

# GEOQUÍMICA DOS SOLOS DA ILHA DA TRINDADE, ATLÂNTICO SUL, BRASIL

Eliane de Paula CLEMENTE <sup>1</sup>, Carlos Ernesto Reynold Gonçalves SCHAEFER <sup>2</sup>,  
Fábio Soares de OLIVEIRA <sup>3</sup>, Liovando da Costa MARCIANO <sup>2</sup>,  
Alan Dumont CLEMENTE <sup>4</sup>

(1) Embrapa Solos. Rua Jardim Botânico, 1024 – Jardim Botânico. CEP 22460-000.

Rio de Janeiro, RJ. Endereço eletrônico: eliane@cnpq.embrapa.br

(2) Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa. Avenida Peter Henry Rolfs, s/n – Campus Universitário.  
CEP 36571-000. Viçosa, MG. Endereços eletrônicos: carlos.schaefer@ufv.br; liovandomc@yahoo.com.br

(3) Instituto Federal Minas Gerais, Campus Ouro Preto. Rua Pandiá Calógeras, 898 – Bauxita.  
CEP 35400-000. Ouro Preto, MG. Endereço eletrônico: fabio Soares@yahoo.com.br

(4) Instituto Federal de Goiás. Rua São Bartolomeu, s/n – Vila Esperança. CEP 72811-580.  
Luziânia, GO. Endereço eletrônico: alandumont@ifg.edu.br

## Introdução

### Materiais e Métodos

Caracterização da Área de Estudo

Descrição e Coleta dos Solos

Determinação dos Elementos Traço em Solos

Análise Total

Extração Sequencial

Mineralogia da Fração Argila por Difratomia de Raios-X (DRX)

### Resultados e Discussões

Análise Total e Extração Sequencial

Mineralogia da Fração Argila por Difratomia de Raios-X

### Considerações Finais

### Agradecimentos

### Referências Bibliográficas

**RESUMO** – O trabalho apresenta a geoquímica dos elementos traços em solos de origem vulcânica da Ilha da Trindade, Atlântico Sul, Brasil, e sua relação com a posição geomorfológica e altimétrica. Foi realizada a amostragem sequencial de solos por altitudes nas encostas da Ilha de Trindade em 10 perfis representativos para cada tipo topográfico, para fins de determinar as fases específicas para cada elemento presente no solo. O vertente sul da ilha é mais frio e úmido e coberto por vegetação exuberante de samambaias gigantes. Devido ao acúmulo de material orgânico ocorrem Organossolos ou Cambissolos nas partes mais protegidas. Em altitudes superiores a 400 m, os solos são mais ácidos e lixiviados, com a predominância de Cambissolos, já nas cotas mais baixas encontram-se solos mais jovens, os Neossolos. Os dados analíticos apresentaram que Cu, K, Mn, Ni e Zn são altos na fração ligada a Matéria Orgânica e na fração ligada a óxidos de Fe amorfos. De forma geral, os teores disponíveis de cada metal na fração solúvel e trocável dos solos são muito baixos em comparação com aqueles em solos totais. Os elementos metálicos estão presentes nos solos na forma insolúvel, tanto nas estruturas dos minerais quanto nos complexos de Matéria Orgânica e de Al e Fe, sejam amorfos ou cristalinos denotando ser os solos mais intemperizados conhecidos no território brasileiro.

**Palavras-chave:** Extração sequencial de metais; mineralogia; rochas vulcânicas.

**ABSTRACT** – *E. de P. Clemente, C.E.R.G. Schaefer, F.S. de Oliveira, L. da C. Marciano, A.D. Clemente - Geochemistry of soils from the Trindade Island, South Atlantic, Brazil.* The work present geochemistry of trace elements of the volcanic-origin soils of the Trindade Island of Espírito Santo, Brazil, and its relation with geomorphological position and altitudes. The sequential sampling of soil according to the altitudes on the slopes of Trinidad Island have performed along 10 representative sections for each topography type in order to determine the specific phases for each elements present on the soil. On the southern slope of the island is colder and more humid and covered by thick vegetation of giant ferns. Because of the accumulation of organic material, Histosols and Inceptisols take place in the more protected parts. At the sites higher than 400 m, the soil is more acid and leached with the predominance of Inceptisols, already in the lower elevations and soils are young, the Entisols. The chemical analyses show that Cu, K, Mn, Ni and Zn are rich in the fraction related to organic material and that related to Fe oxide and amorphous Fe. In general, the available contents of each metal in the soluble and exchangeable fraction are very low in comparison with the contents of total soil. These elements are present in the soil as insoluble components either in the minerals structure or the complexes of organic material complex or of Al and Fe, could be of amorphous or crystalline denoting the most weathered soils is known in the territory Brazil.

**Keywords:** Sequential extraction of metals, mineralogy, volcanic rocks.

## INTRODUÇÃO

Estudos pedológicos de ilhas oceânicas têm que refletem a influência do material de origem identificado solos com muitas características peculiares, vulcânico, isolamento geográfico variável e outros

fatores ligados ao domínio oceânico, confirmando a necessidade de estudos mais detalhados dos solos (Cardoso, 1958; Faria, 1974; Pissarra et al., 1965). Não se pode entender a composição e características de uma determinada classe de solo sem levar em consideração seu material de origem e suas propriedades em geral, tais como menor ou maior resistência ao intemperismo, composição química, orientação estrutural, planos de fratura, entre outros (Guerra, 2001). Existe uma conexão entre processos geoquímicos de superfície e contexto geológico local, principalmente no que diz respeito à composição mineral dos solos e intemperismo das rochas (Fonseca, 1999). A distribuição secundária de metais no solo pode ser profundamente influenciada pelos processos pedogenéticos, além da litologia, ressaltando a necessidade de se buscar entender a gênese de solos e composição da rocha em estudos de prospecção geoquímica.

A ilha da Trindade é constituída basicamente de rochas vulcânicas, sendo uma série alcalina com predominância de grandes corpos fonolíticos, e outra básica, com derrames de lavas basálticas. Ocorrem também sedimentos marinhos ricos em carbonatos biogênicos, ao longo do litoral. Assim como em Fernando de Noronha, também a série vulcânica de Trindade caracteriza-se por ser altamente subsaturada em  $\text{SiO}_2$  e acentuadamente sódico-alcalina. Em um trabalho referência de Almeida (1961), posteriormente confirmado por Weaver (1990), foi encontrado o teor em  $\text{SiO}_2$  em 33 análises variando entre 37,12% (analcita ankaratrito) e 52,91% (fonólito). A variação de  $\text{Na}_2\text{O}$  acusou valores entre 2,45% (basanita) e 13,00% (noseana fonólito). São as duas séries vulcânicas oceânicas mais subsaturadas em sílica e mais sódico-alcalinas do Atlântico. Trindade constitui uma das séries oceânicas mais sódicas senão a mais sódica do mundo. Tal como em Fernando de Noronha, as rochas ultrabásicas, frações mais densas dos diferenciados magmáticos, foram expelidas tardiamente, a julgar pelo que está exposto na ilha. A composição química de algumas rochas representativas de toda a ilha está descrita na Tabela 1 (Almeida, 1962).

