

Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

Estudo da evolução dos processos de alteração supergênica de rocha granítica - Granito Independência - Morro do IPA, Porto Alegre, RS
Marcelo H. Neumann, André S. Mexias, Maria Lídia Vignol-Lelarge, Márcia Elisa B. Gomes, Alberto V. Inda Jr., Laurent Caner, Christophe Renac, Elissa F. Ramos
Pesquisas em Geociências, 39 (3): 213-229, set./dez., 2012.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/37376>

Publicado por

Instituto de Geociências



Portal de Periódicos
UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - set./dez., 2012.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Estudo da evolução dos processos de alteração supergênica de rocha granítica - Granito Independência - Morro do IPA, Porto Alegre, RS

Marcelo H. NEUMANN¹, André S. MEXIAS², Maria Lídia VIGNOL-LELARGE², Márcia Elisa B. GOMES², Alberto V. INDA Jr.³, Laurent CANER⁴, Christophe RENAC⁵ & Elissa F. RAMOS²

¹Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Caixa Postal 15001, CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: mhneumann@terra.com.br

²Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Caixa Postal 15001, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: andre.mexias@ufrgs.br, lidiavignol@ufrgs.br, marcia.gomes@ufrgs.br, assilesomar@hotmail.com

³Faculdade de Agronomia, Departamento de Solos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Caixa-Postal 15100, CEP: 90001-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: alberto.inda@ufrgs.br

⁴Université de Poitiers. 7, rue Albert Turpain 86022, Poitiers Cedex, França. E-mail: laurent.caner@univ-poitiers.fr.

⁵Université Sophia Antipolis. 250, rue Albert Einstein 06560, Valbonne Cedex, França. E-mail: christophe.renac@unice.fr

Recebido em 03/2011. Aceito para publicação em 12/2012.

Versão online publicada em 28/02/2013 (www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

Resumo - As rochas da superfície terrestre estão permanentemente expostas à ação de agentes naturais, como a água, as variações de temperatura, os gases atmosféricos e a ação dos seres vivos. Dentre a ação dos seres vivos, nos centros urbanos destaca-se a ação antrópica, que por vezes acaba por degradar os recursos naturais. Nesse contexto, entender os processos de transformação das rochas, para que se possa compreender a gênese e evolução dos solos, e assim, aperfeiçoar métodos para sua recuperação, torna-se imprescindível. Este estudo foi desenvolvido em um perfil de alteração de rocha granítica localizado na área urbana de Porto Alegre, onde foram coletadas oito amostras representativas dos diferentes níveis, da rocha ao solo. As amostras foram analisadas por difratometria de raios X (DRX), pelo método do pó na rocha total e na fração < 4 µm. A composição química foi determinada por fluorescência de raios X (FRX). Fragmentos das amostras foram observados no microscópio eletrônico de varredura (elétrons secundários) e no microscópio ótico. Os estudos mineralógicos e petrográficos mostraram a existência de pequena variação composicional vertical no perfil, essencialmente composto por quartzo, feldspato alcalino e caolinita, identificados em todos os horizontes, e illita/biotita identificadas nos horizontes saprolíticos. As análises através de imagens de elétrons secundários permitiram identificar ainda a presença de haloisita. A exsudação de ferro pelas lamelas da biotita observada no microscópio óptico marca o início da alteração supergênica no granito. Os dados de FRX mostram que a escolha do elemento imóvel de referência para verificar a existência ou não de enriquecimento dos elementos ao longo do perfil é muito importante, pois neste trabalho verificou-se que o alumínio tem um comportamento móvel, provavelmente associado às condições de acidez do solo.

Palavras-chave: alteração supergênica, Granito Independência, argilominerais.

Abstract - STUDY OF THE EVOLUTION OF SUPERGENE ALTERATION PROCESSES OF GRANITIC ROCKS - INDEPENDÊNCIA GRANITE - MORRO DO IPA, PORTO ALEGRE, RS. The rocks of the earth's surface are constantly exposed to the action of natural agents such as water, temperature variations, atmospheric gases and the action of living beings. Among the action of living beings, in the urban centers highlight the anthropogenic, which often ends up by degrading natural resources. In this context, understanding the processes of transformation of the rocks, you can understand the genesis and evolution of soils, and improve methods for their recovery. This study was conducted in a profile altered granitic rock located in the urban area of Porto Alegre, where eight samples were collected representing different levels, from rock to soil. The samples were analyzed by X-ray diffraction, by the powder method on whole rock and in the fraction <4 micrometers. The composition was determined by X-ray fluorescence. Fragments of the samples were observed by scanning electron microscopy (secondary electrons). Petrographic and mineralogical studies showed that there is little variation in the mineralogical composition of the vertical profiles, mainly composed of quartz, feldspar, and kaolinite, identified in all horizons, and illite/biotite, identified in saprolitic horizons. Analyzes whit secondary electron images allowed to identify even the presence of haloisite. The exudation of the iron plates of biotite observed in the optical microscope marking the beginning of supergene alteration in granite. X-ray fluorescence data show that the choice of the reference element property to check whether or not the enrichment of elements along the profile is very important since this paper was verified that Aluminum has a movable behavior probably associated with conditions soil acidity.

Keywords: supergene alteration, Independência Granite, clay minerals.

1. Introdução

As rochas da superfície terrestre estão permanentemente expostas à alteração supergênica provocada pela ação de agentes naturais, como a água, as variações de temperatura, os gases atmosféricos e a ação dos seres vivos. Dentre a ação dos seres vivos, nos centros urbanos destaca-se a ação antrópica, que acaba muitas vezes por degradar os solos (Peloggia, 1997; Manta *et al.*, 2002; Imperato *et al.*, 2003; Tang *et al.*, 2005; Morillo *et al.*, 2007; Shi *et al.*, 2008; Morton-Bermea *et al.*, 2009; CETESB, 2010).

Solos são sistemas abertos, dinâmicos, onde ocorrem adições (energia, partículas sólidas, água, O₂, MO, sais, etc.), remoções (energia, partículas sólidas, água, nutrientes, etc.), transferências (água, nutrientes, minerais, etc.) e transformações (minerais, MO, etc.) (Reichardt, 1988; Ruellan, 1988; Curi *et al.*, 1993; Miller, 1993).

A alteração supergênica depende do clima (chuva e temperatura), topografia, natureza da rocha (fraturas, textura e composição), influência da biosfera e do controle da drenagem do perfil. É um processo complexo que compreende desagregação física, decomposição química e decomposição biológica de rochas e minerais, transformando minerais de estrutura complexa em outros de estrutura mais simples (Langmuir, 1997; Melfi *et al.*, 1999; Formoso, 2006). A hidrólise dos silicatos associada ao intemperismo biológico é talvez o processo mais importante envolvido nessa transformação (Formoso, 2006).

O presente estudo busca, através da integração de diferentes técnicas e métodos, contribuir para caracterização desses processos de transformação. Nesse contexto, torna-se imprescindível entender os processos geoquímicos de transformação das rochas, para que se possa compreender a gênese e evolução dos solos, e assim, aperfeiçoar métodos para sua recuperação.

2. Área de estudo, materiais e métodos

A área de estudo está localizada ao lado do Instituto Porto Alegre de Educação (IPA), no bairro Bela Vista, na cidade de Porto Alegre, RS (Fig. 1). O substrato rochoso da região central da cidade de Porto Alegre é composto em sua maior parte por um corpo granítico definido por Granito Independência (Schneider *et al.*, 1974).

A principal exposição do Granito Independência está situada na antiga pedreira do Instituto Porto Alegre (IPA), de acordo com Hasenack *et al.* (2008).

