UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEOFÍSICAS E GEOLÓGICAS

ALTERAÇÃO SUPERGÊNICA DOS BASALTOS DE PORTO FRANCO-GRAJAÚ - MA

Tese Apresentada por

ANTONIO VAQUERA VARGAS

como requisito parcial à obtenção do grau em

MESTRE EM CIÊNCIAS

Na área de

GEOQUÍMICA

Conferido pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Geofísicas e Geológicas da Universidade Federal do Pará

Aprovado: 04.10.1985

NILSON PINTO DE OLIVEIRA (ORIENTADOR)

ROLAND G. SCHWAB

SONIA MARIA BARROS DE OLIVEIRA

Comitê de Tese

SUMÁRIO

PAG

DEDICATÓRIA..... I

AGRADECIMENTOS..... II

LISTA DE ILUSTRAÇÕES..... IV

RELAÇÕES DE ABREVIATURAS E/OU SÍMBOLOS..... VIII

RESUMO..... 1

ABSTRACT..... 3

1 INTRODUÇÃO..... 5

2 ASPECTOS FISIOGRÁFICOS DA ÁREA DE OCORRÊNCIA DAS ROCHAS BASÁLTICAS..... 7

2.1 Localização..... 7

2.2 Clima..... 7

2.3 Relevo e Vegetação..... 12

2.4 Relações Geológicas das Rochas Basálticas..... 12

3 METODOLOGIA..... 14

3.1 Técnicas de Campo..... 14

3.1.1 Seleção, Descrição e Amostragem dos Perfis..... 14

3.1.2 Amostragem de Águas..... 15

3.2 Técnicas de Laboratório..... 15

3.2.1 Análises Química e Físico-Química das Amostras de Água..... 16

3.2.1.1 Condutividade e pH das Águas..... 16

3.2.1.2 Análise Química das Águas..... 16

3.2.2 Preparação e Análise das Amostras de Solo e Rochas..... 18

3.2.2.2 Determinações Físico-Químicas..... 18

3.2.2.3 Análise Mineralógica..... 18

3.2.2.4 Análise Química..... 19

4 CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS DOS PERFIS..... 21

4.1 Perfil S-2..... 21
4.2 Perfil S-3..... 25
4.3 Perfil S-6..... 26
4.4 Perfil S-7..... 27
4.5 Perfil S-8..... 27
4.6 Perfil S-9..... 28
4.7 Conclusões Preliminares sobre a Evolução dos Perfis de Alteração..... 29

5 MINERALOGIA DOS PERFIS..... 31
5.1 Minerais Ocorrentes nos perfis..... 31
5.2 Distribuição dos Minerais nos Perfis..... 32
5.3 Discussão sobre a Distribuição dos Minerais nos Perfis..... 33
5.3.1 Resistência dos Minerais Primários ao Intemperismo..... 33
5.3.2 Seqüência das Alterações Minerais..... 33

6 DISTRBUIÇÃO DOS ELEMENTOS NOS SOLOS E ÁGUAS ESTUDADOS 38
6.1 Distribuição dos Elementos nos Solos..... 38
6.1.1 Elementos Principais..... 38
6.1.2 Elementos Traços..... 52
6.2 Valores de Eh e pH nos Solos..... 54
6.3 Distribuição dos Elementos e Valores de Condutividade e pH nas Amostras de Água..... 56

7 DISCUSSÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS..... 61
7.1 A Influência do pH e do Eh nos Processos de Alteração Supergênica dos Basaltos da Região de Porto Franco-Grajaú..... 61
7.1.1 Limites dos Valores de pH e Eh nos Processos Estudados..... 61
7.1.2 Influência do pH e do Eh na Formação de Novos Minerais..... 62
7.2 Estudo dos Gradientes de Composição Química Nos Processos de Alteração Supergênica..... 64
7.2.1 Migração e Concentração dos Elementos Maiores... 64
7.2.1.1 Comportamento do Elemento Alumínio..... 65
7.2.1.2 Comportamento do Elemento Ferro..... 65

7.2.1.3 Comportamento dos Elementos Cálcio e Magnésio. 65
7.2.1.4 Comportamento dos Elementos Sódio e Potássio.. 68
7.2.1.5 Comportamento do Elemento Titânio..... 68
7.2.1.6 Comportamento do Elemento Manganês..... 68
7.2.1.7 Comportamento do Elemento Fósforo..... 69
7.2.1.8 Perda ao Fogo..... 69
7.2.2 Migração e Concentração dos Elementos Traços na Zona de Alteração Supergênica..... 69
7.2.3 Cálculo de Ganhos e Perdas durante o Intemperismo 73
7.2.4 Influência das Concentrações Químicas na Formação de Novos Minerais..... 88
7.2.5 A Constância dos Óxidos Residuais..... 89
7.2.6 O Processo de Dessilificação em Função dos Gradientes de Concentração Química..... 92
7.2.7 Relações entre a Percentagem de Óxidos Residuais e a Profundidade..... 93
7.3 Influência dos Constituintes Dissolvidos no Processo de Alteração Supergênica..... 95
7.3.1 Influência dos Constituintes Dissolvidos na Mobilidade dos Elementos..... 96
7.3.2 Influência dos Constituintes Dissolvidos na Formação de Novos Minerais..... 97
7.3.2.1 Sistema HCl - H_2O - Al_2O_3 - Na_2O - SiO_2 a 25°C 98
7.3.2.2 Sistema HCl - H_2O - Al_2O_3 - K_2O - SiO_2 a 25°C 100
7.3.2.3 Sistema HCl - H_2O - Al_2O_3 - MgO - SiO_2 a 25°C 102
7.3.2.4 Sistema HCl - H_2O - Al_2O_3 - CaO - SiO_2 a 25°C 104
7.4 Influência do Clima nos Processos de Alteração.... 105
7.4.1 Influência do Clima nas Características morfológicas e Mineralógicas dos Perfis..... 105
7.4.2 Influência do Clima na Mobilidade dos Elementos. 106

8 CONCLUSÕES..... 107

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 111

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Nilson Pinto de Oliveira pela prestimosa orientação dada durante o desenvolvimento desta tese, bem como o apoio constante e diligente para encaminhar-me na pesquisa geoquímica.