Visando melhor entendimento dos processos geoquímicos a extração sequencial tende à identificação de metais nas suas diferentes formas de disponibilidade. Os fatores que afetam a distribuição química dos metais no solo evidentemente controlam sua solubilidade e mobilidade no ambiente, influenciando diretamente na disponibilidade destes às plantas. Consideram-se prontamente disponíveis para as plantas e outros organismos os metais em forma solúvel, dissolvidos na solução do solo, ou na forma trocável, adsorvidos às cargas do solo. Os metais precipitados, ocluídos e formando quelatos pouco solúveis com a matéria orgânica não estão disponíveis, mas podem passar para a solução do solo pela mineralização dos ligantes orgânicos ou por mudanças de pH ou potencial redox. Finalmente, os metais que fazem parte da rede, cristalina dos silicatos não são disponíveis (Coker & Matthews, 1983; Alloway, 1990).

A quantidade de metais disponíveis nos solos e sedimentos está regulada, em parte, pelas trocas iônicas. Diversos pesquisadores admitem que a troca catiônica e a formação de quelatos com a matéria orgânica são os principais processos que facilitam a disponibilidade dos metais e o grau do impacto ambiental causado pelos mesmos. Os procedimentos de lixiviação parcial e extração total de metais em solos e sedimentos visam principalmente estabelecer a fração biodisponível ou facilmente trocável em função de variáveis físico-químicas do ambiente. Em condições normais, a principal fonte dos elementos traço em solos e sedimentos deriva do material parental das rochas que lhe deram origem. A influência do material parental no conteúdo total e forma química dos elementos traço em solos é modificada por uma variedade de processos pedogenéticos, que afetam a mobilidade e redistribuição dos elementos traço nos perfis do solo (Teódulo et al., 2003).

Diante do exposto, o trabalho objetivou estudar em detalhes a geoquímica dos diferentes materiais eruptivos da série vulcânica de Trindade, visando a identificação das diferentes formas de disponibilidade em que os metais se encontram no solo.

## MATERIAL E MÉTODOS

### CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A ilha está distante cerca de 1.140 km da costa no paralelo de Vitória, situada a  $20^\circ 30' \text{ S}$  e  $29^\circ 18' \text{ WG}$  (coordenadas centrais; Figura 1). O isolamento na superfície oceânica da ilha da Trindade não deixa entrever que é parte de uma grande cadeia vulcânica submarina orientada leste-oeste, conhecida como lineamento Vitória-Trindade. A ilha constitui um corpo

vulcânico apoiado no assoalho oceânico, a quase 5.200 m de profundidade. Ela é resultado de cinco formações geológicas, denominadas Complexo de Trindade, como pode ser visto no trabalho de Almeida (1961). Atualmente se encontra em processo avançado de intemperismo, com o grande problema de erosão de seus solos. O processo de evolução dos fenômenos erosivos é evidenciados em grandes voçorocas por toda

**TABELA 1.** Teores\* de elementos maiores em rochas da ilha da Trindade.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO <sub>2</sub>	37,60	38,60	37,12	38,00	39,00	37,60	37,40	40,08	38,80	40,60
TiO <sub>2</sub>	2,60	2,50	3,20	2,50	3,60	2,50	3,40	2,30	3,60	3,30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,75	15,09	12,22	12,99	11,86	14,41	14,29	15,67	14,53	17,03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,23	5,39	5,47	5,48	6,20	7,47	7,71	6,75	5,88	4,99
FeO	6,61	7,83	7,18	8,33	9,55	6,75	6,25	5,17	7,97	6,03
MnO	0,19	0,20	0,20	0,20	0,19	0,20	0,25	0,15	0,20	0,20
MgO	12,68	9,41	11,36	12,16	12,31	8,39	8,50	4,49	6,44	5,28
CaO	13,00	11,72	12,40	11,60	10,40	12,40	11,60	10,60	11,60	9,80
Na <sub>2</sub> O	5,24	4,52	6,75	4,47	3,58	3,40	4,06	6,49	5,42	5,23
K <sub>2</sub> O	1,46	1,56	0,61	2,48	1,80	1,19	0,70	1,35	0,61	0,71
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,90	0,93	1,34	0,79	0,55	1,33	1,42	1,40	1,23	0,67

	11	12	13	14	15	16	17	18	19
SiO <sub>2</sub>	39,60	44,80	45,00	46,80	50,60	51,00	49,40	49,40	51,00
TiO <sub>2</sub>	3,00	1,60	1,82	2,06	0,88	0,30	0,80	0,80	0,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,25	17,76	19,90	19,00	21,30	20,20	20,32	21,16	19,41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,51	5,55	4,06	4,02	2,94	2,26	3,06	3,29	2,97
FeO	6,75	3,81	2,61	2,43	1,39	2,58	2,51	1,58	1,58
MnO	0,10	0,20	0,20	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15
MgO	6,72	3,47	2,87	2,83	1,56	0,80	1,40	1,52	1,44
CaO	10,72	7,80	6,54	6,17	3,08	2,12	3,60	3,52	3,40
Na <sub>2</sub> O	6,64	6,87	3,58	2,84	9,17	13,00	11,35	8,16	8,00
K <sub>2</sub> O	0,54	3,87	6,02	6,26	7,95	5,00	5,30	2,75	5,26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,05	0,88	0,33	0,28	0,21	0,18	0,29	0,25	0,22

\* Teores expressos em porcentagem Fonte (Almeida, 1962)

1 – Tambuschito. Valado; 2 - Tambuschito. Complexo Trindade; 3 – Analcita-ankaratrito. Praia da Calheta; 4 – Ankaratrito. Lava do vulcão do Paredão; 5 - Ankaratrito. Lava do vulcão do Paredão; 6 – Olivina-nefelinito. Dique no Vale Verde; 7 – Nefelinito. Derrame da Seqüência Desejado no planalto Axial; 8 – Nefelinito do Complexo de Trindade. Costa norte da ilha; 9 – Olivina-analcitito. Escarpa da costa norte da ilha; 10 – Analcitito. Dique no planalto Axial; 11 – Analcita-basanito. Dique no planalto Axial; 12 – Grazinito. Alto vale do córrego Vermelho; 13 – Kali-gauteíto. Escarpa atrás dos alojamentos; 14 - Kali-gauteíto. Dique entre a praia dos Cabritos e a ponta da Crista do Galo; 15 – Fonolito. Pico Pontudo; 16- Noseana-fonolito. Dique na escarpa vizinha à praia dos Cabritos; 17 – Fonolito do morro Desejado; 18- Analcita-fonolito. Falda ocidental do morro Desejado; 19 – Tinguaito. Dique entre a praia dos Cabritos e a ponta da Crista do Galo.

ilha, sendo as partes mais altas mais preservadas com florestas de Samambaias Gigantes (*Cyathea delgadii*), enquanto na parte mais baixa apenas vegetação rasteira (cyperaceas) e tufo de *Pityrogramma calomelanos*.