O clima de Porto Alegre, segundo a classifica-

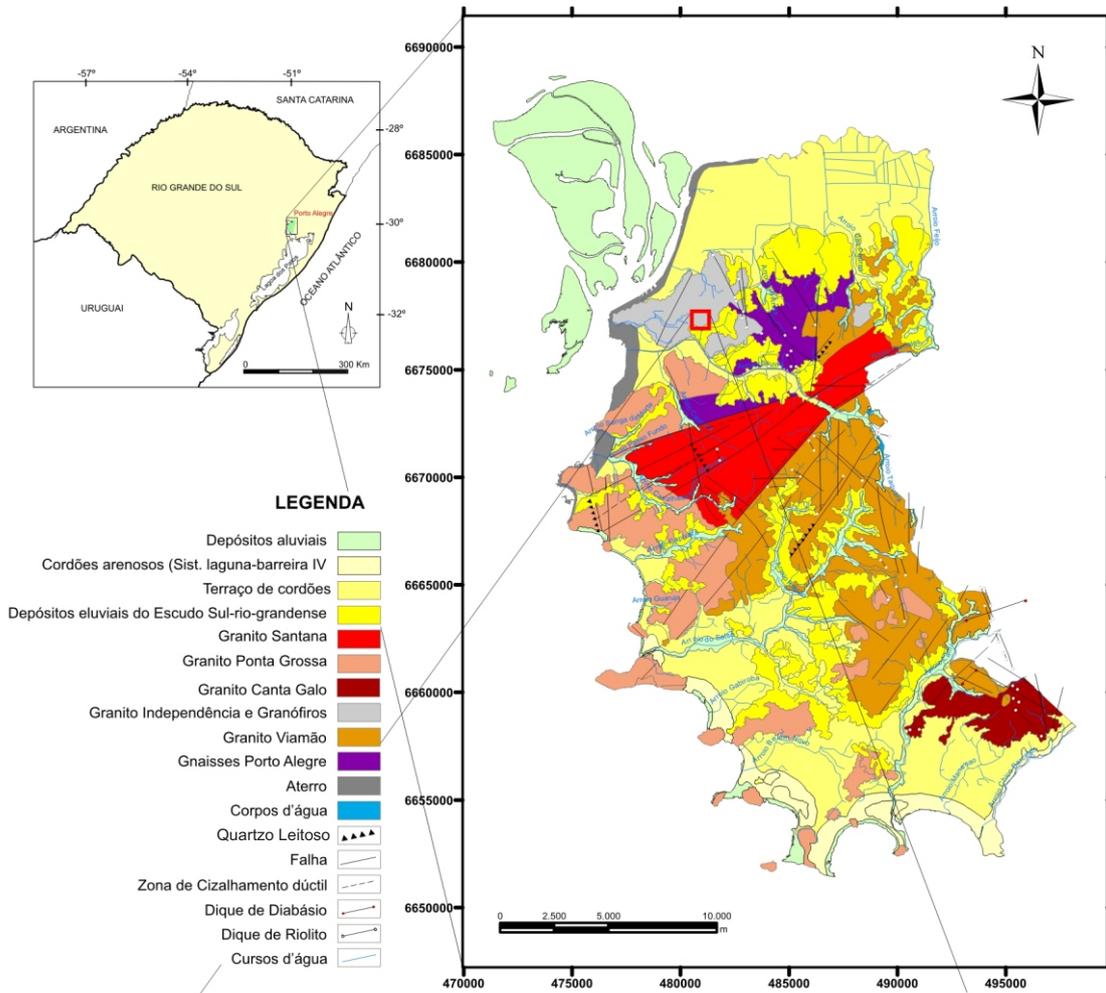
ção de W. Koppen, é subtropical úmido (Cfa). As temperaturas médias anuais extremas variam de 9 °C a 31 °C e a umidade relativa do ar média é de 76%. As chuvas são bem distribuídas, com média anual em torno de 1.300 mm. Setembro é o mês mais chuvoso, com média de 132 mm e novembro é o mês mais seco, com média de 79 mm.

Quando o material proveniente da alteração de rocha entra em contato com o ar (atmosfera), com a água (hidrosfera) e com a biosfera (matéria orgânica decomposta, plantas e animais vivos), torna-se organizado em padrões estruturais (solo), sob a influência das condições ambientais (Formoso, 2006).

À medida que o material de origem se transforma em solo, ele vai se diferenciando em camadas, mais ou menos paralelas as superfícies, camadas essas denominadas horizontes. O conjunto de horizontes A e B denomina-se *solum*, que pode ser definido como a parte do solo que sofre a influência das plantas e animais. Por sua vez, pode-se dividir o material de origem R em consolidado (rocha sã) e inconsolidado (saprólito). O Saprólito S caracteriza-se por apresentar as estruturas e texturas da rocha, e pode ser dividido em horizontes, de acordo com o grau de preservação (EMBRAPA, 1999). Nesse contexto, o perfil estudado apresenta em torno de 5,0 m de espessura, onde é possível distinguir os horizontes A e B (*Solum*), CR, S2, S1 e R. A figura 2 apresenta o perfil descrito com seus diferentes horizontes morfológicos, localização das amostras e metodologia de coleta das amostras inconsolidadas.

Ao longo do perfil foram coletadas 08 amostras representativas dos diferentes horizontes, desde a rocha sã (amostra 01) até o solo (amostra 08). As amostras foram analisadas petrográfica e texturalmente, por meio de microscopia ótica (MO). Para tanto, foram confeccionadas no Instituto de Geociências da UFRGS, lâminas delgadas da rocha sã; e no laboratório HydrASA (Hydrogéologie, Argiles, Sols et Altérations), da Universidade de Poitiers, França, lâminas delgadas do material inconsolidado. As amostras indeformadas foram coletadas com auxílio de anéis metálicos de bordos cortantes (EMBRAPA, 1997). O material inconsolidado foi previamente impregnado com resina (Delaye, 1984), o que possibilitou o seu corte e confecção das lâminas.

A partir da desagregação das amostras coletadas foram preparadas lâminas orientadas para caracterização mineralógica específica da fração < 4 µm por DRX. A lâmina de cada amostra foi analisada na condição natural, saturada com etileno-glicol (glicolada) e aquecida a 550 °C durante 2 h (calcinação). Foi utilizada a faixa de 2 °C até 28 °C. O passo (*step*) foi de 0,02 ° e o tempo de amostragem (*step*)



Fonte: Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre (Prefeitura Municipal de Porto Alegre, 2008)



Figura 1. Localização da área de estudo (Mapa geológico do Município de Porto Alegre, adaptado de Schneider *et al.*, 1974; Ramgrab *et al.*, 1995; Philipp, 1995).

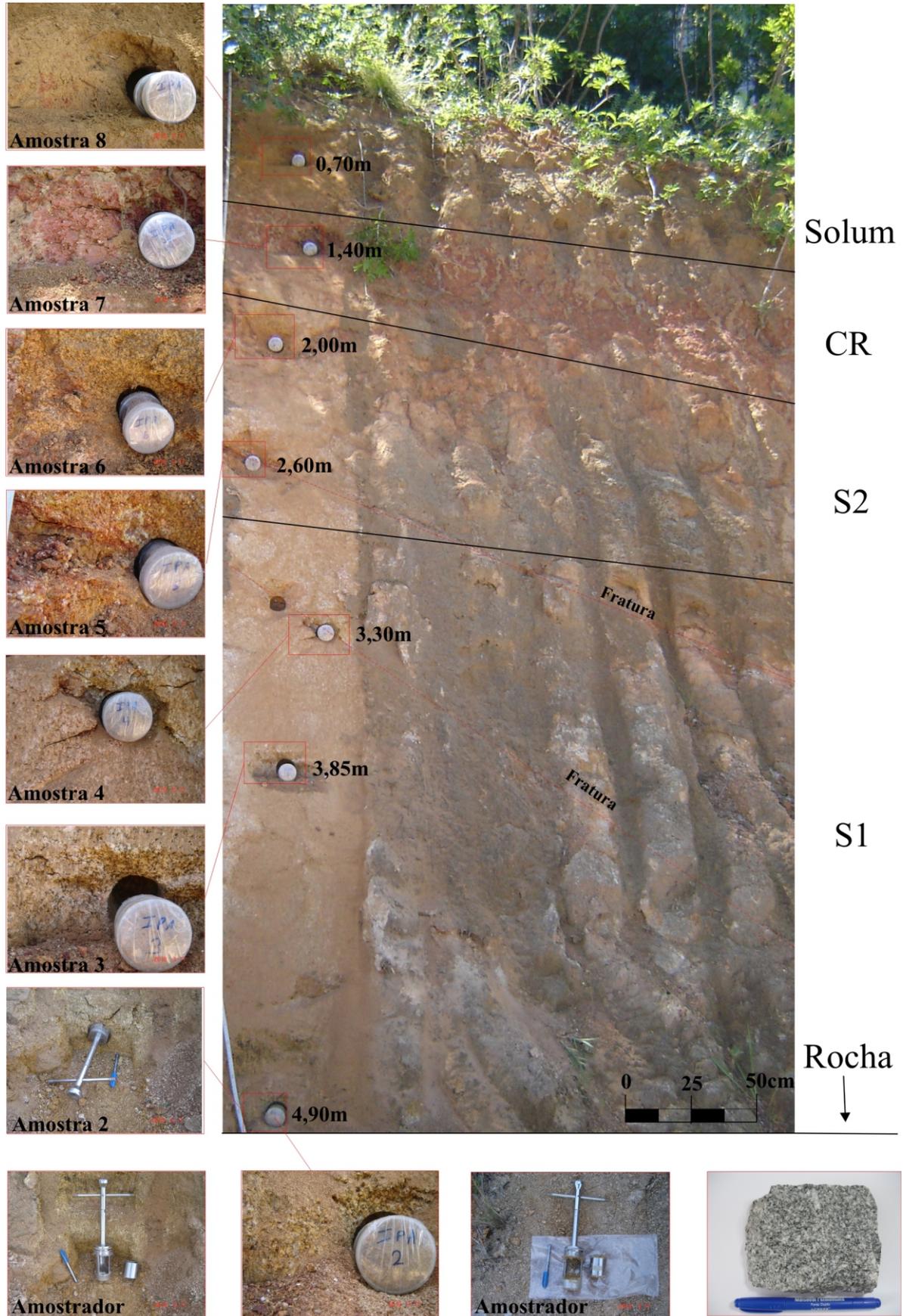


Figura 2. Perfil descrito e seus horizontes morfológicos.

time) foi 2 s nas análises das lâminas orientadas naturais e calcinadas e 3 s nas lâminas orientadas glicoladas (Alves, 1987; Albers *et al.*, 2002).

Com base nos difratogramas obtidos foi realizada avaliação semiquantitativa da mineralogia da rocha total e da mineralogia específica da fração < 4 µm. A proporção das fases minerais presentes foi calculada pela área do pico principal de cada fase mineral identificada

A partir da análise por DRX (pico hkl = 060) da fração < 0,5 µm foi possível determinar o parâmetro b. O material em suspensão depois de concentrado e seco foi pulverizado e analisado de forma não orientada nas condições de passo (step) de 0,02° e o tempo de amostragem (step time) de 10 s por passo.