Aos Drs. Roland G. Schwab e Sonia Barros de Oliveira pelas valiosas sugestões na elaboração e correção deste trabalho.

Ao Dr. Werner Truckenbrodt pelas suas sugestões na interpretação de difratogramas de raios-X.

Aos professores Walter Schuckmann, Reginaldo Monteiro e Manoel Quaresma da Costa pelo ascessoramento na realização das análises químicas.

Aos colegas e leais amigos Marco Tulio Guillen e Alexandre Figueiras, pelo incentivo e colaboração em todas as etapas de trabalho e convivência durante o curso de pós-graduação.

Ao Dr. Thomas Scheller e ao colega Antonio Abel Gonzales pelas sugestões na elaboração de programas de computação.

Aos amigos tecnologistas do Centro de Geociências Raimundo Nonato Pinto de Oliveira, José Herculano Neto, Vania Nogueira e Manoel Magalhães pela sua presteza e diligente cooperação nas análises por fluorescência de raios-X, absorção atômica, via úmida e análise química de água, respectivamente.

Ao tecnologista Paulo Magalhães pela eficiente colaboração nos trabalhos de computação.

Aos motoristas Evandro Varela da Silva e Orlando Gomes da Silva pelo ajuda desinteressada que me dispensaram nas diferentes etapas de coletas de amostras.

As Srtas Maria da Gloria Ribeiro Costa, Aracilda da Costa Santos e Bernadette de Lourdes Bessa , secretarias do curso de Pós-Graduação.

A todos os integrantes do Centro de Geociências que direta ou indiretamente contribuiram para a realização deste tra

balho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio dado na forma de bolsa de estudo no decorrer do curso.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

PAG

FIGURAS

01 Distribuição dos diques, derrames e sills de basalto na bacia do Maranhão e localização da área estudada..... 8

02 Tipos climáticos da área estudada e localização dos pontos de amostragem..... 9

03 Distribuição da precipitação pluviométrica (em mm) durante o ano de 1950, nos observatórios meteorológicos de Grajaú e Imperatriz..... 11

04 Fluxograma dos processamentos analíticos realizados..... 17

05 Estruturação dos perfis estudados neste trabalho e posição das amostras coletadas..... 22

06 Perfil de Solo desenvolvido sobre rocha basáltica, nos estágios iniciais do intemperismo (perfil S-2), na pedreira ao sul de Porto Franco.... 24

07 Perfil de alteração em estágio intermediário ; perfil S-8; na rodovia Br-226..... 24

08 Estágios de alteração do basalto no perfil S-6.. 36

09 Transformação gradativa da halloysita (na base) em caolinita (no topo) no perfil S-3..... 37

10 Distribuição dos elementos maiores e dos elementos traços, segundo a profundidade. Perfil S-2.. 46

11 Distribuição dos elementos maiores e dos elementos traços, segundo a profundidade. Perfil S-3.. 47

12 Distribuição dos elementos maiores e dos elementos traços, segundo a profundidade. Perfil S-6.. 48

13 Distribuição dos elementos maiores e dos elementos traços, segundo a profundidade. Perfil S-7.. 49

14 Distribuição dos elementos maiores e dos elementos traços, segundo a profundidade. Perfil S-8.. 50

15 Distribuição dos elementos maiores e dos elementos traços, segundo a profundidade. Perfil S-9.. 51

16 Relação entre pH, Eh e a profundidade dos perfis de alteração..... 63

17 Separação geoquímica dos elementos analisados, com base em seu potencial iônico..... 71
18 Representação gráfica das perdas e ganhos, em percentagem, dos constituintes químicos ao longo do perfil S-2..... 87
19 Representação gráfica das perdas e ganhos, em percentagem, dos constituintes químicos ao longo do perfil S-3..... 83
20 Representação gráfica das perdas e ganhos, em percentagem, dos constituintes químicos ao longo do perfil S-6..... 84
21 Representação gráfica das perdas e ganhos, em percentagem, dos constituintes químicos ao longo do perfil S-7..... 85
22 Representação gráfica das perdas e ganhos, em percentagem, dos constituintes químicos ao longo do perfil S-8..... 86
23 Representação gráfica das perdas e ganhos, em percentagem, dos constituintes químicos ao longo do perfil S-9..... 87
24 Distribuição em diagrama triangular dos valores de RO, Al_2O_3 e SiO_2. RO = FeO + CaO + MgO..... 91
25 Distribuição em diagrama triangular dos valores percentuais de Al_2O_3, Fe_2O_3 e TiO_2 de todas as amostras analisadas..... 91
26 Variação gradativa do teor de SiO_2 para todas as amostras estudadas em relação aos teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3..... 94
27 Variação gradativa dos óxidos residuais: Al_2O_3, Fe_2O_3 (total) e TiO_2 segundo a profundidade..... 94
28 Diagramas de atividade/atividade, mostrando relações de estabilidade nos sistemas: A) Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O e B) K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O..... 101
29 Diagramas de atividade/atividade, mostrando relações de estabilidade nos sistemas: A) CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O e B) MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O..... 103

TABELAS

01 Referência climática dos setores de Porto Franco - Estreito e Grajaú com base em dados meteorológicos dos observatórios de Tocantinópolis entre 1931 e 1950 e de Grajaú entre 1916 e 1942..... 10

02 Minerais presentes nas amostras estudadas..... 23

03 Razão da altura do pico (P) e do vale (V), nos difratogramas da smectita em lâminas orientadas para as amostras do perfil S-9..... 35

04 Composição química das amostras do perfil S-2..... 39

05 Composição química das amostras do perfil S-3..... 40

06 Composição química das amostras do perfil S-6..... 41

07 Composição química das amostras do perfil S-7..... 42

08 Composição química das amostras do perfil S-8..... 43

09 Composição química das amostras do perfil S-9..... 44

10 Valores de pH e Eh para as amostras em mistura com água na relação 3:2..... 55

11 Constituintes químicos das águas em contato com perfis de alteração. Lote nº 1..... 58

12 Constituintes químicos das águas em contato com perfis de alteração. Lote nº 2..... 58

13 Constituintes químicos das águas em contato com perfis de alteração. Lote nº 3..... 59

14 Constituintes químicos das águas em contato com perfis de alteração. Lote nº 4..... 59

15 Condutividade em micromhos/cm, das águas de Porto Franco-Grajaú:MA..... 60

16 Valores do pH das águas de Porto Franco-Grajaú:Ma. 60

17 Relações de concentração dos elementos alcalinos e alcalinos-terrosos, em função da profundidade nos perfis de alteração dos basaltos de Porto Franco - Grajaú:MA..... 66