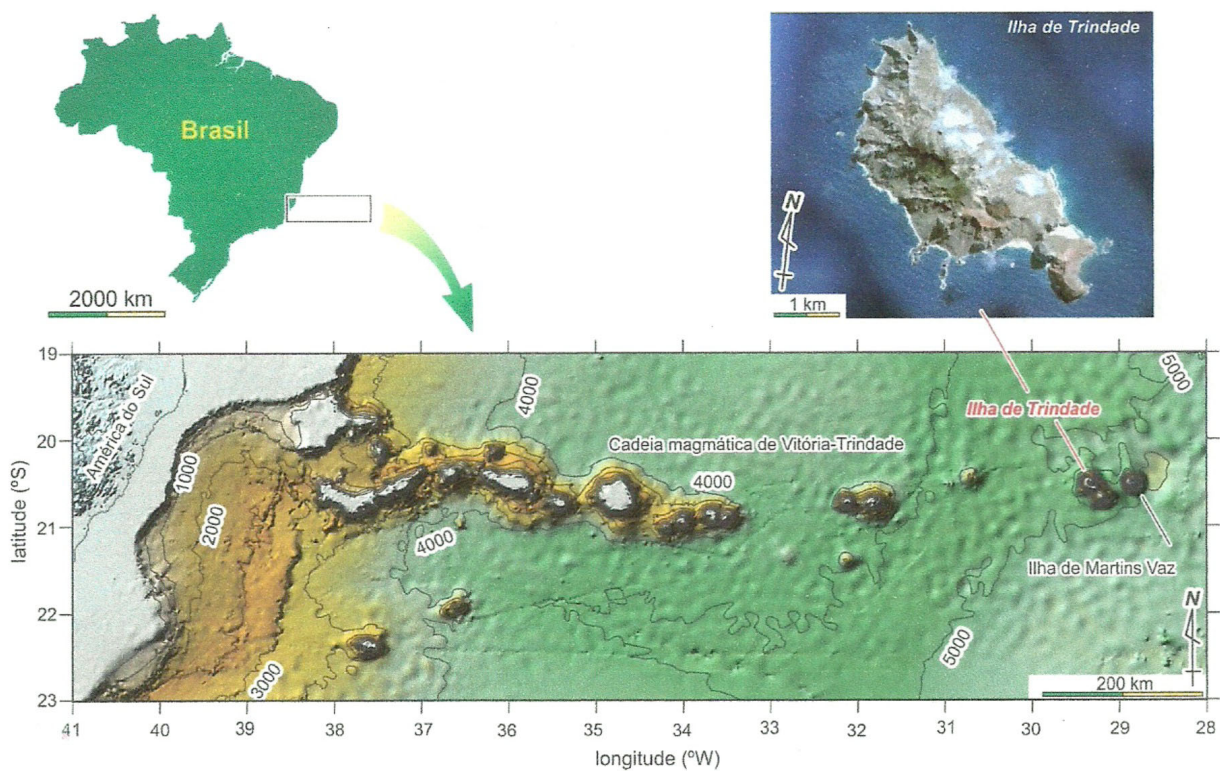
### DESCRIÇÃO E COLETA DOS SOLOS

A coleta das amostras de solos para a identificação dos elementos químicos presentes e sua disponibilidade foi realizada ao longo de uma topossequência (Figura 2) abrangendo toda a face norte da ilha e parte da face sul. Tais coletas foram feitas após intenso reconhecimento da área e determinada a localização

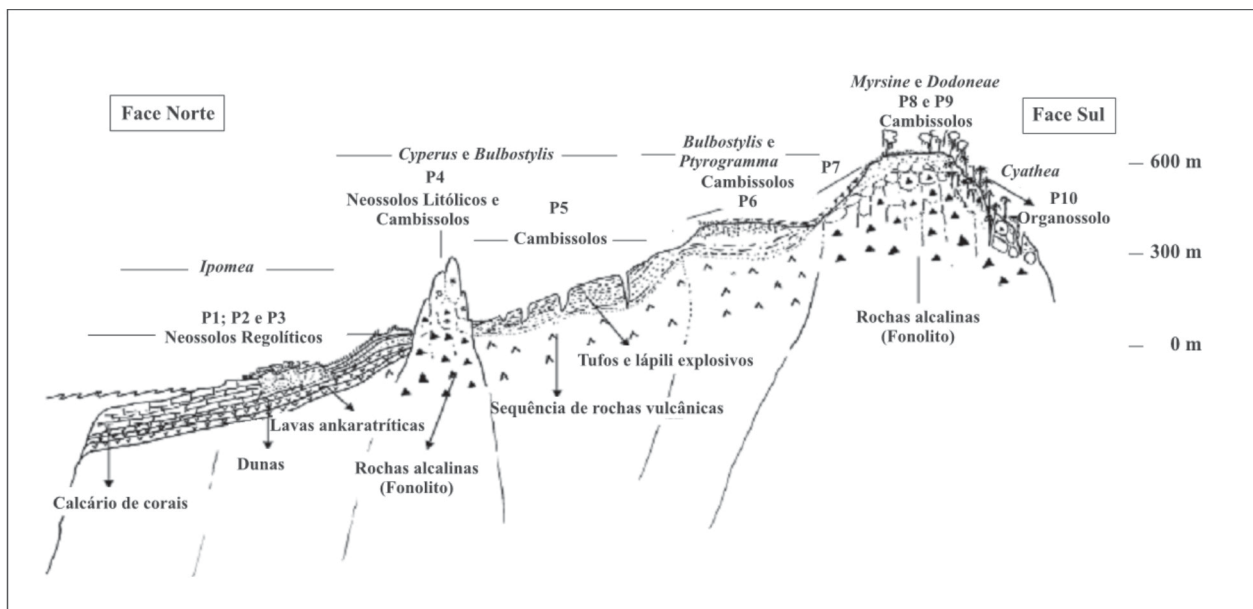
da topossequência, foram selecionados solos resultantes de variações litológicas, topográficas e de cobertura vegetal. A descrição de campo foi realizada segundo o Manual de Descrição e Coleta de Solos no Campo (Lemos & Santos, 1996). Os solos foram classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006).