Análises por DRX foram realizadas com o difratômetro Siemens Bruker-AXS D5000 do Centro de Estudos de Petrologia e Geoquímica (CPGq) do IG/UFRGS, equipado com goniômetro $\theta - \theta$. Na emissão de raios X é utilizado ânodo de cobre gerando radiação $\text{CuK}\alpha$, voltagem de 40 kV e intensidade de corrente de 25 mA.

Para obtenção de imagens tridimensionais aparentes de fragmentos das amostras foi utilizado equipamento para microscopia eletrônica modelo JEOL JSM-6060 do CME da UFRGS. Este equipamento opera com voltagem de aceleração de 0,3 a 30 kV (foi utilizada uma voltagem de 10 kV), resolução para imagem de ponto: 3,5 nm, faixa de magnificação de 18 X até 300.000 X e com estágio goniométrico motorizado de 5 eixos, eucêntrico em todas as posições, inclinação de amostras de -10° a +90° e rotação de 360°.

Análises químicas convencionais das amostras de rocha total por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) foram realizadas em pastilhas fundidas do material amostrado. Para confecção das pastilhas 0,3 g de amostra pulverizada foram misturados com 0,3 g de nitrato de lítio (LiNO_3), e 5,4 g de tetraborato de lítio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$). Esta mistura foi fundida em um cadinho de liga de platina a 1100°C e disposta em um molde de platina de 30 mm de diâmetro. A confecção das pastilhas e as análises químicas foram realizadas no Centre SPIN (Sciences des Processus Industriels et Naturels), ENSMSE (Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne), França, com auxílio de um espectrômetro SRS3400.

3. Resultados e Discussão

O perfil de alteração selecionado apresenta os horizontes “Solum”, “CR”, “S1”, “S2” e “R” bem definidos. O horizonte “Solum”, constituído pelo conjunto de horizontes A e B, tem espessura média em torno de 1 m, coloração marrom e presença de

matéria orgânica. O horizonte “CR” também tem espessura média em torno de 1 m e coloração vermelha devido à precipitação do Fe^{3+} mobilizado do horizonte “Solum”, pela ação de ácidos provenientes da decomposição da matéria orgânica presente naquele horizonte.

O solo do perfil pode ser classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006), pertencente a unidade de mapeamento São Jerônimo (Brasil, 1973).

O horizonte S2 tem espessura média em torno de 1 m e o horizonte S1 espessura média em torno de 2 m. Esses horizontes apresentam coloração em tons amarelo alaranjados. Nesses horizontes é possível observar a preservação de estruturas da rocha granítica. Na base do perfil encontra-se a rocha sã.

O granito tem coloração cinza clara a esbranquiçada, com pontuações escuras conferidas pela biotita. Quando alterado, adquire tons amarelados a alaranjados. Mostra textura equigranular média a grossa (3 - 6 mm), exibindo, localizadamente, textura inequigranular a equigranular fina a média (1 - 2 mm), cuja mineralogia é constituída por feldspato alcalino, plagioclásio, quartzo e biotita. Os contatos são gradacionais, com formas lobadas, irregulares a curvas. De acordo com sua composição o Granito Independência pode ser definido como um Sienogranito ou Monzogranito.

Em lâmina delgada observada ao microscópio óptico é possível observar que a mineralogia essencial da rocha sã é composta por feldspato alcalino subédrico, do tipo ortoclásio, com pouco microclínio, plagioclásio euédrico de cor branca, quartzo amebóide e biotita em agregados intersticiais. A biotita apresenta-se por vezes cloritizada (Fig. 3A) e o plagioclásio sericitizado. Os principais minerais acessórios são titanita, zircão, apatita, alanita, minerais opacos e turmalina.

No início da alteração supergênica a rocha adquire tons amarelados a alaranjados. Em lâmina delgada observa-se que isso ocorre devido à exsudação de ferro pela biotita (Fig. 3B).

Na amostra 02, proveniente da base do perfil, a presença de caolinita fibrosa em leque (Fig. 3C), demonstra que logo nos primeiros estágios da alteração já há formação de argilominerais, no caso a caolinita.

Ao longo do perfil observa-se a continuidade do processo de formação de argilominerais, o que é evidenciado nas lâminas das amostras 03 (Fig. 3D) e 04 (Fig. 3 E e F).

Na amostra 04 também se verifica maior fraturamento do quartzo e aumento da concentração de argilominerías, porém estes apresentam

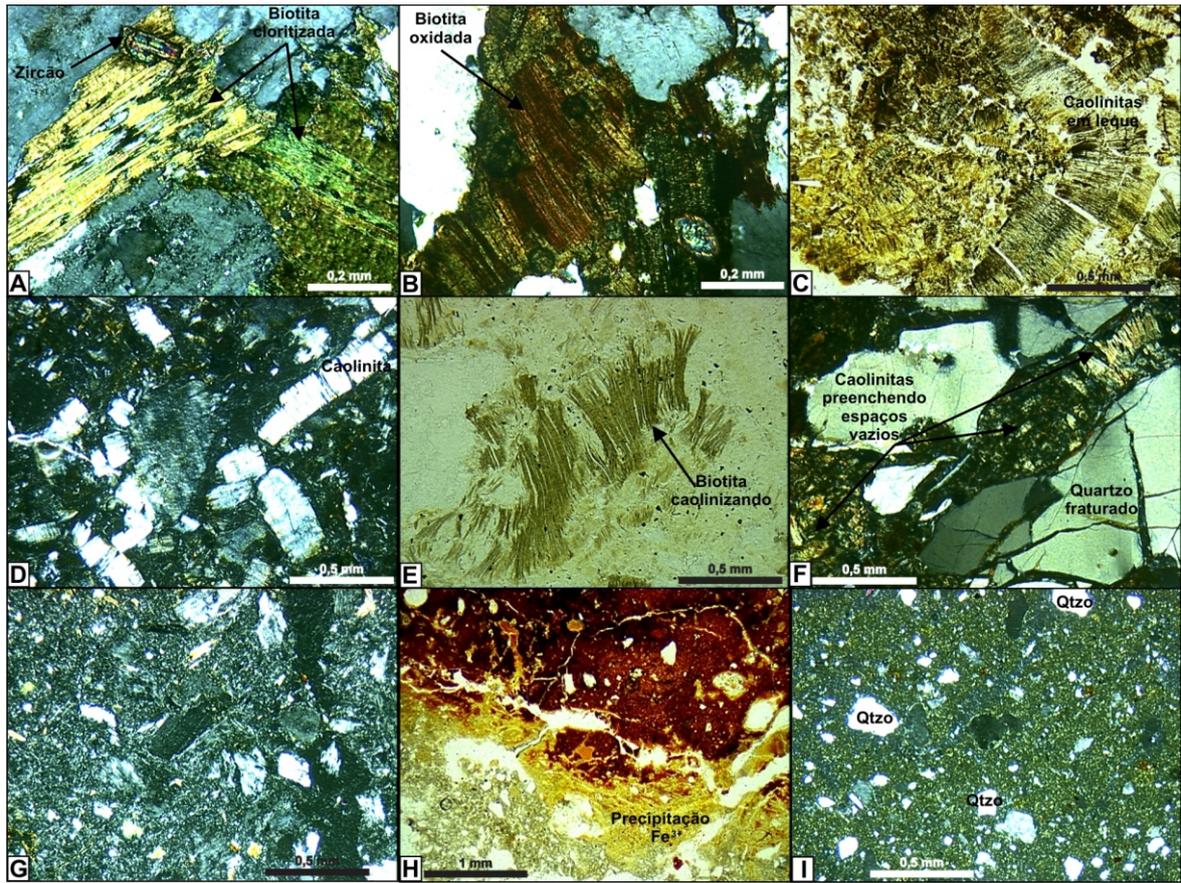


Figura 3. Fotomicrografias das lâminas delgadas ao longo do perfil: (A) Rocha sã, coesa, Luz Polarizada (LP); (B) Rocha intemperizada, coesa, LP; (C) Amostra 02, inconsolidada, horizonte S1, Luz Natural(LN); (D) Amostra 03, inconsolidada, horizonte S1, LP; (E) Amostra 04, inconsolidada, fratura no horizonte S1, LN; (F) Amostra 04, inconsolidada, LP; (G) Amostra 05, inconsolidada, fratura no horizonte S2, LP; (H) Amostra 07, inconsolidada, horizonte CR, LP; (I) Amostra 08, inconsolidada, horizonte solum, LP.