18 Cálculo do aumento ou diminuição percentual de cada constituinte, para amostras do perfil S-2, considerando o Al_2O_3 como constante, segundo o método de Krauskopf..... 75

19 Cálculo do aumento ou diminuição percentual de cada constituinte, para amostras do perfil S-3, con-

siderando o Al_2O_3 como constante, segundo o método de Krauskopf..... 76

20 Cálculo do aumento ou diminuição percentual de cada constituinte, para amostras do perfil S-6, considerando o Al_2O_3 como constante, segundo o método de Krauskopf..... 77

21 Cálculo do aumento ou diminuição percentual de cada constituinte, para amostras do perfil S-7, considerando o Al_2O_3 como constante, segundo o método de Krauskopf..... 78

22 Cálculo do aumento ou diminuição percentual de cada constituinte, para amostras do perfil S-8, considerando o Al_2O_3 como constante, segundo o método de Krauskopf..... 79

23 Cálculo do aumento ou diminuição percentual de cada constituinte, para amostras do perfil S-9, considerando o Al_2O_3 como constante, segundo o método de Krauskopf..... 80

RELAÇÕES DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

No tratamento dos dados foram utilizados os computadores HP 9830A e HP 9845B. Estes instrumentos utilizam o ponto (.) em substituição a vírgula (,) adotada na grafia portuguêsa . Sendo assim, para efeito de padronização foi utilizado em todo o texto, o ponto em lugar de virgula. Por outro lado, os mencionados computadores não dispõem de caracteres para representar sub-índices e potenciais; assim sendo as fórmulas e compostos impressos tem os seguintes significados:

Representação com HP 9845	Significado
Al2O3	Al_2O_3
Fe2O3	Fe_2O_3
K2O	K_2O
Na2O	Na_2O
SiO2	SiO_2
P2O5	P_2O_5
MnO2	MnO_2
TiO2	TiO_2
H2O	H_2O
Fe2O3	Fe_2O_3
Fe3O4	Fe_3O_4
Cu2O	Cu_2O
Fe++	Fe^{++}
Fe+++	Fe^{+++}
A	A^o
Log[H4SiO4]	$Log[H_4SiO_4]$
Log[Na+]/[H+]	$Log[Na^+]/[H^+]$
Log[Ca++]/[H+]2	$Log[Ca^{++}]/[H^+]^2$
Log[Mg++]/[H+]2	$Log[Mg^{++}]/[H^{++}]^2$

Abraviaturas

P.F.	Perda ao Fogo
Trac.	Traços

RESUMO

O presente trabalho trata das modificações morfológicas, mineralógicas e geoquímicas ocorrentes durante o desenvolvimento de seis perfis de intemperismo de basaltos da região de Porto Franco - Grajaú, Estado do Maranhão. A principal característica macroscópica dos perfis estudados é a grande espessura do seu horizonte C. O horizonte B, inexiste nos perfis de pequena espessura e é muito delgado nos perfis mais desenvolvidos.

A alteração de basalto inicia-se com a decomposição da magnetita. A seguir, decompõem-se labradorita, pigeonita e augita, nesta ordem. O processo de alteração como um todo pode ser dividido em três estágios. O estágio inicial consiste na ruptura e desagregação das estruturas cristalinas dos minerais primários do basalto e na formação dos primeiros argilo-minerais, principalmente da smectita e da halloysita. O estágio pré-caolinítico, subseqüente, é caracterizado pelo extensivo desenvolvimento de smectita e halloysita. Finalmente, no estágio caolinítico predominam caolinita e/ou hematita. Todas essas transformações são graduais.

A variação da umidade na região estudada tem conseqüências bem definidas sobre o desenvolvimento da alteração. Na área de menor umidade, as características texturais do basalto são preservadas por mais tempo durante o processo de alteração, a velocidade de alteração do piroxênio, plagioclásio e smectita é menor, necessita-se de mais tempo para se atingir o equilíbrio mineral, a oxidação da magnetita ocorre mais lentamente e a hematita passa a ser um mineral comum no perfil, já nos primeiros estágios do intemperismo.

Os valores de pH nas amostras de solo variam de moderadamente alcalinos na base do perfil, onde se forma preferencialmente smectita, a moderadamente ácidos no topo do perfil, onde a caolinita é o argilo-mineral predominante. Os valores de Eh medidos indicam ser o ambiente em estudo altamente oxidante, o que implica em um rápido processo de oxidação do ferro, já nos primeiros estágios do intemperismo.

Da base para o topo dos perfis estudados nota-se um gradual e constante incremento dos teores dos elementos Al,

Fe (III) e Ti e, em parte também do Mn e do P, ao mesmo tempo em que a concentração de outros constituintes é reduzida. Essa redução ocorre rapidamente para os elementos alcalinos, alcalino-terrosos e Fe (II) e mais lentamente para a sílica. Os elementos traços têm sua distribuição geralmente relacionada a dos elementos maiores. De um modo geral, aumentam na sua concentração, da base para o topo do perfil, os elementos Co, Ni, V, Cu e Zr; no mesmo sentido diminuem de teores de Rb, Y, Nb e Sr. Os elementos Cr e Ba apresentam uma distribuição irregular.

Durante o desenvolvimento do processo de alteração, a relação entre os teores de Al_2O_3, Fe_2O_3 e TiO_2 permanece aproximadamente constante. O processo intempérico é, assim, essencialmente um processo de dessilificação, refletido nos altos teores de sílica dissolvida nas águas superficiais e subterrâneas da área estudada.

O uso dos diagramas de atividade para a interpretação dos dados hidroquímicos coletados indica que a tendência de formação de smectita cálcica e magnesiana nos primeiros estágios do intemperismo é especialmente acentuada na estação mais seca . Nos períodos de maior umidade detecta-se a tendência preferencial para a alteração direta para caolinita, já nos estágios mais incipiente do intemperismo.