### DETERMINAÇÃO DOS ELEMENTOS TRAÇO EM SOLOS

Para o fracionamento químico de metais pela extração sequencial e ataque total, foram separadas amostras homogêneas da TFSA para a determinação dos elementos traços. Estas amostras foram



**FIGURA 1.** Mapa de localização da Ilha da Trindade, ES. A imagem de satélite é originada de Google Earth™. O mapa batimétrico é originado de dados do TOPO (UCSD-SIO, 2011) com base na batimetria predita (Smith & Sandwell, 1997) e batimetria por navios, processados e visualizados pelo método de Motoki et al. (2009, 2010).



**FIGURA 2.** Corte representando uma topossequência de pedoambientes da Ilha da Trindade.

moídas em almofariz de ágata e passadas em peneira de 0,2 mm de abertura de malha.

## ANÁLISE TOTAL

Utilizou-se desta análise apenas visando determinar os teores totais dos elementos, sem se preocupar com as diferentes formas em que eles estão ocorrendo no solo. Utilizou-se uma mistura de 0,2 g de solo, HNO<sub>3</sub> (8 mL), HCl (5 mL) e HF (5 mL) em cadinhos de teflon de 100 mL, com digestão em banho de areia em chapa aquecida a 210 °C. Os extratos foram lidos em Espectrofotometria de Emissão Óptica com Plasma acoplado por Indução para a determinação dos elementos traços Ba, Cd, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr, Ti, V e Zn, além de Al, Ca e Mg. Os teores de K e Na foram determinados por meio de Fotoespectrometria de Absorção de Chama (Embrapa, 1997; Borges Junior, 2002; Albuquerque Filho, 2005).

## EXTRAÇÃO SEQUENCIAL

Esta análise visou à extração e quantificação de diferentes fases em que cada elemento se encontra no solo, utilizando-se o extrator mais adequado (mais seletivo) para cada fase. O maior problema dessa análise diz respeito à seletividade incompleta do extrator, que pode atacar fases distintas daquelas pretendidas, ou ser ineficiente para deslocar completamente a fase para a qual foi empregado (Borges Júnior, 2002; Albuquerque Filho, 2005).

Na busca por melhores resultados, diversas metodologias têm sido elaboradas. No presente caso, como no trabalho de Albuquerque Filho (2005), o esquema de extração utilizado foi o proposto por Borges Júnior (2002) como mostrado na Tabela 2, baseado nas metodologias já consagradas de Tessier et al. (1979) e Shuman (1985).

A extração foi feita em tubos de centrifuga de 50 mL e, ao final de cada etapa os tubos foram centrifugados a 3000 rpm por 5 min para obtenção do extrato, e as amostras levadas para estufa de circulação forçada a 25 °C por 16 horas para a perda da umidade residual, antes de cada etapa da extração. As amostras não foram pesadas antes e após cada extração, mesmo existindo perda de material entre cada uma delas. Assim, os teores obtidos representam a extração de forma sequencial e não a percentagem do teor total. O procedimento de determinação dos elementos em cada fração foi o mesmo dos teores totais. A utilização de Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 1 mol L<sup>-1</sup> para determinação dos teores trocáveis inviabilizou a leitura do elemento Mg nesta fração e nas frações subsequentes, sendo registrados apenas os teores solúveis em água e totais deste elemento nos solos estudados, o mesmo ocorrendo para o Na, onde foi utilizado hipoclorito de sódio na fração ligada a matéria orgânica.

## MINERALOGIA DA FRAÇÃO ARGILA POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X (DRX)

Para uma melhor confirmação dos elementos químicos encontrados na extração sequencial utilizou-se a análise mineralógica dos solos. A fração argila foi analisada por DRX (difratometria de Raios-X), para identificação dos minerais presentes e com isso, quais os elementos constituintes. As amostras foram moídas em almofariz e montadas em placas Koch (amostras não orientadas; Besoain, 1985) e os difratogramas foram obtidos em goniômetro vertical Philips, controlado por computador. A velocidade do goniômetro foi de 1°2θ/min, com amplitude de 4 a 65°2θ. O difratômetro, equipado com tubo de cobre e utilizando radiação CuKα, foi operado a 25 mA e 35 kV, para todas as análises realizadas.

TABELA 2. Etapas da extração sequencial de metais no solo.

Fração	Extração
Solúvel	2,0 g de solo; 20 mL de água; 30 min de agitação
Trocável	20 mL da solução Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 1 mol L <sup>-1</sup> , pH 7,0; 1 h de agitação
Ligada a carbonato	20 mL da solução NH <sub>4</sub> OAc 1 mol L <sup>-1</sup> , pH 5,0; 5 h de agitação
Ligada a óxidos amorfos de Fe, Al e Mn	20 mL da solução oxalato de amônio 0,2 mol L <sup>-1</sup> e ácido oxálico 0,2 mol L <sup>-1</sup> , pH 3,0; 2 h de agitação
Ligada a óxido de Fe cristalino	20 mL da solução (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O 0,2 mol L <sup>-1</sup> e H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 0,2 mol L <sup>-1</sup> , pH 3,0, com ácido ascórbico 0,1 mol L <sup>-1</sup> ; banho-maria a 100 <sup>o</sup> C por 30 minutos, com agitação periódica.
Ligada à matéria orgânica	10 mL da solução NaOCl 0,7 mol L <sup>-1</sup> , pH 8,5; banho-maria a 100 <sup>o</sup> C por 30 minutos, com agitação ocasional; com repetição do processo

Foram feitos vários tratamentos para diferenciar os minerais presentes na fração argila (Whittig & Allardice, 1986): a) saturação com Mg e secagem ao ar, para diferenciar minerais do tipo 2:1 expansíveis (vermiculita e montmorilonita) dos não expansíveis (mica); b) saturação com Mg e solvatação com glicerol, para diferenciar vermiculita e esmectita; c) saturação com K e secagem ao ar, para diferenciar clorita, vermiculita e vermiculita com hidróxi entrecamadas