Método Pó

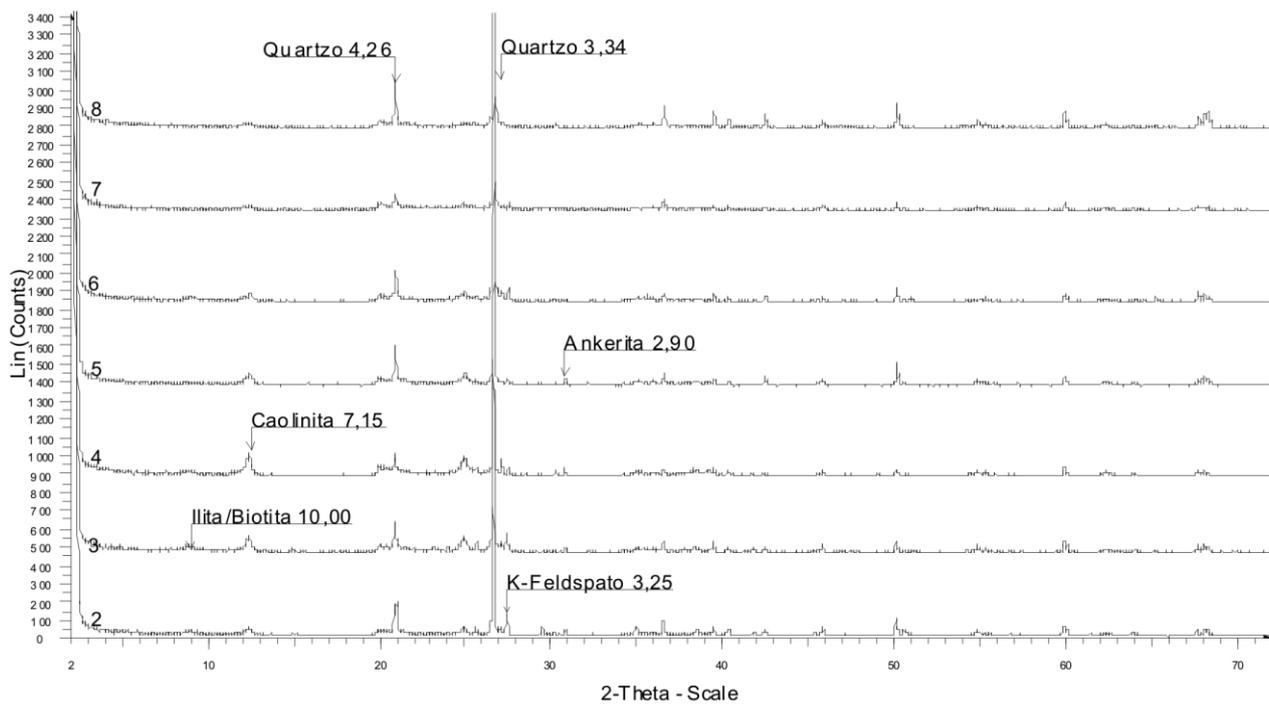


Figura 4. Difratoograma da rocha total dos horizontes do perfil de alteração, onde os números indicam o espaçamento interplanar em Å.

tamanhos menores. A amostra 05 (Fig. 3G) mostra matriz amorfa com ausência de estruturas e minerais caracterizáveis. Na amostra 06 observa-se o aumento da presença de caolinita em relação à amostra 05. Na amostra 07 é possível ver o avanço a pluma de precipitação do Fe³⁺ (Fig. 3H) lixiviado do *solum* pelos ácidos orgânicos presentes neste horizonte.

Por fim, na lâmina 08 (Fig. 3I), proveniente do horizonte de *solum*, restam ao microscópio ótico restos de minerais de quartzo imersos em matriz amorfa.

O perfil é cortado transversalmente por duas fraturas. A amostra 05, proveniente da fratura mais rasa, apresenta níveis de alteração superiores aos níveis observados em seu entorno. Isso se deve ao fato das fraturas caracterizarem caminhos preferenciais para percolação das águas pluviais, propiciando uma maior interação água-rocha.

De acordo com a mineralogia identificada por DRX (Fig. 4), os diferentes horizontes do perfil de alteração são constituídos essencialmente por quartzo, feldspato alcalino, ilita/biotita e caolinita. O quartzo, a caolinita e o feldspato alcalino estão em todos os horizontes. A ilita e/ou a biotita, que apresentam pico de $d \approx 10 \text{ \AA}$ (Guggenheim *et al.*, 2006), estão nos horizontes saprolíticos.

Na amostra 05, obtida na fratura, foi identificada a presença de ankerita, um carbonato de cálcio e ferro com magnésio e manganês (Branco, 2008), que pode ser encontrado em sedimentos associados ao calcário e ao dolomito (Sampaio & Matos de Almeida, 2005) e sob a forma de veios, concreções e grãos em depósitos hidrotermais (Biondi *et al.*, 2002). Nesse caso, a presença de ankerita em uma fratura do Granito Independência, indica que fluidos hidrotermais percolaram a rocha no passado, porque nesse contexto de clima úmido não precipitam carbonatos pedogênicos.

Nas análises por DRX das lâminas orientadas na fração $< 4 \mu\text{m}$ em todas as amostras foi identificada a presença de caolinita que nas formas natural e saturada com etilenoglicol apresenta o pico (hkl = 001) com $d \approx 7,14 \text{ \AA}$, e na forma calcinada (aquecida), se extingue (Fig. 5).

Nesta análise também foram identificados o quartzo e os argilominerais caolinita e ilita. A ilita apresenta o pico de $d \approx 10 \text{ \AA}$. Este não se altera quando a amostra é saturada com etilenoglicol, indicando ausência de fases expansíveis, e não colapsa quando a amostra é calcinada (Brindley & Brown, 1980).

Para investigar a presença de haloisita, um polimorfo hidratada do grupo da caolinita que ao expandir também tem o pico de $d \approx 10 \text{ \AA}$, as amostras orientadas foram saturadas com formamida.

Dentre os difratogramas resultantes apenas aquele referente à amostra 3, indicado na figura 6, mostrou aumento do pico de 10 \AA e redução do pico de 7 \AA .

A amostra 3 exibiu indícios da presença de haloisita, confirmada por difratometria de Raios-X para a reflexão 060 e parâmetro "b" (Fig. 7).

Os resultados obtidos indicaram um pico de $1,49 \text{ \AA}$, compatível com a reflexão 060 da haloisita (Brindley & Brown, 1980). A haloisita pode estar associada à caolinita, sendo possível sua identificação através do uso de microscópio eletrônico de varredura (MEV). Normalmente, a caolinita apresenta partículas hexagonais, enquanto a haloisita aparece com hábito tubular. As análises de imagens de elétrons secundários realizadas no MEV permitiram identificar a presença de caolinita, confirmando os dados observados ao MO e na DRX, e também a presença de haloisita (Fig. 8).

A haloisita é identificada sempre na forma de nanotubos posicionados sobre os grãos de caolinita. A caolinita, na forma de livros e leques, provavelmente está associada à alteração do feldspato e da biotita. Os resultados obtidos indicam que os dois processos de caolinização podem ter ocorrido.

A reação de transformação da biotita em caolinita é o inverso do que ocorre no processo de formação de ilitas (Lanson *et al.*, 2002). Na formação da caolinita ocorre a disponibilização de potássio em solução e a reação necessita de solução com baixo pH. Por sua vez, a reação de transformação do feldspato alcalino em caolinita representa a disponibilização de potássio em solução na forma de hidróxido e de sílica, que pode cristalizar como quartzo. A presença de haloisita 7 \AA sugere uma origem intempérica como processo dominante formador dos argilominerais, uma vez que a ocorrência da haloisita está sempre associada à caolinita.

Os resultados das análises químicas por FRX são apresentados na tabela 1 (óxidos) e na tabela 2 (elementos menores).

A avaliação dos resultados obtidos revela o comportamento geoquímico dos elementos durante a alteração supergênica. As análises químicas mostram que Fe e Al entre os óxidos se apresentam, a partir da superfície, empobrecidos no horizonte *solum* e enriquecidos no horizonte CR. Isso reflete o transporte vertical destes elementos na forma de complexos orgânicos. Si apresenta praticamente a mesma concentração no horizonte *solum* e na rocha sã, e empobrecimento nos demais horizontes. Isso demonstra que, embora o Si tenha sido lixiviado ao longo de todo o perfil, o foi de forma menos severa no horizonte superior.