ABSTRACT

This work deals with morphological, mineralogical and geochemical modifications during development of six basalt weathering profiles, in Porto Franco-Grajaú region, of the State of Maranhão. A main macroscopic feature of the analized profiles is the large thickness of their C horizon, while the B horizon is very narrow in well developed profiles and is not found in thin profiles.

Basalt alteration beging with magnetite alteration then, in order, labradorite, pigeonite and augite decompose. The alteration process, as a whole, can be subdivided in three stages. The initial stage includes breakdown of crystalline structures of the basalt primary minerals and formations of the first clay minerals, mainly smectite and halloysite. The next stage is defined by extensive development os smectite and halloysite. Finally, in the kaolinitic stage, kaolinite and/ or hematite prevail. All these changes are gradual.

Variatins in humidity in the region under study have well-defined conseqeunces on the development of alteration. In the least humid areas, the basalt textural characteristics are preserved during a longer time in the alteration process ; alteration rates of pyroxene, plagioclase and smectite are slower and it is necessary a longer time to reach mineral equilibria; magnetite oxidation develops more slowly, and hematite becomes a common mineral in the profile in the first stages of weathering.

pH values in soil samples are variable from moderately alkaline at the base of the profiles, where smectite is preferentially formed, to moderately acid at the top of the profiles, where kaolinite is dominant. Eh values indicate a highly oxidant environment, which leads to a rapid process of iron oxidation in the first stages of weathering.

It is noted, from the base to the top of the profiles, a gradual but constant increase in the contents of Al , Fe (III) and Ti, and partly of Mn and P, whereas concentrations

of other elements are reduced. This redution in rapid for alkaline and alkaline earth elements and Fe (II) and slower for silicon. Distribution of trace elements is generally related to that of major elements. In general, Co, Ni, V. Cu and Zr concentrations increase from the base to the top of profiles , whereas Rb, Y, Nb and Sr decrease in the same direction. Cr and Ba show an irregular distribution.

During the development of the alteration process the ratios among Al_2O_3, Fe_2O_3 and TiO_2 remain aproximately constante. The weathering process is, essencially, a desilici - fication process, which is reflected in the high dissolved silicon contents of the surface and underground waters of the areas studied.

Activity diagrams for the hydrochemical data interpretation show that the formation of calcic and magnesian smectite, in the first stages of weathering, occurs preferentially during the dry season. In the more humid peridos, it is detected a strong tendency for direct alteration to kaolinite since the earliest stages of weathering.

1 INTRODUÇÃO

O intemperismo é um dos processos mais importantes na gênese dos depósitos minerais da região amazônica. Este processo contribuiu decisivamente, por exemplo, para a formação das bauxitas de Paragominas e do Vale do Amazonas, das lateritas niquelíferas da Serra do Quatipuru, e do Vermelho (Serra dos Carajás), dos fosfatos aluminosos do NE do Pará e NW do Maranhão e dos depósitos de manganês da Serra do Navio e da Serra dos Carajás.

Apesar de sua importância, poucos trabalhos foram dedicados até o presente ao estudo do intemperismo na região amazônica. Além disso, na maioria desses raros trabalhos realizados, o objeto do estudo, eram perfis lateríticos antigos, geralmente de idade terciária, os quais apresentam-se muito bem para a definição das características dos produtos finais do imtempe - rismo laterítico prolongado, mas não constituem a melhor fonte de informações sobre os detalhes do processo de alteração das rochas em clima tropical em suas fases iniciais. Apenas os trabalhos de Goulart (1980), Damous (1981), Damous e Goulart (1983), tratam do intemperismo atual das rochas da região amazônica, ao estudarem a alteração de rochas graníticas da região Bragantina e Carajás (Pará).

No Brasil alguns pesquisadores vêm se dedicando ao estudo de alteração de rochas pelo intemperismo. Levi e Melfi (1972) estudaram a alteração de rochas ígneas e anfibólicas em climas subtropicais úmidos. Sighnolfi et al. (1973) estudaram as transformações químicas e mineralógicas das rochas granulíticas do embasamento brasileiro. Melfi e Levy (1971) estudaram a alteração geoquímica dos itabiritos em regiões tropicais úmidas. Moniz et al. (1973) estudaram a alteração de rochas basálticas do estado de São Paulo. Outros trabalhos sobre o tema foram realizados por Formoso e Pintaude (1978), Oliveira e Schwab (1980), Bittencourt (1980) etc.

Internacionalmente, existe, por outro lado, vasta bibliografia sobre a alteração de rochas em diferentes ambientes geoquímicos, na qual se destacam Dennen e Anderson (1962), Chesworth et al. (1981), Goldich (1938), Loughnan (1969).

Este trabalho trata do intemperismo atual de rochas básicas na Amazônia, dedicando-se especialmente ao estudo das transformações mineralógicas e geoquímicas ocorrentes nas fases iniciais da alteração dessas rochas. Para isso são estudados perfis de alteração de rochas basálticas aflorantes na porção noroeste do estado do Maranhão, assim como águas de superfície e sub-superfície em contato com esses basaltos, objetivando-se , especificamente:

a) Determinar a distribuição dos elementos durante a formação dos perfis de alteração e definir os fatores que controlam essa distribuição;

b) Estudar a mobilidade dos elementos nos solos e águas da região;

c) Determinar as transformações mineralógicas que ocorrem com o avanço do intemperismo;

d) Caracterizar os diferentes estágios de evolução da alteração;

e) Estudar a influência da variação sazonal da pluviosidade na área sobre a mobilidade dos elementos.

Três fatores principais levaram à escolha da área citada para a realização deste trabalho:

1) A área selecionada contém as melhores exposições de basalto em toda a região.

2) Dentro dessa área distinguem-se três diferentes tipos climáticos, fato que facilita o estudo da influência do clima sobre a evolução do intemperismo do basalto.

3) Os tipos climáticos que ocorrem na área representam relativamente bem os climas reinantes na Amazônia.

Dado que o intemperismo é um fenômeno diretamente influenciado por fatores ambientais, é necessário, para o entendimento dos processos de alteração das rochas basálticas da região em estudo, o conhecimento das principais características fisiográficas e geológicas da área. Essas características são apresentatadas no capítulo seguinte.