(VHE); d) saturação com K e aquecimento a 300 °C, para diferenciar clorita e VHE; e) saturação com K e aquecimento a 550 °C, para diferenciar clorita e minerais interestratificados e concentrar minerais do tipo 2:1. Após os tratamentos, as amostras foram montadas em lâminas de vidro, utilizando-se a técnica do esfregaço (amostras orientadas), e analisadas por DRX. A amplitude foi de 3 a 15 °2θ/min e a velocidade angular do goniômetro de 1 °2θ/min.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### ANÁLISE TOTAL E EXTRAÇÃO SEQUENCIAL

Foram estudados solos em 10 diferentes localizações na paisagem e a extração sequencial feitas nas seguintes frações: solúvel em água, trocável, ligada a carbonatos, ligada a óxidos amorfos, ligada a óxidos cristalinos e ligada à matéria orgânica, além dos teores totais dos elementos em cada amostra. Foram realizadas análises para os seguintes elementos: Al, As, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Ti, V e Zn, sendo que, será discutido apenas os elementos encontrados em maiores concentrações.

A título de ilustração só foi possível mostrar os dados referentes à análise total dos elementos químicos (Figura 3), visto que a fração sequencial gerou uma enorme gama de dados que inviabiliza sua ilustração.

Pelo exposto verifica-se que dentre os elementos, àqueles que apresentam maiores valores em todos os solos estudados são o Fe e Al, seguidos do Mg e Ti. Isso se deve principalmente a litologia, independente da posição topográfica.

Os dados do fracionamento sequencial revelaram diferenças basicamente ligadas à litologia e posição topográfica, permitindo distinguir dois ambientes pedogenéticos distintos, um de solos mais jovens e menos intemperizados, aproximadamente até 450 m, (Neossolos) e outro de solos formados a partir de materiais de origem mais intemperizados, de 450-600 m de altitude (Cambissolos e Organossolos).

Os teores de Al<sup>3+</sup> trocável foram mais significativos nos solos encontrados a maiores altitudes, ambientes onde o clima mais úmido e o acúmulo de matéria orgânica em condições mais ácidas favorecem sua solubilidade, além da rocha ser rica neste elemento, sendo pobre em Si (alcalina).

Da mesma forma, os teores de Al ligado a compostos amorfos de Al e Fe ou cristalinos de Fe foram maiores nos solos mais intemperizados, aqueles encontrados nos platôs e encostas dos picos, sugerindo maior grau de evolução destes solos e maior substituição de Al na estrutura de óxidos de Fe. O efeito da matéria orgânica complexando o Al fez-se notar,

evidenciando a importância da topografia e pedoclima na gênese dos solos de Trindade. As partes mais altas dos picos estão associadas às coberturas de pteridófitas que fornecem quantidades apreciáveis de matéria orgânica, contrastando com as partes baixas.

De certa forma, os teores de Ca apresentaram comportamento inverso ao Al, corroborando a importância do pH na distribuição dos dois elementos igualmente litófilos, na classificação de Goldschmidt. No solo mais próximo do mar, onde são esperados aportes de sprays marinhos e carbonatos bioclásticos, os teores de Ca solúveis foram bem maiores. O Ca total foi muito baixo nos solos mais elevados da ilha, onde o pH é ácido e o grau de intemperismo bem maior, com menor possibilidade de aportes marinhos.

Teores trocáveis mais elevados de Cr foram obtidos em solos desenvolvidos de tufos, que também revelou os maiores teores totais, denotando influência mantélica mais profunda (ultramáfica) neste solo.

Os teores de Cu foram altamente variáveis, com Cu ligado a MO maior nos solos mais elevados e mais ricos em matéria orgânica; Cu total maior nos solos mais próximos do mar, em cotas altimétricas mais baixas e solos mais jovens, com menores teores nos solos derivados de rochas alcalinas.

Foram encontrados teores elevados de Fe total em todos os solos. Os solos formados por tufos e lavas basálticas são mais ricos em minerais máficos, e também são materiais mais facilmente intemperizados, o que facilita a formação de maior quantidade de óxidos de Fe cristalinos. Os conteúdos de Fe total são condizentes aos relatados por Motoki et al. (1987), Bell & Powell (1969) e Cunha et al. (1990) para rochas alcalinas e para rochas básicas (Nascimento & Gorayeb, 2004).

Os teores de K total não foram muito elevados como o Fe, Al e Ca; onde os maiores valores encontrados podem estar ligados a uma maior quantidade de feldspatos nas rochas. No entanto, os solos de Trindade são, em sua maioria, originados de fonolitos, ricos em feldspatóides (leucita e nefelina) que são fontes de K