Na, Ca, Sr, K e Rb são uniformemente empob-

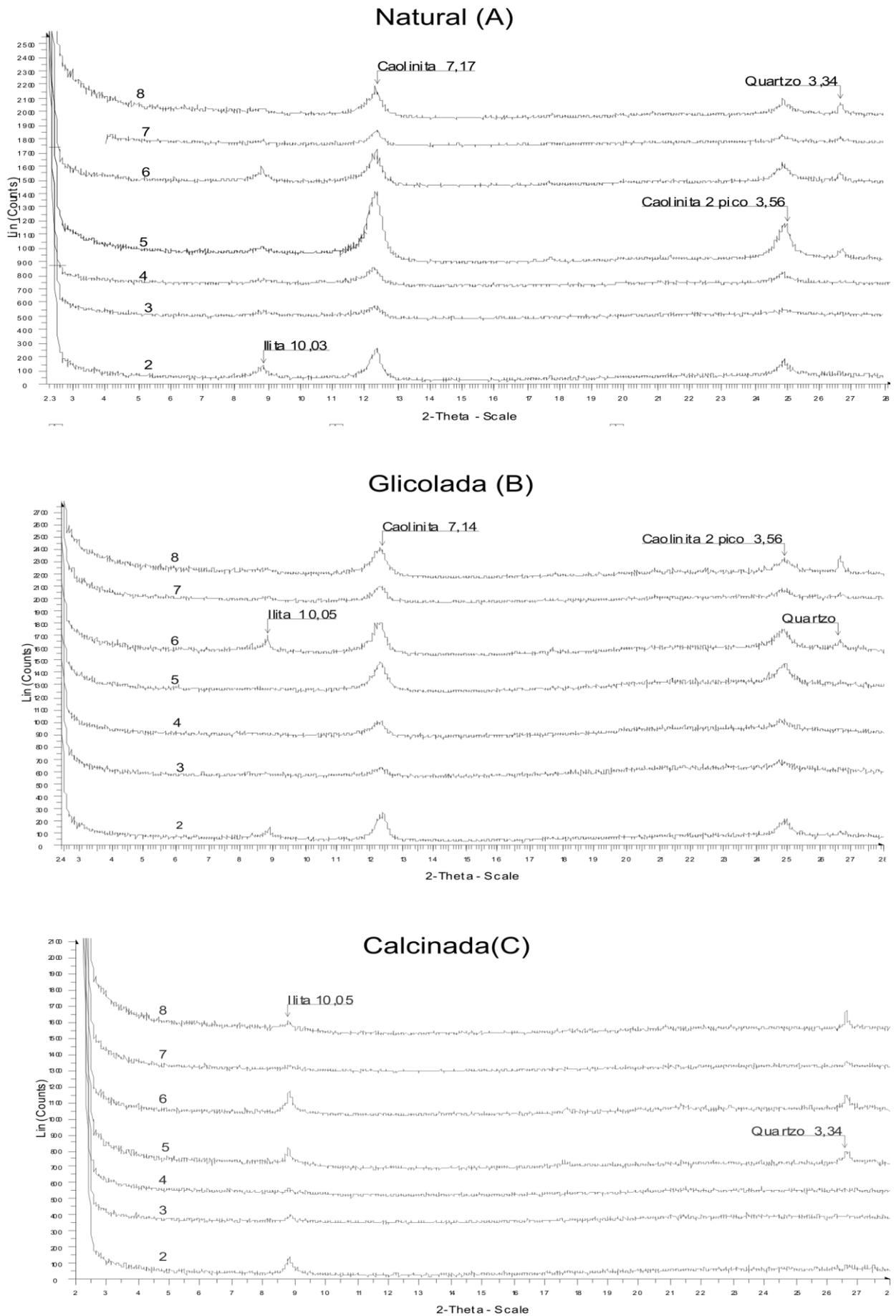


Figura 5. Difratomogramas da análise da fração < 4 µm na forma orientada natural (A), glicolada (B) e calcinada (C) agrupados da base (amostra 2) para o topo (amostra 8) do perfil de alteração.

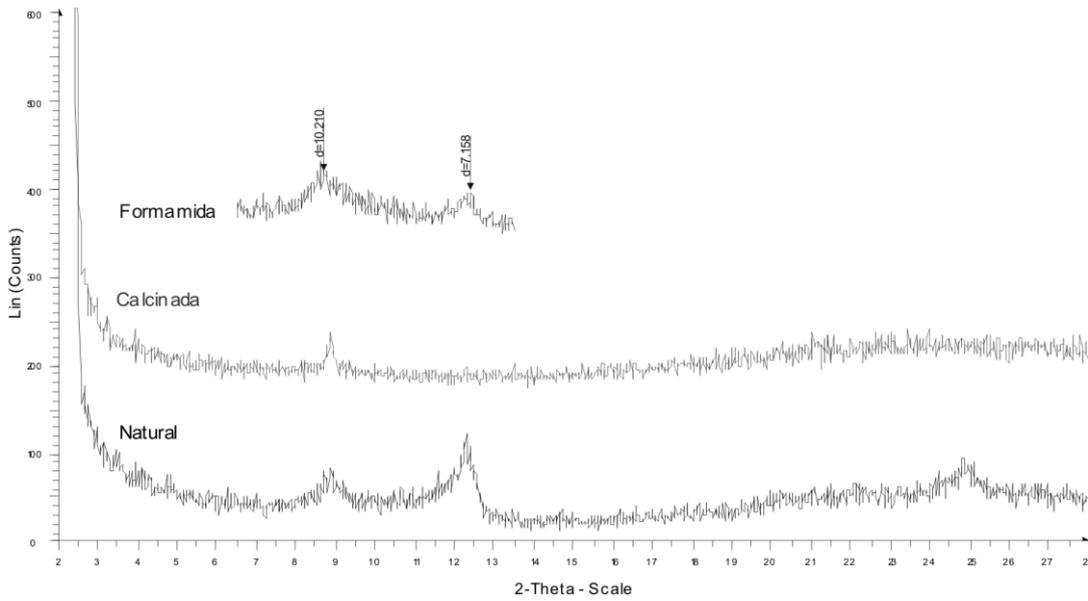


Figura 6. Difratoograma da análise da fração < 4 µm na forma orientada saturada com formamida referente à amostra 3.

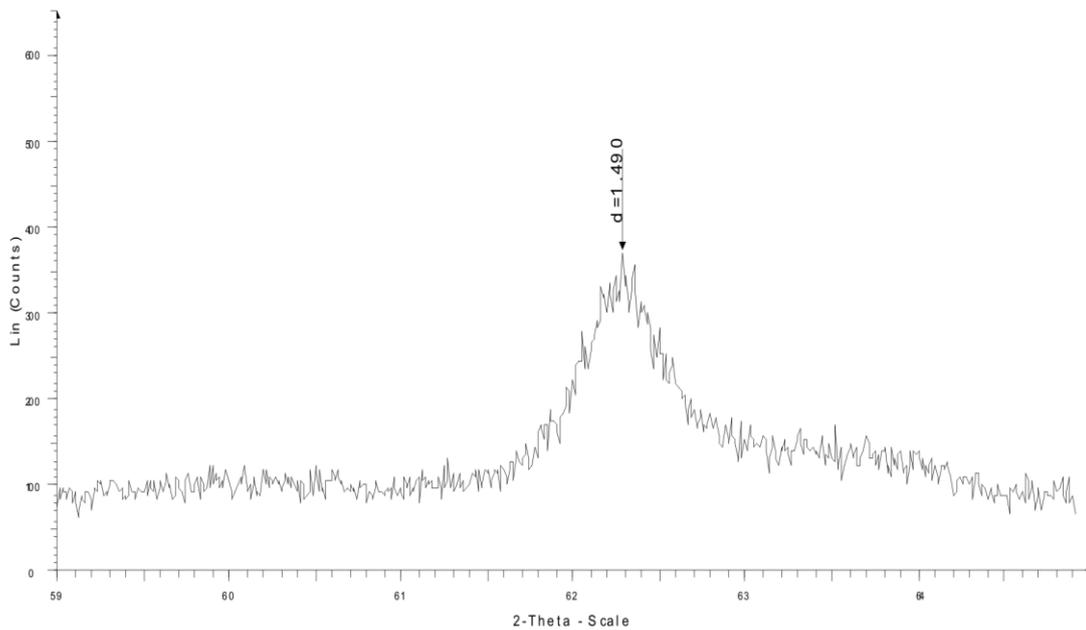


Figura 7. Difratoogramas da análise do parâmetro b da amostra 03.

brecidos ao longo do perfil. Estes elementos são todos solúveis, e, portanto, facilmente lixiviados da parte superior do perfil. No entanto, K e Rb são facilmente aceitos nos sítios inter camadas dos argilominerais. Assim, a formação de argilominerais provavelmente explica o enriquecimento desses elementos nos horizontes CR e S2. Ti, Zr e Nb estão presentes em concentrações superiores que as observadas na rocha sã em todo o perfil. Estes elementos não são solúveis e não formam complexos solúveis, portanto, são praticamente imóveis em perfis de solo. Seu enriquecimento aparente é inteiramente devido à perda de outros elementos.

Desta forma, os resultados das análises químicas foram normalizados para construção de gráficos, onde o comportamento geoquímico dos óxidos e elementos menores também foi avaliado. Para avaliação comparativa foram utilizados para o cálculo do fator de enriquecimento (FE), o Al, o Zr e o Ti. Esses elementos, por serem considerados imóveis, são utilizados com frequência em outros estudos similares.

Como referência para calcular o fator de enriquecimento foi utilizada a amostra de rocha sã encontrada na base do perfil. O fator de enriquecimento aplicado foi aquele proposto por Gresens

Tabela 1. Composição química dos óxidos em %.

Amostra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	P.F.
01	70,90	0,13	13,33	1,81	0,05	0,12	1,08	3,43	5,18	0,03	0,68
02	67,13	0,15	16,47	2,44	0,04	0,08	0,03	0,34	3,89	0,04	5,73
03	68,01	0,18	16,05	2,49	0,01	0,12	0,05	0,74	3,68	0,05	5,76
04	59,94	0,22	23,12	2,87	0,01	0,16	0,05	0,30	2,01	0,02	9,46
05	61,41	0,29	21,56	3,34	0,01	0,16	0,03	0,16	1,67	0,01	9,35
06	65,98	0,26	17,06	3,25	0,01	0,12	0,07	0,88	2,81	0,03	7,11
07	64,21	0,57	17,03	5,03	0,01	0,20	0,03	0,21	1,09	0,02	8,63
08	70,33	0,61	13,24	3,75	0,01	0,19	0,02	0,79	1,11	0,03	7,87