2 ASPECTOS FISIOGRÁFICOS E GEOLÓGICOS DA ÁREA DE OCORRÊNCIA DAS ROCHAS BASÁLTICAS

2.1 Localização

Os perfis de alteração estudados no presente trabalho são desenvolvidos sobre rochas basálticas aflorantes na região compreendida entre as cidades de Estreito (GO), Porto Franco e Grajaú (MA), no noroeste do estado do Maranhão, próximo à fronteira com o estado de Goiás. Na mesma área, em poços e rios, foram coletadas as amostras de água analisadas. A área de trabalho pode ser delimitada aproximadamente pelos paralelos 5^{o} 30' S e 7^{o}S e pelos meridianos 46^{o}W e 48^{o}W Gr (Figuras 1 e 2).

2.2 Clima

As características climáticas da área de Estreito-Porto Franco-Grajaú podem ser deduzidas a partir das observações efetuadas pelas estações meteorológicas de Tocantinópolis e Grajaú , situadas próximas à área. Com base nos dados obtidos pela estação de Tocantinópolis entre 1916 e 1942 e pela estação de Grajaú entre 1931 e 1950, Brasil.C.I.P.G.C (1981) apresenta para a área Estreito-Porto Franco-Grajaú a referência climática constante na tabela 1.

De acordo com esses dados registrados por Brasil C.I.P.G.C. (1981) verifica-se que a temperatura media anual nos dois extremos da área é bastante semelhante (25.8 ^{o}C em Grajáu e 25.4^{o}C em Tocantinópolis). A pluviosidade porém, varia fortemente de Leste para Oeste, passando de uma precipitação média anual de 1322 mm em Grajaú, para 1751 mm em Tocantinópolis. A variação da umidade na direção E-W é a principal responsável pela existência na área de três tipos climáticos de acordo com a classificação de(Thornthwaite 1948 in Brasil C.I.P.G.C, 1981) , indicados na figura 02: nos arredores de Porto Franco o clima é do tipo primeiro úmido (B1wA`a`), na maior parte da rodovia Porto-Franco-Grajaú o clima, mais seco, é do tipo subúmido-úmido (C2wA`a`), enquanto que nas proximidades de Grajaú o clima, já bastante mais seco, é classificado como do tipo subúmido-seco (C1wA`a`).

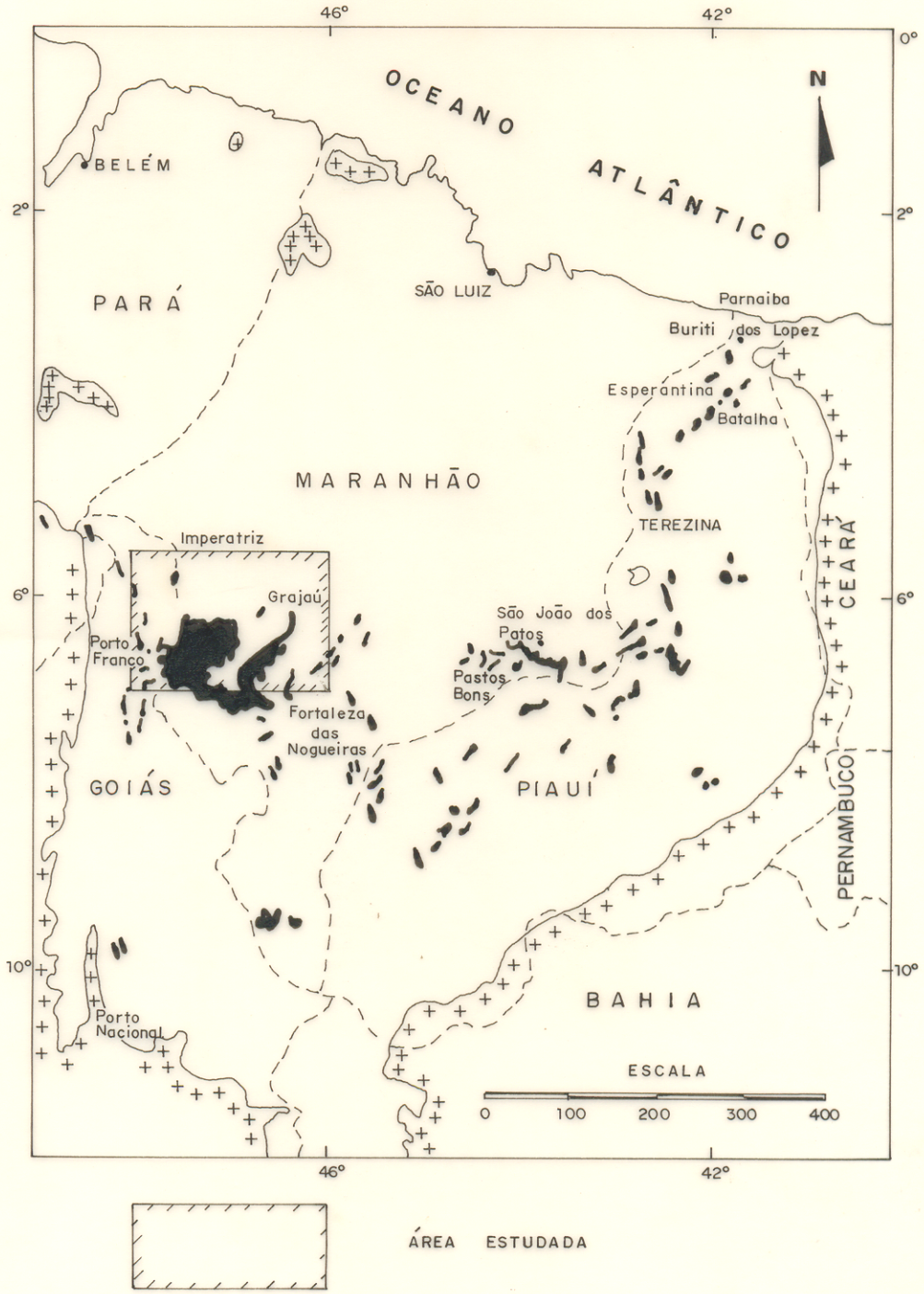


Fig. 01 — Distribuição dos Diques, Derrames e Sills de basalto na bacia do Maranhão. (Sial, 1975) e localização da área estudada.

