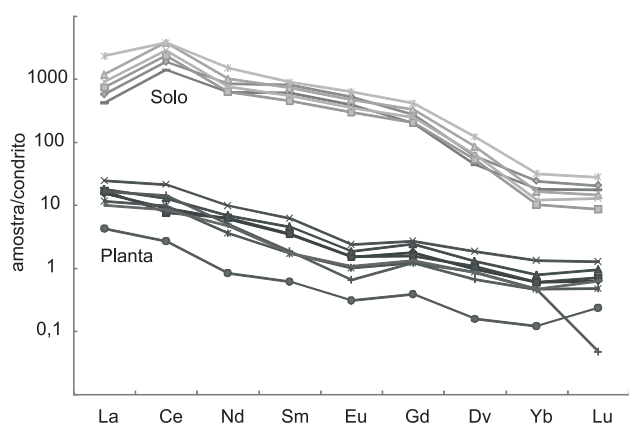


Figura 3. Padrão de distribuição dos ETR em *Chusquea sp.* e nos solos lateríticos do carbonatito de Lages, SC.

partir disso, concluem que os principais agentes responsáveis pelo padrão de distribuição e fracionamento dos ETR em várias espécies vegetais são os tipos e a concentração dos ligantes orgânicos presentes na rizosfera.

O padrão dos ETR tanto na raiz como na folha e no solo pode diferir um do outro, embora nas raízes de várias espécies seja muito similar, lembrando o padrão observado nas águas superficiais (Zhang et al., 2002). Segundo esses autores, não existe fracionamento significativo entre os ETR durante o processo de absorção da solução do solo pelas raízes. A variação na abundância relativa dos elementos individuais da série ocorreria durante o transporte e a deposição nos tecidos vegetais, o que é corroborado por Liang et al. (2008) que atribuem aos ligantes internos um papel importante no enriquecimento dos ETR nas partes aéreas das plantas. Estudos feitos por Semhi, Chaudhuri e Clauer (2009) em duas espécies da mesma planta, uma cultivada e outra silvestre, mostram que a absorção dos ETR depende mais da espécie vegetal que da composição do substrato mineral e que o fracionamento dos elementos da série se dá durante a transferência destes da raiz para as partes aéreas.

Deduz-se, portanto, que a absorção e o fracionamento dos ETR nas plantas podem também ser decorrentes das atividades inerentes à ação dos ligantes, internos ou externos, além daqueles relacionados ao solo e/ou rocha. Embora o fracionamento dos ETR seja observado nas espécies vegetais, a maior parte dos estudos é feita em experimentos hidropônicos de laboratório, faltando ainda mais investigação sob condições naturais que endossem as afirmativas relativas a este processo. Vários são os fatores que impedem o entendimento sobre o fracionamento dos ETR em plantas sob condições naturais, tais como a baixa concentração (o que dificulta maior acurácia nos resultados analíticos), a complexidade dos solos e da rizosfera e a diversidade de espécies e de biótipos (Liang et al., op.cit.), daí a necessi-

dade de se encontrar áreas e plantas apropriadas de modo a tornar os estudos mais simplificados e viáveis.

Do ponto de vista dos benefícios dos ETR para os seres vivos é sabido que sob certas condições, baixas concentrações de pelo menos alguns dos elementos da série parecem favorecer o crescimento e a produtividade das plantas, embora os mecanismos fisiológicos que atuam neste processo permaneçam inconclusivos (Tyler, 2004). Do ponto de vista ambiental, concentrações de ETR decorrentes de atividades antrópicas parecem não ser muito úteis para fins de monitoramento, embora, sob o aspecto hidrogeológico, altos teores de Gd podem constituir uma excelente ferramenta para identificar misturas de água reciclada com águas de superfície e subterrânea (Knappe et al., 2005).

Sendo assim, acredita-se que toda e qualquer investigação relativa ao comportamento das plantas frente ao processo de absorção dos ETR é válida na medida em que novos dados podem contribuir para a melhor caracterização e compreensão do papel destes elementos no ciclo exógeno.

CONCLUSÕES

O estudo comparativo relativo a absorção dos ETR por espécies vegetais ocorrentes em distintos ambientes geológicos mostrou que as plantas, independente da espécie e/ou da natureza do solo onde crescem, refletem o padrão do substrato com algumas variações decorrentes do fracionamento dos elementos da série pelas plantas.

No ambiente representado por sienito, o padrão de ETR nas espécies *Dodonea viscosa* e *Scoparia montevidensis* é muito similar ao da rocha e com igual enriquecimento em ETRL.

No ambiente ultramáfico, de um modo geral, os teores de ETR em *S. montevidensis* e em *A. cf. chlorophylla* são maiores que os teores do solo, com um padrão de distribuição caracterizado pela feição de tetrade nos ETR.

Na cobertura laterítica do carbonatito, o padrão de distribuição dos ETR em *Chusquea sp.* diferencia-se daquele do solo por teores significativamente mais baixos e ausência de anomalia positiva de Ce.

As leves anomalias positivas de Gd e Er em padrões de ETR normalizados pelos valores condriticos, bem como suas semelhanças com padrões do tipo W, podem ser decorrentes da complexação dos ETR durante os processos de intemperismo e absorção das soluções pela planta, refletindo o efeito tetrade conforme discutido por Sastri et al. (2003) e Bau (1999) entre outros autores.