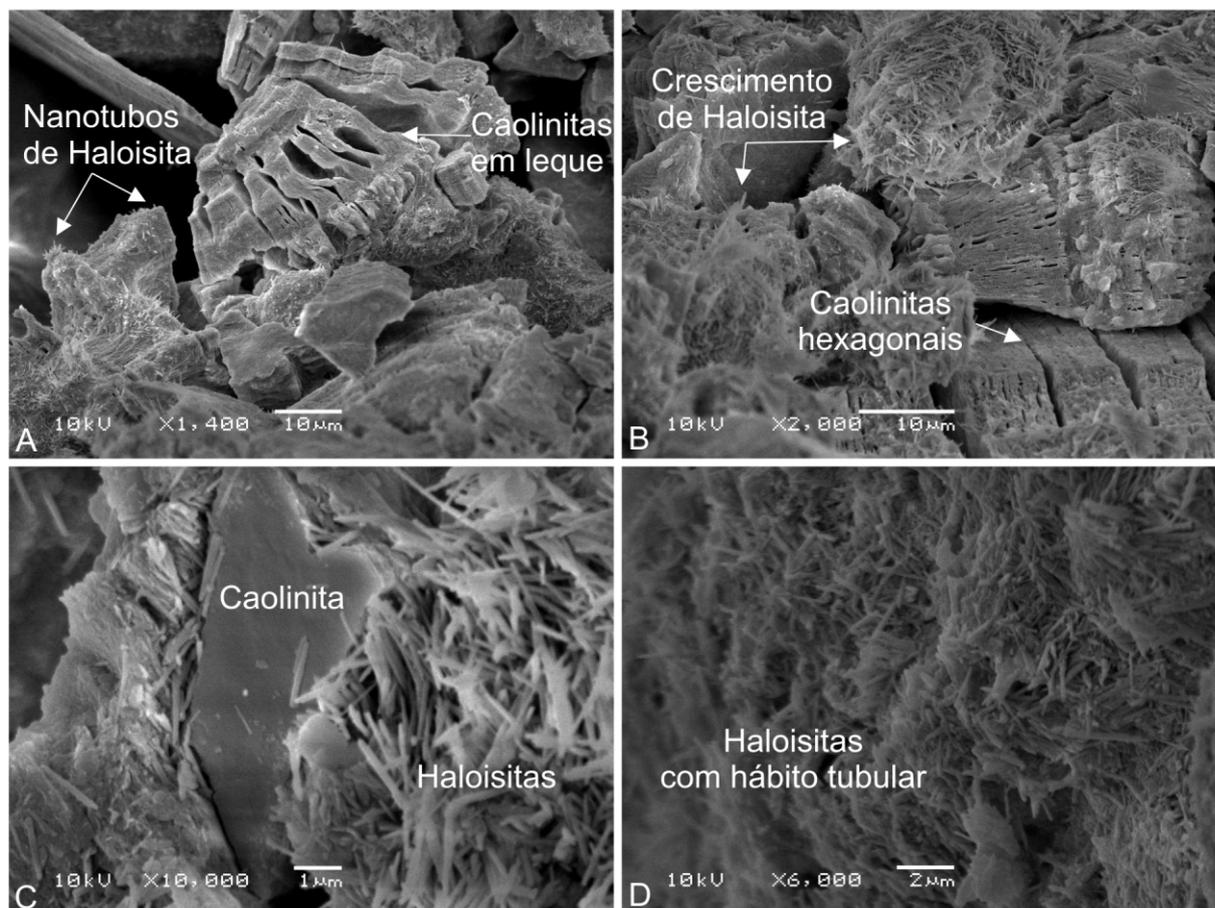


Figura 8. Imagens do MEV: A e B - amostra 03, C e D - amostra 04.

(1967), cuja equação é (1):

$$FE = (Mi/Mx)_{am} / (Mi/Mx)_{ref} \quad (1)$$

onde (Mi/Mx)_{am} representa a razão entre a concentração do elemento de interesse e o Mx (ele-

mento imóvel) na amostra e (Mi/Mx)_{ref} a mesma razão em relação à rocha sã de referência, ou seja, o *background* da área de estudo.

Quando se aplica o fator de enriquecimento, segundo a classificação de Sposito (1989) e de Sutherland & Tolosa (2000), valores de FE inferior-

Tabela 2. Composição química dos elementos menores em ppm.

Amostra	Ni	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Pb	Sn	Th	U
01	6,6	42,1	11,2	254,5	125,7	37,1	177,5	10,5	30,4	0,9	21,3	5,5
02	10,3	30,2	15,0	227,9	40,6	50,7	202,8	13,3	56,6	2,3	26,9	6,1
03	8,1	20,9	16,7	213,8	34,8	28,4	217,8	14,1	26,4	2,9	25,9	4,0
04	9,5	26,2	15,7	168,2	24,9	29,0	159,8	10,1	23,9	1,8	31,4	3,0
05	9,6	27,9	18,5	132,9	20,9	33,8	193,9	12,9	19,9	5,6	25,3	3,4
06	6,2	20,8	19,1	185,7	27,1	22,3	220,4	14,1	31,6	4,4	26,4	3,5
07	9,3	25,5	15,4	128,7	16,6	28,6	280,1	13,7	26,9	1,2	18,0	3,5
08	8,3	23,0	11,1	115,6	17,6	24,5	363,9	12,3	22,5	0,0	14,1	2,9

res a 2 correspondem a contribuições naturais, enquanto valores de FE superiores a 2 são de contribuição antrópica. Esses autores consideram ainda que valores de FE entre 2 e 5 correspondem a uma contaminação antropogênica moderada enquanto que acima de 5 são francamente contaminados. A tabela 3 exibe os resultados da aplicação do FE para os óxidos e a figura 9 os respectivos gráficos.

Os valores mais elevados de FE na análise dos óxidos foram encontrados quando utilizamos o Al como elemento imóvel de referência. O comportamento em geral dos elementos maiores é de imobilidade, com valores de FE em torno de 1 e havendo enriquecimento em direção ao topo do perfil apenas para o Ti e o Fe, onde FE atinge valores de 5 e 2 respectivamente.

Ao utilizar o Zr como elemento imóvel de referência o comportamento dos elementos maiores é bastante variável. Alguns elementos (Ti, Fe) enriquecem em direção ao topo do perfil. Outros, como Mg e Ca, tem valores de FE em torno de 1, enquanto para Na, K, Si e Al há um empobrecimento em direção ao topo de perfil com valores inferiores a 1.

Quando o elemento imóvel de referência é o Ti o comportamento geral de todos os elementos maiores é de empobrecimento ao longo do perfil. Observa-se que nos horizontes mais superficiais há perda desses elementos e o FE é inferior a 1.

A tabela 4 apresenta os resultados da aplicação do FE para os elementos menores e a figura 10 o respectivo gráfico.

Observa-se que os resultados mostram que apenas os elementos Sn e Zr tem valores superiores a 2, indicativo de um enriquecimento acima dos

teores naturais. O Zr com FE=2,06, próximo dos valores naturais tem um maior enriquecimento somente próximo da superfície. Entretanto, no caso do Sn, anomalias foram observadas ao utilizar tanto Ti como Al e Zr como elemento imóvel de referência, e observadas praticamente ao longo de todo perfil, no nível das fraturas, correspondendo às amostras 5 e 6, e saprólito (S2 e S1).

4. Conclusões

Os resultados obtidos mostram que as técnicas de MO, DRX, MEV e FRX são adequadas para o desenvolvimento desse tipo de estudo, em especial para identificação dos argilominerais.

No perfil de alteração do Granito Independência, verticalmente há pequena variação da composição mineralógica. Ele é composto essencialmente por quartzo, feldspato alcalino, illita/biotita e caolinita. O quartzo, a caolinita e o feldspato alcalino estão presentes em todos os horizontes. A illita e/ou a biotita, que apresentam pico de $d \approx 10 \text{ \AA}$ (Guggenheim *et al.*, 2006), estão nos horizontes saprolíticos.

Observada na MO, a exsudação de Fe pelas lamelas da biotita marca o início da alteração supergênica no Granito Independência, e a presença de ankerita, um carbonato de cálcio e ferro com magnésio e manganês (Branco, 2008), na amostra proveniente da fratura do granito, é indicativa de que fluidos hidrotermais percolaram a rocha no passado.

A DRX das lâminas orientadas na fração < 4 μm indicou a presença de quartzo, illita, haloisita e caolinita. A caolinita foi observada em todas as amostras. Para confirmar a haloisita foi necessário

Tabela 3. Fator de Enriquecimento (FE) aplicado aos óxidos.

	Iso Al									
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Solum / 0,70m	1,00	4,87	1	2,09	0,27	1,59	0,02	0,23	0,22	1,14
CR / 1,40m	0,71	3,53	1	2,18	0,24	1,35	0,03	0,05	0,17	0,57
S2 / 2,00m	0,73	1,62	1	1,40	0,20	0,81	0,05	0,20	0,42	0,91
Fratura / 2,60m	0,54	1,41	1	1,14	0,13	0,82	0,02	0,03	0,20	0,31
Fratura / 3,30m	0,49	1,01	1	0,92	0,17	0,76	0,03	0,05	0,22	0,40
S1 / 3,85m	0,80	1,17	1	1,14	0,24	0,87	0,04	0,18	0,59	1,33
S1 / 4,90m	0,77	0,97	1	1,09	0,74	0,53	0,02	0,08	0,61	1,05
Rocha sã	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Iso Zr									
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Solum / 0,70m	0,48	2,36	0,48	1,01	0,13	0,77	0,01	0,11	0,10	0,55
CR / 1,40m	0,57	2,86	0,81	1,76	0,20	1,09	0,02	0,04	0,13	0,46
S2 / 2,00m	0,75	1,67	1,03	1,45	0,20	0,84	0,05	0,21	0,44	0,94
Fratura / 2,60m	0,79	2,09	1,48	1,69	0,19	1,21	0,03	0,04	0,30	0,46
Fratura / 3,30m	0,94	1,94	1,93	1,76	0,32	1,47	0,05	0,10	0,43	0,78
S1 / 3,85m	0,78	1,14	0,98	1,12	0,24	0,86	0,04	0,18	0,58	1,30
S1 / 4,90m	0,83	1,05	1,08	1,18	0,80	0,57	0,03	0,09	0,66	1,14
Rocha sã	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Iso Ti									
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Solum / 0,70m	0,20	1	0,21	0,43	0,06	0,33	0,00	0,05	0,04	0,23
CR / 1,40m	0,20	1	0,28	0,62	0,07	0,38	0,01	0,01	0,05	0,16
S2 / 2,00m	0,45	1	0,62	0,86	0,12	0,50	0,03	0,12	0,26	0,56
Fratura / 2,60m	0,38	1	0,71	0,81	0,09	0,58	0,01	0,02	0,14	0,22
Fratura / 3,30m	0,48	1	0,99	0,91	0,17	0,76	0,02	0,05	0,22	0,40
S1 / 3,85m	0,68	1	0,86	0,98	0,21	0,75	0,04	0,15	0,51	1,14
S1 / 4,90m	0,79	1	1,03	1,13	0,76	0,55	0,02	0,08	0,63	1,08
Rocha sã	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