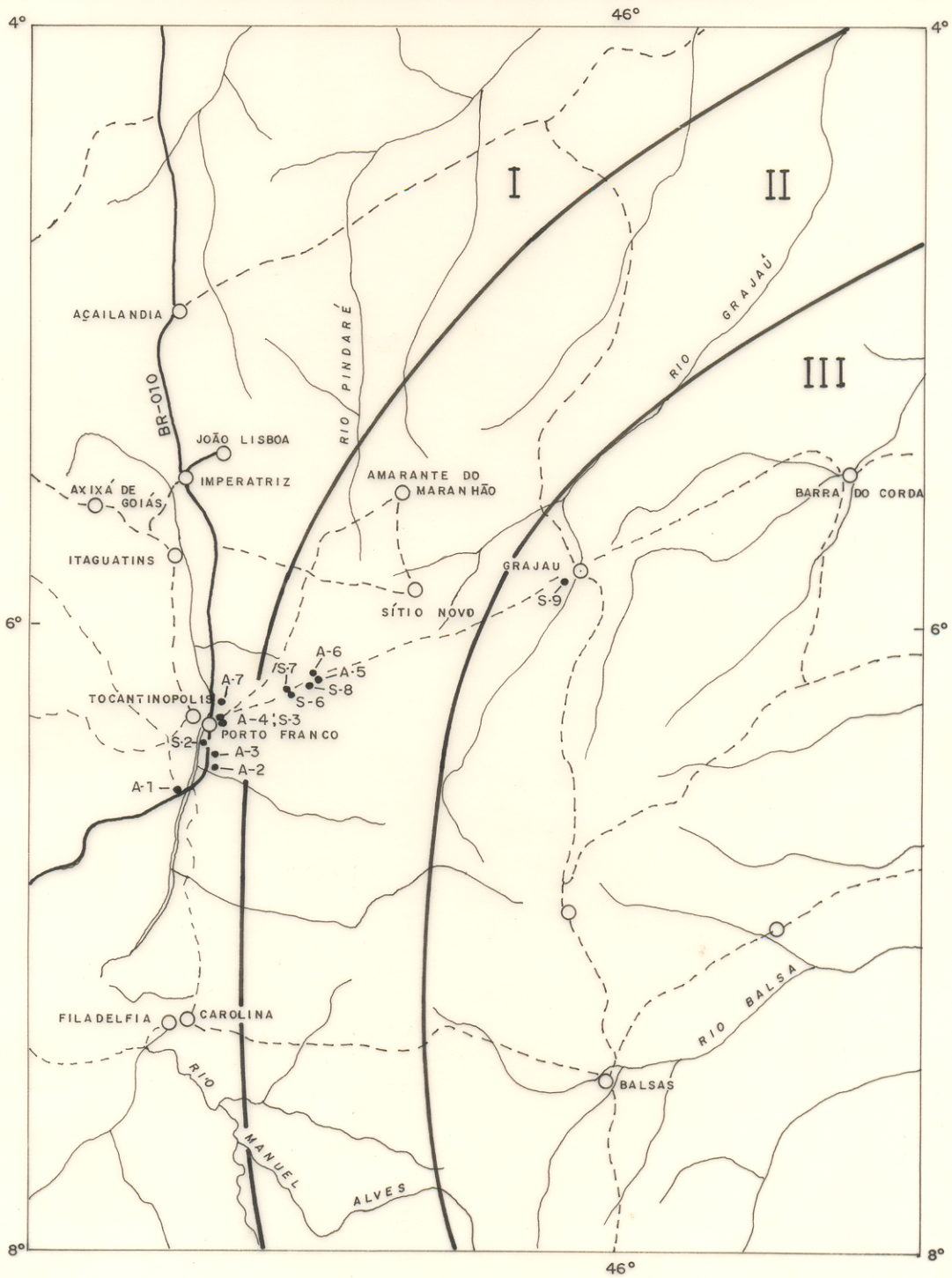


Fig.02 – Tipos climáticos da área estudada e localização dos pontos de amostragem

TABELA 1 - Referência climática dos setores de Porto Franco-Estreito e Grajaú com base em dados meteorológicos dos observatórios de Tocantinópolis entre 1931 e 1950 e de Grajaú entre 1916 e 1942, (Brasil, C.I.P.G.C, 1981).

	GRAJAÚ	TOCANTINÓPOLIS
Latitude S	5° 48'	6° 19'
Longitude W Gr	46° 27'	47° 26'
Altitude (m)	154	131
BALANÇO HÍDRICO		
Temperatura média anual (°C)	25.8	25.4
Precipitação média anual (mm)	1322	1751
Potencial Evapotranspiração (mm)	1516	1441
Precipitação efetiva (mm)	-194	310
Evapotranspiração atual (mm)	1051	1104
EXCESSO		
mm	271	647
meses	Fev./abril	Jan./abril
DEFICIT		
mm	465	337
meses	Maio/Out.	Maio/Out.
ÍNDICES CLIMÁTICOS		
Índice de umidade (Ih)	17.88	44.9
Índice de aridez (Ia)	30.67	20.39
Índice de umidade efetiva (Im)	-5.3	30.87
Eficiência térmica (Et)	1516	1441
Tipologia climática	C1 W A' a'	B1 W A' a'