REFERÊNCIAS

BAU, M. Scavenging of dissolved yttrium and rare earths by precipitating iron oxyhydroxide: Experimental evidence

- for Ce oxidation, Y-Ho fractionation, and lanthanide tetrad effect. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 63, n. 1, p. 67-77, 1999.
- BRIOSCHI, L.; STEINMANN, M.; LUCOT, E.; PIERRET, M. C.; STILLE, P.; BADOT, P. M. Absorption and fractionation of REE by vegetation: A comparative field study on plants grown on granite, carbonate, and carbonatite. In: GOLDSCHMIDT CONFERENCE, 2009, Davos. *Abstracts...* Davos. 2009. p. A161.
- BROOKS, R. R. *Biological Methods of Prospecting for Minerals*. New York: Wiley & Sons, 1983. 322 p.
- DING, S. M.; LIANG, T.; ZHANG, C. S.; YAN, J. C.; ZHANG, Z. Accumulation and fractionation of rare earth elements (REEs) in wheat: controlled by phosphate precipitation, cell wall absorption and solution complexation. *Journal of Experimental Botany*, v. 56, n. 420, p. 2765-2775, 2005.
- DUNN, C. E. Biogeochemical Investigations in the northern Saskatchewan: preliminary data on tungsten, gold, platinum, rare earth and uranium. In: Summary of investigations (1983) *Saskatchewan Geological Survey*, Sak Energy Mines, Misc. Rep. v. 83, p. 106-122, 1983b.
- EVANS, C. H. *Biochemistry of Lanthanides*. New York: Pergamon Press, 1990. v. 8, 444 p.
- EVENSEN, N. M.; HAMILTON, P. J.; O'NIONS, R. K. Rare earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978. v. 42, p. 1199-1212.
- FU, F.; AKAGI, T.; SHINOTSUKA, K. Distribution pattern of rare earth elements in fern: Implication for intake of fresh silicate particles by plants. *Biology Trace Element Research*, v. 64, p. 13-26, 1998.
- FU, F.; AKAGI, T.; YABUKI, S.; IWAKI, M. The variation of REE (rare earth elements) patterns in soil-grown plants a new proxy for the source of rare earth elements and silicon in plants. *Plant and Soil*, v. 235, n. 1, p. 53-64, 2001.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. *Trace Elements in Soils and Plants*. Florida: CRC Press, 1984. 315 p.
- KNAPPE, A.; FRITZ, B.; PEKDEGER, A.; MOLLER, P.; DULSKI, P.; HUBBERTER, H. W. Using the REE Gadolinium as a New Tracer for Sewage Influence in Aqueous Urban Systems. In: CIDU, R. (Ed). *Water-Rock Interaction*. Rotterdam: Balkema, 2001. v. 1-2, p. 1111-1114.
- KNAPPE, A.; MOLLER, P.; DULSKI, P.; PEKDEGER, A. Positive gadolinium anomaly in surface water and ground water of the urban area Berlin, Germany. *Chemie der Erde*, v. 65, p. 167-189, 2005.
- LIANG, T.; DING, S.; SONG, W.; CHONG, Z.; ZHANG, C.; LI, H. A review of fractionations of rare earth elements in plants. *Journal of Rare Earths*, v. 26, p. 7-15, 2008.
- MCLENNAN, M. S. Rare earth element geochemistry and the "tetrad" effect. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 58, p. 2025-2033, 1994.
- MARIA, S. P.; FIGUEIREDO, A. M. G.; CECCANTINI, G. Determination of the contents and distribution characteristics of rare earth elements in *Soloanum lycocarpum* from tropical ecosystems in Brazil by INAA. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 244, n. 2, p. 303-306, 2000.
- MARKERT, B.; PIEHLER, H.; LIETH, H.; SUGIMAE, A. Normalization and calculation of lanthanide element concentrations in environmental samples. *Radiation and Environmental Biophysics*, v. 28, n. 3, p. 213-221, 1989.
- MILTON, M. C.; MURATA, K. J.; KNETCHEL, M. K. Weinschenkite, yttrium, phosphate hydrate from Virginia. *American Mineralogist*, v. 29, p. 92-107, 1944.
- ROBINSON, W. O.; BASTRON, H.; MURATA, K. J. Biogeochemistry of the rare earth elements with particular reference to hickory trees. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 14, n. 1-2, p. 55-67, 1958.
- SASTRI, V. S.; BÜNZLI, J. C.; PERUMAREDDI, J. R.; RAO, V. R.; RAYUDU, G. V. S. Modern Aspects of Rare Earths and Their Complexes. Elsevier, Amsterdam, 764 p. SCHALTEGGER, U. (2007) Hydrothermal zircon. *Elements*, v. 3, p. 51-79, 2003.
- SEMHI, K.; CHOUDHURI, S.; CLAUER, N. Fractionation of rare-earth elements in plants during experimental growth in varied clay substrates. *Applied Geochemistry*, v. 24, p. 447-453, 2009.
- TYLER, G. Rare earth elements in soil and plant systems: a review. *Plant and Soil*, v. 267, n. 1-2, p. 191-206, 2004.
- WANG, Z. J.; LIU, D. F.; LU, P.; WANG, C. X. Accumulation of rare earth elements in corn after

agricultural application. *Journal of Environmental Quality*, v. 30, p. 37-45, 2001.

WYTENBACH, A.; FURRER, V.; SCHLEPPI, P.; TOBLER, L. Rare earth elements in soil and in soil-grown plants. *Plant and Soil*, v. 199, p. 267-273, 1998.

XU, X; ZHU, W; WANG, Z. Y.; WITKAMP, G. J. Accumulation of rare earth elements in maize plants (*Zea mays* L.) after application of mixtures of rare earth elements and lanthanum. *Plant and Soil*, v. 252, p. 267-277, 2003.

ZHANG, Z. Y.; WANG, Y. Q.; LI, F. L.; XIAO, H. Q.; CHAI, Z. F. Distribution characteristics of rare earth elements in plants from a rare earth ore area. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 252, n. 3, p. 461-465, 2002.