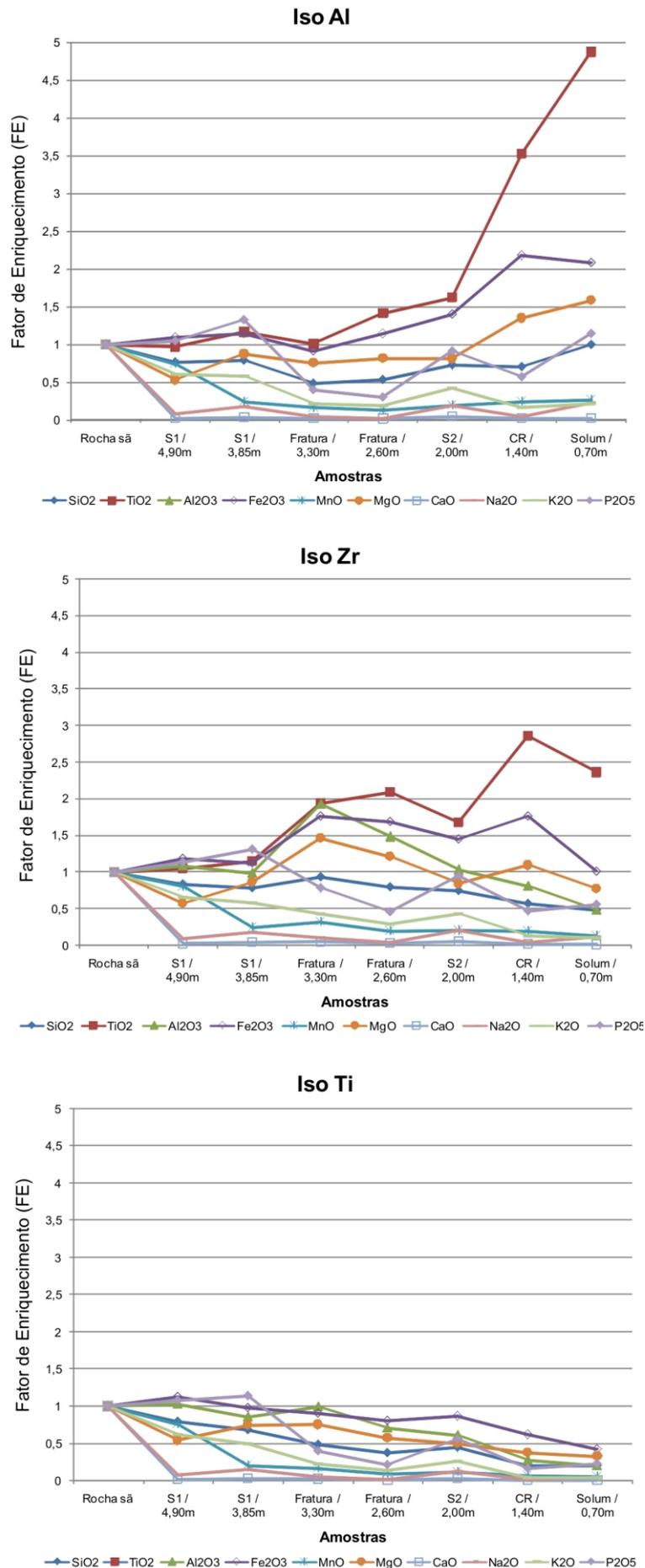


Figura 9. Gráfico do Fator de Enriquecimento (FE) aplicado aos óxidos.

Tabela 4. Fator de Enriquecimento (FE) aplicado aos elementos menores.

Iso Al												
	Ni	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Pb	Sn	Th	U
Solum / 0,70m	1,27	0,55	1,00	0,46	0,14	0,66	2,06	1,18	0,74	0,00	0,67	0,53
CR / 1,40m	1,10	0,47	1,08	0,40	0,10	0,60	1,24	1,02	0,69	1,04	0,66	0,50
S2 / 2,00m	0,73	0,39	1,33	0,57	0,17	0,47	0,97	1,05	0,81	3,82	0,97	0,50
Fratura / 2,60m	0,90	0,41	1,02	0,32	0,10	0,56	0,68	0,76	0,40	3,85	0,73	0,38
Fratura / 3,30m	0,83	0,36	0,81	0,38	0,11	0,45	0,52	0,55	0,45	1,15	0,85	0,31
S1 / 3,85m	1,02	0,41	1,24	0,70	0,23	0,64	1,02	1,11	0,72	2,68	1,01	0,60
S1 / 4,90m	1,26	0,58	1,08	0,72	0,26	1,11	0,92	1,02	1,51	2,07	1,02	0,90
Rocha sã	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Iso Zr												
	Ni	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Pb	Sn	Th	U
Solum / 0,70m	0,61	0,27	0,48	0,22	0,07	0,32	1	0,57	0,36	0,00	0,32	0,26
CR / 1,40m	0,89	0,38	0,87	0,32	0,08	0,49	1	0,83	0,56	0,84	0,54	0,40
S2 / 2,00m	0,76	0,40	1,37	0,59	0,17	0,48	1	1,08	0,84	3,94	1,00	0,51
Fratura / 2,60m	1,33	0,61	1,51	0,48	0,15	0,83	1	1,12	0,60	5,70	1,09	0,57
Fratura / 3,30m	1,60	0,69	1,56	0,73	0,22	0,87	1	1,07	0,87	2,22	1,64	0,61
S1 / 3,85m	1,00	0,40	1,22	0,68	0,23	0,62	1	1,09	0,71	2,63	0,99	0,59
S1 / 4,90m	1,37	0,63	1,17	0,78	0,28	1,20	1	1,11	1,63	2,24	1,11	0,97
Rocha sã	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Iso Ti												
	Ni	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Pb	Sn	Th	U
Solum / 0,70m	0,26	0,11	0,20	0,09	0,03	0,14	0,42	0,24	0,15	0,00	0,14	0,11
CR / 1,40m	0,31	0,13	0,31	0,11	0,03	0,17	0,35	0,29	0,20	0,30	0,19	0,14
S2 / 2,00m	0,45	0,24	0,82	0,35	0,10	0,29	0,60	0,65	0,50	2,35	0,60	0,31
Fratura / 2,60m	0,64	0,29	0,72	0,23	0,07	0,40	0,48	0,54	0,29	2,72	0,52	0,27
Fratura / 3,30m	0,82	0,36	0,80	0,38	0,11	0,45	0,52	0,55	0,45	1,15	0,84	0,31
S1 / 3,85m	0,87	0,35	1,06	0,60	0,20	0,54	0,87	0,96	0,62	2,29	0,87	0,52
S1 / 4,90m	1,30	0,60	1,12	0,75	0,27	1,14	0,95	1,06	1,55	2,13	1,05	0,93
Rocha sã	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