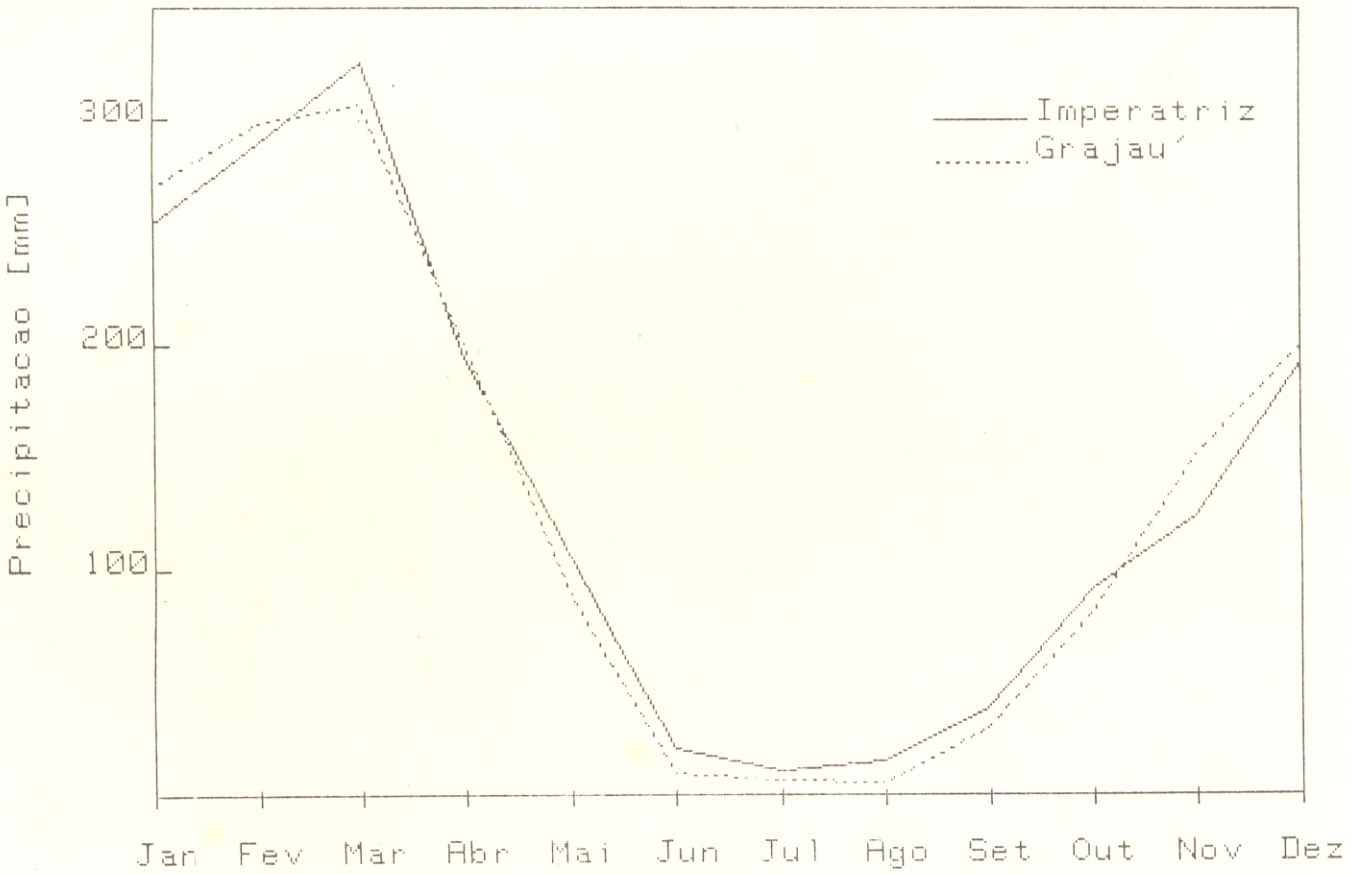


Fig. 03 – Distribuição da precipitação pluviometrica (Em m.m) durante o ano de 1950, nos observatórios meteorológicos de Grajaú e Imperatriz (Brasil, D.N.P.M., 1973)

A distribuição da precipitação pluviométrica durante o ano de 1950 nos observatórios meteorológicos de Grajaú e Imperatriz (fig. 3), apresentada por Brasil D.N.P.M (1973), ilustra a existência de duas estações anuais bem caracterizadas na região. A primeira, chuvosa, que se estende de novembro a abril, na qual a precipitação média mensal ultrapassa 100 mm e a segunda, mais seca, que vai de maio a outubro, na qual a precipitação média mensal é inferior a 100 mm (Fig.03).

2.3 Relevo e Vegetação

A área de Porto Franco apresenta uma superfície pediplanada dissecada em interflúvios tabulares. Na área próxima a Grajaú a superfície é pediplanada de relevo arrasado. Com respeito à vegetação, predomina na área a formação de cerrado, caracterizada por suas árvores tortuosas, de grandes folhas deciduais, e pelas matas de galeria (Brasil D.N.P.M 1973); este é um tipo de vegetação comum em regiões de climas tropicais úmidos, com chuvas torrenciais e períodos secos.

2.4 Relações Geológicas das Rochas Basálticas

De acordo com Sial (1975), os basaltos toleíticos da Bacia do Maranhão estão concentrados em três áreas principais dentro da região limitada pelos paralelos $0^{o}S$ e $10^{o}S$ e pelos meridianos $41^{o}W$ e $49^{o}W$ Gr. A primeira concentração, na qual predominam os derrames, ocorre nos arredores de Porto Franco, Grajaú e Fortaleza dos Nogueiras. A segunda concentração, representada principalmente por diques e soleiras, ocorre nas áreas circunjacentes a São João dos Patos e Pastos Bons; a terceira concentração, na qual predominam igualmente formas intrusivas, ocorre próximo a Vitória do Alto Parnaíba (Fig. 01).

Os basaltos cuja alteração foi estudada neste trabalho pertencem à primeira das citadas concentrações. Eles constituem uma faixa de afloramento de cerca de 50km de largura na bacia do Rio Tocantins e outra faixa, menos proeminente, no vale do Rio Grajaú. A série de derrames atinge nessa região até 175 metros de espessura, nas proximidades de Imperatriz (Mesner e Wooldridge, 1969), adelgaçando-se nas direções leste e sul. Data

ções das rochas basálticas, citadas por Brasil DNPM (1973), indicam idades entre 120m.a. e 180 m.a., caracterizando a idade mesozóica para essas manifestações vulcânicas. De acordo com Brasil DNPM (1973), os basaltos da bacia do Maranhão constituem uma única unidade litoestratigráfica, situada estratigraficamente entre a Formação Sambaíba (Triássico) e a Formação Itapecuru (Cretáceo), e denominadas de Formação Orozinho. De acordo com Aguiar (1969), porém, os basaltos da bacia do Maranhão estariam separadas em duas unidades distintas: a Formação Mosquito, do Triássico Inferior e a Formação Sardinha, do Cretáceo Inferior. Entre essas duas unidades ocorreriam ainda a Formação Pastos Bons e a Formação Corda. Os basaltos da área estudada (Poro Franco-Estreito-Grajaú) pertenceriam, segundo Aguiar (1969), à Formação Mosqueiro, tendo portanto, idade Triássica Inferior.