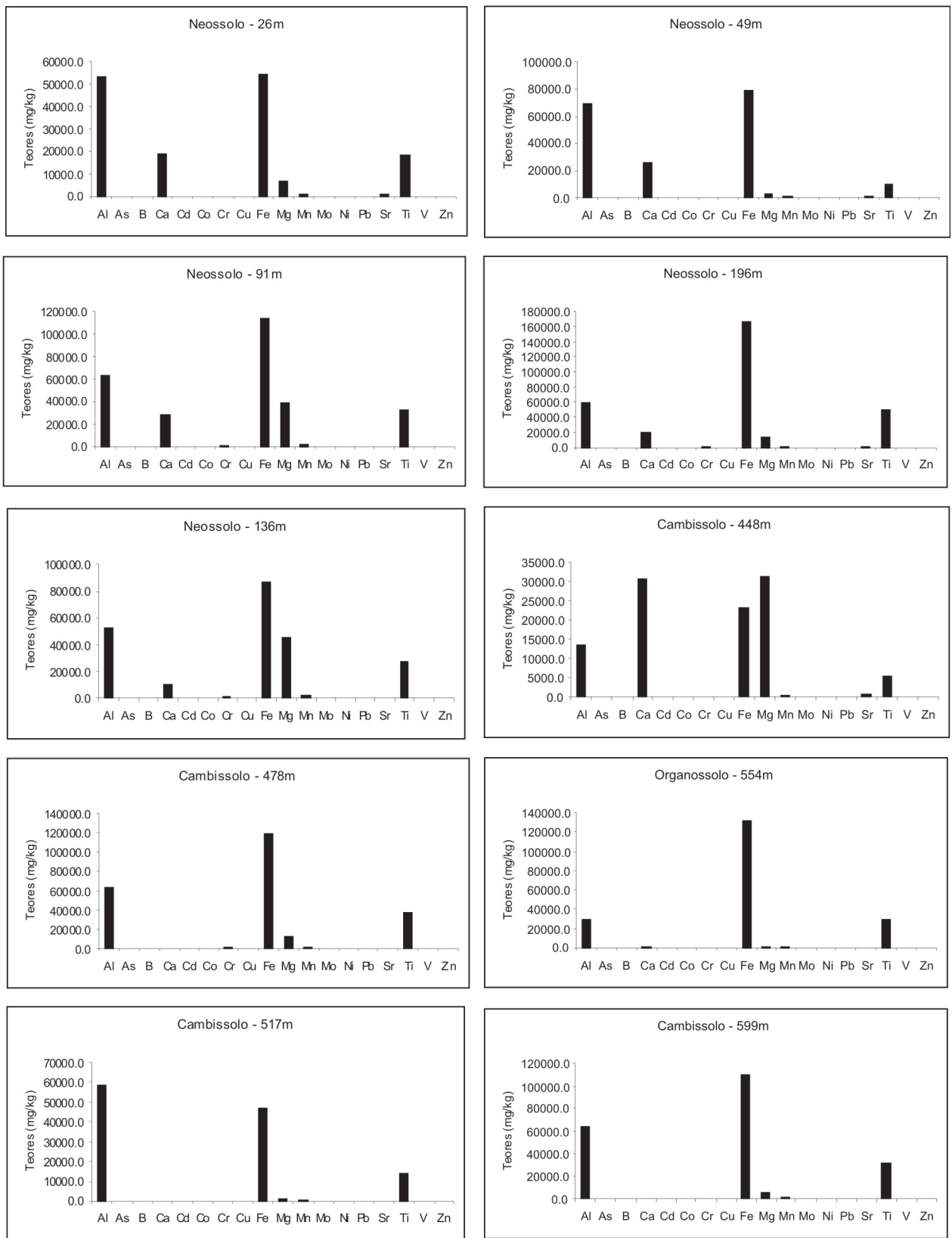


FIGURA 3. Teores de elementos totais nos solos estudados em diferentes altitudes na ilha da Trindade.

pouco disponíveis. Os solos que apresentaram teores muito baixos podem ser atribuídos à maior lixiviação das partes mais úmidas e elevadas. Os teores totais foram menores que os encontrados na literatura, na faixa de 30.000 a 50.000 mg/kg para rochas alcalinas e 20.000 a 30.000 mg/kg para rochas basálticas, o que mostra que os solos apesar de jovens, já perderam quantidade apreciável deste metal.

Altos teores de Mg também foram encontrados em solos mais jovens. Este Mg está associado a minerais ferromagnesianos presentes nos materiais piroclásticos presentes nas partes mais baixas e menos intemperizada.

Teores elevados de Mn estão presentes em solos originados de rochas basálticas. O Mn total se comportou da mesma forma que os óxidos de Fe cristalinos, e as frações solúvel e trocável foram baixas em todos os solos. Durante o intemperismo, o Mn se dissolve principalmente na forma de bicarbonato,  $Mn(HCO_3)_2$ . O Mn se dissolve nas águas que contêm  $CO_2$  e sulfatos com mais facilidade que o Fe, e os compostos manganosos são mais estáveis em solução que os ferrosos.

O Na total apresentou maiores teores nos perfis de rochas alcalinas, onde o teor de álcalis é superior às rochas básicas, sendo o  $Na_2O$  constituinte dos feldspatóides e feldspatos (plagioclásio). Não ocorreu influência aparente dos sais marinhos nos teores de Na nos perfis mais próximos ao mar.

Nas rochas alcalinas, há pobreza generalizada de Ni, ocorrendo às vezes em rochas básicas e em particular nas ultrabásicas, formando minerais contendo Fe-Ni. O Ni tem tendência a se concentrar nos primeiros minerais magnesianos e ferromagnesianos que se cristalizam. Os teores de Ni total foram maiores nos perfis originados de basaltos, enquanto nos perfis de rochas alcalinas os teores foram quase nulos, como observado para fonolitos (Cunha et al., 1990) e Nefelina fonolito (Motoki et al., 1987). Praticamente todo o Ni se encontra na fração total, comprovando a existência de Ni apenas nas estruturas dos minerais.

Os minerais de Ti mais abundantes são a ilmenita ( $FeTiO_3$ ), rutilo ( $TiO_2$ ) e titanita ( $CaTi[O,OH,F]SiO_4$ ). A ilmenita contém 52,7% de  $TiO_2$  e a titanita 41% (Pott, 1987). Estes três minerais são componentes acessórios de muitas rochas presentes em Trindade, que apresentam valor de  $TiO_2$  variando de 0,30 a 3,6%. Por essa razão, o teor de Ti total foi elevado em todos os perfis, com valores próximos aos relatados para rochas basálticas (Nascimento & Gorayeb, 2004). A razão dos elevados teores de Ti no ataque total se deve ao titânio estar presente nas estruturas de muitos dos minerais resistentes. Os sais solúveis de Ti se hidrolisam com facilidade. Os minerais petrográficos de Ti mais importantes, ilmenita e rutilo são estáveis durante o

intemperismo, mantendo-se inalterados nos produtos intemperizados (Milnes & Fitzpatrick, 1989).

Os teores de Zn total foram uniformes. Nos perfis de rochas alcalinas os teores de Zn ligados à fração matéria orgânica foram menores, mesmo com elevada quantidade de matéria orgânica nestes solos, devido à baixa concentração deste metal neste tipo de rocha (Cunha et al., 1990).

## MINERALOGIA DA FRAÇÃO ARGILA POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X (DRX)

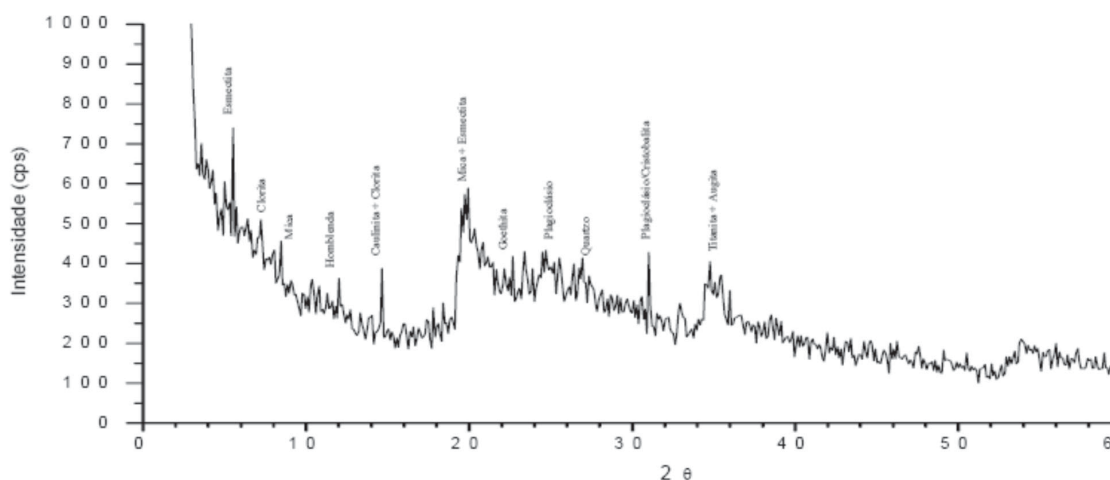
Os resultados da análise mineralógica da fração argila dos solos de Trindade evidenciam os resultados da extração sequencial de metais, pois mostram quais os minerais presentes nas amostras estudadas e, com isso, verificam-se quais os elementos constituintes, como mostra a Figura 4.