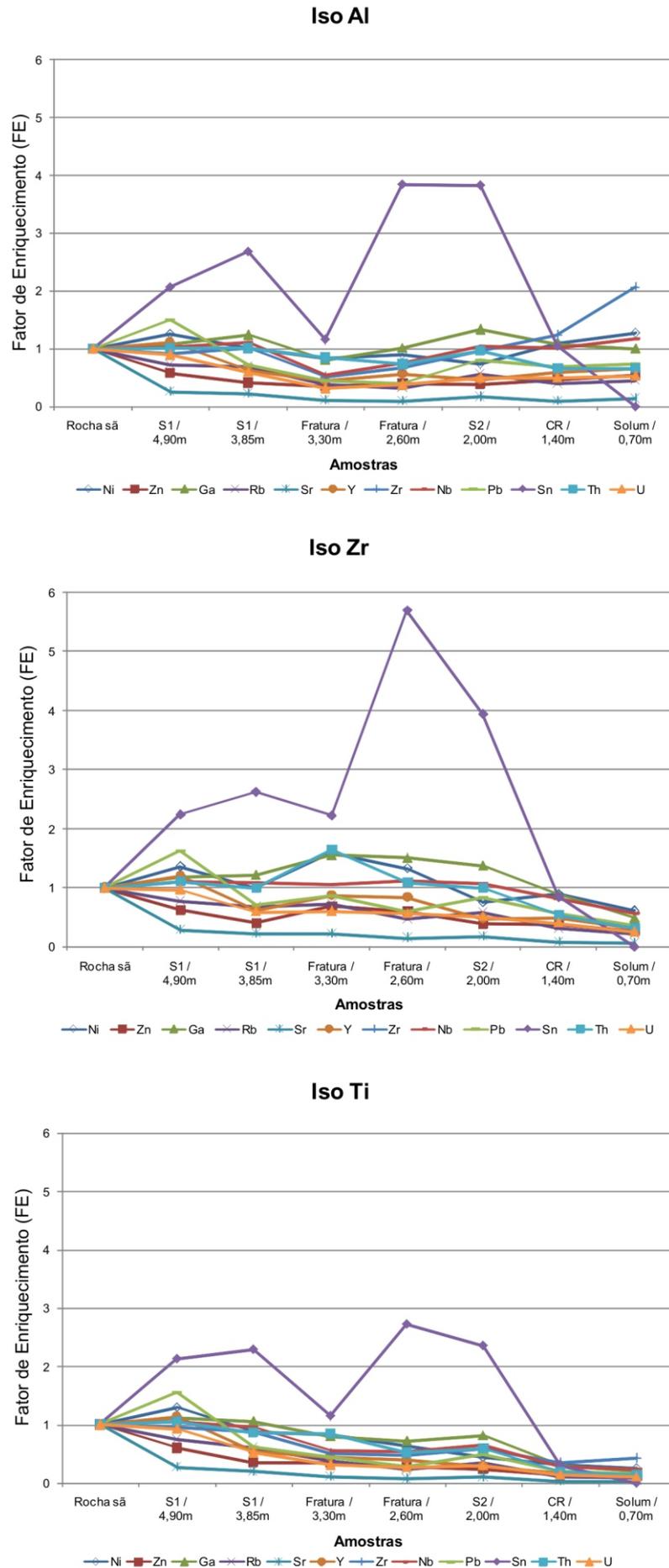


Figura 10. Gráfico do Fator de Enriquecimento (FE) aplicado aos elementos menores.

recorrer à reflexão 060 e parâmetro “b”.

Imagens de caolinita e haloisita obtidas no MEV confirmaram os dados observados ao MO e DRX e sugerem que a origem destes argilominerais esteja relacionada à alteração do feldspato e da biotita, sendo o intemperismo o processo dominante na sua formação.

O comportamento geoquímico dos elementos, avaliado a partir dos dados de FRX, mostra transporte vertical de elementos ao longo do perfil (Fe, Al), elementos solúveis (Na, Ca, Sr, K e Rb) sendo lixiviados de forma severa da porção superior, e outros, menos móveis (Ti, Zr e Nb), sendo acumulados.

A utilização dos dados de FRX, normalizados para avaliação comparativa do comportamento geoquímico dos óxidos e elementos menores, através da utilização de elementos imóveis de referência (Al, Zr e Ti), indica que o Granito Independência apresenta uma anomalia de Sn no manto de alteração da área de estudo, de origem antropogênica ou hidrotermal. A escolha do elemento imóvel de referência para verificar a existência ou não de enriquecimento dos elementos ao longo do perfil é muito importante, pois neste trabalho verificou-se que o Al tem um comportamento móvel, provavelmente associado às condições de acidez do solo.

Referências

- Albers, A.P.F., Melchiades, F.G., Machado, R., Baldo, J.B. & Boschi, A.O. 2002. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. *Cerâmica*, 48: 34-37.
- Alves, D.B. 1987. Desenvolvimento de Metodologia de Preparação de Amostras para Análise Difratométrica de Argilominerais no Centro de Pesquisas da Petrobrás. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 1(2): 157-175.
- Biondi, J.C., Franke, N.D., Carvalho, P.R.S. & Villanova, S.N. 2002. Processo mineralizador e modelo genético da mina de ouro Schramm (SC-Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*, 32(4): 461-470.
- Branco, P.M. 2008. *Dicionário de Mineralogia e Gemologia*. São Paulo, Oficina de textos, 608p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. 1973. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul. Recife : convênio MA/DPP - SA/ DRNR. Boletim Técnico 30. 431p.
- Brindley, G.W. & Brown, G. 1980. *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-Ray Identification*. London, Mineralogical Society, 495p.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2010. *Áreas Contaminadas – Relação de Áreas Contaminadas*. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacao-de-areas-conta-minadas> > Acesso em: 27 set. 2010.
- Curi, N. Larach, J.O.I., Kämpf, N., Moniz, A.C. & Fontes, L.E.F. 1993. *Vocabulário de ciência do solo*. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 89p.
- Delage, R. 1984. Notes techniques sur La preparation des lames minces dans Le materiaux meubles. *Geologie & Prospection*. Bull. De l'institut de Géol. Du Basin d' Aquitaine, Bordeaux, 35: 3-6.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1997. *Manual de métodos de análise de solos*. 2a ed., Rio de Janeiro, EMBRAPA, 212p.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1999. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Brasília, EMBRAPA, 412p.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2006. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2a ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro, Embrapa, 306p.
- Formoso, M.L.L. 2006. Some topics on geochemistry of weathering: a review. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78(4): 809-820.
- Gresens, R.L. 1967. Composition-volume relationships of metasomatism. *Chemical Geology*, 2:47-65.
- Guggenheim, S., Adams, J.M., Bain, D.C., Bergaya, F., Brigatti, M.F., Drits, V.A., Formoso, M.L.L., Galán, E., Kogure, T. & Stanjek, H. 2006. Summary of recommendations of nomenclature committees relevant to Clay mineralogy: report of the association internationale pour l'etude des argiles (AIPEA) nomenclature committee for 2006. *Clay and Clay Minerals*, 54(6): 761-772.
- Hasenack, H., Weber, J.E. & Marcuzzo, S. 2008. *Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre: Geologia, Solos, Drenagem, Vegetação/Ocupação e Paisagem*. Porto Alegre, Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 84 p.
- Imperato, M., Adamo, P., Naimo, D., Arienzo, M., Stanzione, D. & Violante, P. 2003. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy). *Environmental Pollution*, 124(2): 247-256.
- Langmuir, D. 1997. *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice Hall, New Jersey, 589p.
- Lanson, B., Beaufort, D., Berger, G., Bauer, A., Cassagabere, A. & Meunier, A. 2002. Authigenic kaolin and illitic minerals during burial diagenesis of sandstones: a review. *Clay Minerals*, 37(1): 1-22.
- Manta, D.S., Angelone, M., Bellanca, A., Neri, R. & Sprovieri, M. 2002. Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo (Sicily), Italy. *Science of the Total Environment*, 300(1/3): 229-243.
- Melfi, A.J., Cerri, C.C., Fritsch, E. & Formoso, M.L.L. 1999. Tropical soils: genesis, distribution and degradation of lateritic pedological systems. In: Formoso, M.L.L.; Cerri, C.C. (Org.). WORKSHOP ON TROPICAL SOILS, 1999, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, Academia Brasileira de Ciências, p. 7-30.
- Miller, F.P. 1993. Soil Science: A scope broader than its identity. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 299-564.
- Morillo, E., Romero, A.S., Maqueda, C., Madrid, L., Ajmone-Marsan, F., Grcman, H., Davidson, C.M., Hursthouse, A.S., & Villaverde, J. 2007. Soil pollution by PAHs in urban soils: a comparison of three Euro-

- pean cities. *Journal of Environmental Monitoring*, 9(9): 1001-1008.
- Morton-Bermea, O., Hernández-Álvarez, E., González-Hernández, G., Romero, Lozano, R. & Beramendi-Orosco, L.E. 2009. Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City. *Journal of Geochemical Exploration*, 101(3): 218-224.
- Peloggia, A.U.G. 1997. A ação do homem enquanto ponto fundamental da geologia do tecnógeno: proposição teórica básica e discussão acerca do caso do município de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 23(3): 257-268.
- Philipp, R.P. 1995. Condições de posicionamento do plutonismo da Suíte Dom Feliciano na região de Porto Alegre, RS. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 5, Gramado, 1995, *Boletim de Resumos Expandidos*, Gramado, SBG, p. 207-209.
- Rambgrab, G.E., Wildner, W. & Camozzato, E. 1995. *Mapa Geológico da Folha de Porto Alegre SH.22-Y-B, Porto Alegre*, Programa de Levantamentos Geológicos Básicos, CPRM, Brasília, 144 p., escala 1:250.000.
- Reichardt, K. 1988. Por que estudar o solo? In: Moniz, A.C. (Ed.). *A responsabilidade social da Ciência do Solo*. Campinas, SBCS, p. 75-78.
- Ruellan, A. 1988. Pedologia e desenvolvimento: A Ciência do Solo ao serviço do desenvolvimento. In: Moniz, A.C. (Ed.). *A responsabilidade social da Ciência do Solo*. Campinas, SBCS, p. 69-74.
- Sampaio, J.A. & Matos de Almeida, S.L. 2005. Calcário e Dolomito. In: Luz, A. B., Lins, F. F. (Ed.). *Rochas e minerais industriais usos e especificações*. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, p. 327-350.
- Schneider, A.W., Loss, E.L. & Pinto, J.F. 1974. Mapa geológico da folha Porto Alegre, RS. *Pesquisas Série Mapas* (7). Porto Alegre, UFRGS, Instituto de Geociências, escala 1:50.000.
- Shi, G., Chen, Z., Xu, S., Zhang, J., Wang, L., Bi, C. & Teng, J. 2008. Potentially toxic metal contamination of urban soils and roadside dust in Shanghai, China. *Environmental Pollution*, 156(2): 251-260.
- Sposito, G. 1989. *The chemistry of soils*. New York: Oxford University Press, 277p.
- Sutherland, R.A. & Tolosa C.A. 2000. Multi-element analysis of road deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii. *Environmental Pollution*. 110: 483-495.
- Tang, L., , , . & . 2005. Contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils in Beijing, China. *Environmental International*, 31(6): 822-828.