De forma geral, foi possível observar a presença de minerais primários em todos os solos estudados, ao lado de minerais secundários decorrentes de intemperismo, revelando a natureza incipiente da alteração mineral nos solos da ilha. Por outro lado, a mineralogia da fração argila dos solos revela grande similaridade com a mineralogia de materiais estudados por Almeida (1962). O autor mostra que a mineralogia de Trindade, não difere das províncias congêneres, em que teores deficientes em sílica, acompanhados de excesso em sódio e alumina, imprimem traços distintivos à mineralogia da série eruptiva. Nas rochas de Trindade, falta por completo quartzo magmático, mas estão presentes plagioclásio, nefelina, analcita, noseana e micas. Os anfibólios e piroxênios são responsáveis pela riqueza em sódio, alumínio e titânio.

Os minerais encontrados na fração argila, pouco se distinguem dos encontrados na fração areia (Clemente, 2006), o que reforça a juvenilidade dos solos da ilha. Os solos de posição mais baixa do relevo apresentam uma maior diversidade de minerais primários, devido ao intemperismo menos acentuado, enquanto em maiores altitudes, encontram-se maior proporção de minerais secundários (Goethita, Gibbsite), mas ainda com presença de minerais primários incomuns como hornblenda (anfíbólios) e plagioclásios na fração argila. Não ocorrem diferenças muito significativas entre os solos estudados, sendo comum a ocorrência de plagioclásios, hornblenda, mica, esmectita, magnetita e anatásio. Os solos mais evoluídos apresentam traços de gibbsite, presença de goethita e caulinita e algumas variações. A coexistência de gibbsite com uma assembléia de minerais primários indica direta solubilização de plagioclásios, em função da hidrólise ácida nos solos mais elevados da ilha, à exemplo do reportado por Stoops et al. (1994) e Simas et al. (2004).

A presença generalizada de minerais primários em





**FIGURA 4.** Difratograma de raio-x da argila natural de um Neosolo, a 49 m de altitude da topossequência estudada.

solos de Trindade, na proporção encontrada na fração argila, situa-se entre os mais jovens e menos intemperizados já estudados em todo o território brasileiro, denotando sua origem vulcânica recente, e

diferenciando-se dos solos de rochas vulcânicas de Noronha, que mostram menor proporção de minerais inalterados e grau de intemperismo bem maior (Marques, 2004).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os teores totais dos elementos nos solos de Trindade prevaleceram o Fe e Al, seguidos do Mg e Ti. Isso se deve principalmente a litologia, independente da posição topográfica que ocupam.

Na extração sequencial, foram encontrados maiores teores dos metais Cu, K, Mn, Ni e Zn na fração ligada a MO e na fração ligada a óxidos de Al, Mn e Fe amorfos. Na fração ligada a óxidos de Fe cristalinos, o Cr e Ti tiveram os maiores teores em relação ao total.

De forma geral, os teores disponíveis, aqueles encontrados na fração solúvel e trocável, foram muito baixos em relação à fração total de cada metal, mostrando que apesar de os solos de Trindade possuir riqueza nestes metais, eles se encontram nas estruturas cristalinas dos minerais, nos complexos de MO e de Al e Fe, tanto amorfos quanto cristalinos.

A fração ligada a carbonatos foi importante apenas para os solos próximos a praia, principalmente para o Ca, pelo material de origem de areia carbonática. Nos demais solos, a contribuição de carbonatos se deve principalmente às eventuais cascas de ovos nos ninhais das aves e dos exoesqueletos dos caranguejos terrestres que infestam todas as partes da ilha, inclusive nos picos mais altos.

O estudo da mineralogia da fração argila comprovou a existência de minerais primários em praticamente todos os solos estudados, inclusive nos mais evoluídos, o que explica a presença generalizada de diferentes metais em toda a extensão da ilha. A disponibilidade destes metais depende somente da posição na topossequência estudada, pois esta gera um microclima próprio afetando a solubilização dos elementos.

## AGRADECIMENTOS

À marinha do Brasil (Navio Hidrográfico Sirius e Graça Aranha), pelo apoio no transporte e permanência no Posto Oceanográfico da Ilha da Trindade (POIT) durante três campanhas de campo na ilha, e ao apoio do CNPq na concessão de bolsa de estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALBUQUERQUE FILHO, M.R. **Geoquímica de solos da Península Keller, Ilha Rei George, Antártica, como subsídio ao monitoramento ambiental**. Viçosa, 2005. 103 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa.
2. ALLOWAY, B.J. The origin of heavy metals in soil. In: ALLOWAY, B.J. (Ed.), **Heavy metals in soil**. New York: John Wiley & Sons, p. 29-39, 1990.
3. ALMEIDA, F.F.M. **Geologia e Petrologia da Ilha da Trindade**. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, Monografia XVIII, 197 p., 1961.
4. ALMEIDA, F.F.M. **Petrologia da Ilha da Trindade**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 223 p., 1962.
5. BELL, K. & POWELL, J.L. Strontium isotopic studies of alkalic rocks. The potassium rich lavas of the Birunga and Toro-Ankole regions, East and Central Equatorial Africa. **Journal of Petrology**, v. 10, p. 536-572, 1969.
6. BESOAIN, E. Mineralogía de Arcillas de Suelos. Costa Rica, Instituto Interamericano São Paulo: **Boletim**, Instituto Paulista de Oceanografia, p. 37-48, 1951.
7. BORGES JUNIOR, M. **Distribuição e contaminação de Zn, Cd e Pb em perfis de solo e obtenção de valores de referência local no município de Vazante-MG**. Viçosa, 2002. 152 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa.
8. CARDOSO, J.C. Caracterização das principais unidades pedológicas do “Esboço da carta dos solos de São Tomé”. Junta de Investigações do Ultramar, Lisboa. **Revista Estudos, Ensaios e Documentos**, p. 53- 88, 1958.
9. CLEMENTE, E.P.; SCHAEFER, C.E.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R.; OLIVEIRA, F.S.; ALVES, R.J.; MELO, V.F. Solos “Endêmicos” da Ilha da Trindade. Brasília: MMA, SBF, **Ilhas Oceânicas Brasileiras – da pesquisa ao Manejo**, p. 59-82, 2006.
10. COKER, E.G. & MATTHEWS, P.J. Metals in sewage sludge and their potential effects in agriculture. **Water Science Technology**, v. 15, p. 209-225, 1983.
11. CUNHA, M.C.L.; DANI, N.; FORMOSO, M.L.L. A importância do estudo Biogeoquímico na mobilidade dos elementos residuais em ambiente supergênico. **Revista Brasileira de Geociências**, n. 20, v. 1-4, p. 173-177, 1990.
12. EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 212 p., 1997.
13. EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 323 p., 2006.
14. FARIA, F.X. Os solos da Ilha do Fogo (Arquipélago de Cabo Verde). Junta de Investigações científicas do Ultramar. **Revista Estudos, Ensaios e Documentos**, n. 129, 146 p., 1974.
15. FONSECA, A. DO C. Geoquímica dos Solos. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S. DA; BOTELHO, R.G.M. (Orgs.), **Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 165-194, 1999.
16. GUERRA, A.J.T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. DA C. (Orgs.), **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 149-209, 2001.
17. LEMOS, R.C. & SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 3 ed., 84 p., 1996.
18. MARQUES, F.A. **Caracterização e classificação de solos da Ilha de Fernando de Noronha (PE)**. Pernambuco, 2004. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Departamento de Solos, Universidade Federal Rural de Pernambuco.
19. MILNES, A.R. & FITZPATRICK, R.W. Titanium and zirconium minerals. 2nd ed. In: DIXON, B. & WEED, S.B. *Minerals in soil environment*. **Soil Science Society America**, 1244 p., 1989.
20. MOTOKI, A.; GOMES, C.B.; DUTRA, C.V. Assimilação de rochas encaixantes pelo magma Nefelina Sienítico do Maciço Alcalino da Ilha de Vitória, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 1, 1987, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SBGq, 1987, v. 1, p. 375-397.
21. MOTOKI, A.; SICHEL, S.E.; CAMPOS, T.F.C.; SRIVASTAVA, N.K.; SOARES, R.S. Present-day uplift rate of the Saint Peter and Saint Paul Islets, Equatorial Atlantic Ocean. Ouro Preto: **REM-Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 3, p. 331-342, 2009.
22. MOTOKI, A.; SICHEL, S.E.; VARGAS, T.; AIRES, J.R.; IWANUCH, W.; MELLO, S.L.M.; MOTOKI, K.F.; SILVA, S.; BALMANT, A.;

- GONÇALVES, J. Geochemical evolution of the felsic alkaline rocks of Taguá, Rio Bonito, and Itaúna intrusive bodies, State of Rio de Janeiro, Brazil. **Geociências**, v. 29, n. 3, p. 291-310, 2010.
23. NASCIMENTO, R.S. & GORAYEB, P.S.S. Basaltos da Suíte Parapuí, Gráben Jaibaras, Noroeste do Ceará: Caracterização, Petrografia, Geoquímica e Química Mineral. **Revista Brasileira de Geociências**, n. 34, v. 4, p. 459-468, 2004.
  24. PISSARRA, J.B. Mineralogia dos solos de São Tomé e Príncipe. Junta de Investigações do Ultramar, Lisboa. Lisboa: **Revista Estudos, Ensaios e Documentos**, n. 116, 82 p., 1965.
  25. POTT, P.J. **A handbook of silicate Rock analysis**. Glasgow: Blackie, 622 p., 1987.
  26. SHUMAN, L.M. Fractionation method for soil microelements. **Review Soil Science**, v. 140, p. 11-22, 1985.
  27. SIMAS, F.N.B.; SCHAEFER, C.E.G.R.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R. DE; MICHEL, R.F.M.; DIAS, L.E.; BORGES JR., M.; PRATES, L. Atributos químicos de criossolos ornitogênicos da Bahia do Almirantado, Antártica. In: SCHAEFER, C.E.; FRANCELINO, M.R.; SIMAS, F.N.B.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R. DE (Orgs.), **Ecossistemas costeiros e monitoramento ambiental da Antártica Marítima: Bahia do Almirantado, Ilha Rei George**. Viçosa: NEPUT/DPS, 192 p., 2004.
  28. SMITH, W.H. & SANDWELL, D.T. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. **Science Magazine**, v. 277, n. 5334, p. 1957-1962, 1997.
  29. STOOPS, G.; GERARD, M.; ARNALDS, O. A micromorphological study of Andosol genesis in Iceland. In: KAPUR, S., MERMUT, A.R., STOOPS, G. (Eds.), **New Trends in Soil Micromorphology**. Berlin: Springer-Verlag, p. 67-90, 2008.
  30. TEÓDULO, M.J.R.; LIMA, E.S.; NEUMANN, V.M.L.; LEITE, P.R.; SANTOS, M.L.F. Comparação de métodos de extração parcial de metais traço em solos e sedimentos de um estuário tropical sob a influência de um complexo industrial portuário, Pernambuco Brasil. **Estudos Geológicos**, v. 13, p. 23-34, 2003.
  31. TESSIER, A.; CAMPBELL, P.G.C.; BISSON, M.I. Sequential extraction procedure for the speciation of particular trace metals. **Analytical Chemistry**, n. 51, v. 7, p. 844-851, 1979.
  32. UCSD-SIO. **Measured and estimated seafloor topography**. Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego. Disponível em: [http://topex.ucsd.edu/marine\\_topo/mar\\_topo.html](http://topex.ucsd.edu/marine_topo/mar_topo.html). Acessado em: 10abr2011.
  33. WEAVER, B.L. Geochemical of the highly -undersaturated ocean island basalt suites from the South Atlantic Ocean Fernando de Noronha and Trindade. **Contributions to Geology and Petrology**, v. 105, p. 502-515, 1990.
  34. WHITTIG, L.D. & ALLARDICE, W.R. X-ray diffraction techniques. In: KUTER, A. (Ed.), **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical properties. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, p. 331-362, 1986. (Agronomy Series, 9).

*Manuscrito Recebido em: 1 de março de 2011  
Revisado e Aceito em: 2 de outubro de 2011*