As características petrográficas dos basaltos da Bacia do Maranhão foram extensivamente estudadas por Sial (1975). De acordo com aquele autor, os basaltos são formados principal - mente por augita, pigeonita, plagioclásio, minerais opacos e zeolitas. A composição modal de alguns basaltos da região de Porto Franco indica que a augita varia entre 11 e 45%, a pigeonita entre 4 e 28%, o plagioclásio entre 37 e 70% e o minerais opacos entre 2 e 11%.

3 METODOLOGIA

3.1 Técnicas de Campo

O trabalho de campo constou da seleção e descrição dos perfis de alteração dos basaltos e da coleta de amostras representativas desses perfis, além da amostragem de águas de superfície e e subsuperfície na área de ocorrência dos basaltos.

3.1.1 Seleção, Descrição e Amostragem dos Perfis

A seleção dos perfis de alteração estudados foi baseada em dois critérios principais:

a) A representatividade dos perfis:

b) A facilidade de acesso aos mesmos

A representatividade, neste caso, diz respeito ao estágio de alteração registrado em cada perfil; dado que o objetivo do trabalho é acompanhar a evolução do intemperismo dos basaltos, era necessário que cada perfil amostrado registrasse uma parte importante dessa evolução, de modo a se poder deduzir , após a integração de todos os dados obtidos, a história completa do processo de alteração. Assim sendo, foram selecionados para amostragem seis perfis, abrangendo desde aqueles pouco desenvolvidos, que caracterizam a alteração incipiente do basalto, até perfis espessos e bem desenvolvidos, caracterizando estágios mais avançados da evolução do processo de alteração.

Procurou-se ainda, selecionar perfis desenvolvidos nas áreas abrangidas pelos três tipos climáticos que ocorrem na área, a fim de se estudar a influência do clima sobre o processo de alteração. A maioria dos perfis amostrados corresponde a afloramentos em cortes de estrada, o que facilitou grandemente o acesso aos mesmos.

Os perfis selecionados para estudo foram descritos no campo com respeito a suas características macroscópicas e posteriormente amostrados. A amostragem foi feita em canais verticais escavados nas paredes dos perfis, que se estendiam de seu topo até sua base. As amostras foram coletadas nesses canais, abrangendo intervalos regulares, cuja extensão foi condicionada à

espessura total do perfil. Assim sendo, utilizaram-se intervalos de amostragem de 20 cm, 50 cm e um metro, dependendo do perfil em estudo.

3.1.2 Amostragem de Águas

Visando obter subsídios para o estudo da modilidade dos elementos durante o intemperismo, foi realizado um trabalho de amostragem e análise de águas superficiais e subterrâneas que se encontravam em contato com os basaltos e seus produtos de alteração ocorrentes na área. As coletas de águas superficiais (rios) e subterrâneas (poços) foram acompanhadas no campo de medições de parâmetros físicos e físico-químicos relacionados (profundidade dos poços, espessura de lâmina d'água, temperatura, condutividade e pH). Foram selecionadas sete pontos de amostragem, sendo quatro de poços e três de rios, os quais estão indicados na figura 02. Os poços amostrados são localizados em fazendas e são utilizados para uso doméstico. A operação de amostragem de água nos sete pontos indicados foi feita, sempre de acordo com a mesma metodologia, quatro vezes, cada uma delas correspondente a uma época diferente do ano. As datas de amostragem foram: 02.08.82, 18.11.82, 01.03.83 e 02.06.83. O objetivo dessas repetições foi o de estudar a variação sazonal nas características físico-químicas da água e na mobilidade dos elementos químicos.

As amostras de água foram coletadas em frascos de polietileno de capacidade igual a um (01) litro. Em cada ponto foram coletadas três amostras visando os diferentes tipos de análise a serem efetuadas: água "in natura", água acidificada com 1 ml de HNO_3 concentrado e água acidificado com 1 ml de HCl concentrado, para determinação de Fe^{++}.

3.2 Técnicas de Laboratório

Os trabalhos de laboratório realizados consistiram na preparação de amostras, determinações mineralógicas, análises químicas para elementos principais e traços das amostras de solo e análises química e físico-química das amostras de água. As diferentes etapas do trabalho realizado, incluindo as etapas de

campo, são esquematizadas no fluxograma da figura 04. Todo o trabalho analítico foi realizado nos laboratórios do Centro de Geociências da UFPa.

3.2.1 Análises Química e Físico-Química das Amostras de Água

As amostras coletadas em quatro diferentes épocas do ano foram analisadas no máximo até 24 horas após cada coleta, tendo-se sempre o cuidado de mantê-las a uma temperatura relativamente baixa durante esse período ($<25^{o}C$).

3.2.1.1 Condutividade e pH das Águas

Para a determinação da condutividade, usou-se o condutivímetro modelo MC-GA, marca TOA NS A 7465/M, usando HCl como solução de calibração, com resultados expressos em micromho/cm. Para a medição do pH usou-se o pHmetro modelo HM-7B, marca TOA, calibrado com soluções tampões de pH = 7 e pH = 4.

3.2.1.2 Análises Química das Águas

As espécies dissolvidas foram analisadas segundo os métodos recomendados em Standard Methods (1975), tendo sido determinado cada um dos elementos seguintes, de acordo com os métodos e técnicas abaixo especificadas:

ELEMENTO	MÉTODO ANALÍTICO	TÉCNICA ESPECÍFICA
Fe^{++} e Fe^{+++}	Colorimetria	Fenantrolina
Si^{4+}	Colorimetria	Molibdosilicato
Ca^{++} Mg^{++}	Complexometria	EDTA
Na^{+} K^{+}	Espectrometria	Absorção Atômica
Cl^{-}	Volumetria	$Hg(No_3)_2$
Al^{3+}, Bi^{++}, Co^{++}, Ba^{++}, Cd^{++}, Cr^{++}, Mn^{++}, Cu^{++}, Ni^{++}, Sr^{++}, V^{5+}	Espectrometria	Forno de grafite

O sulfato não foi detectado pelo método turbidimétrico que tem um limite de deteção igual a 2 ppm.

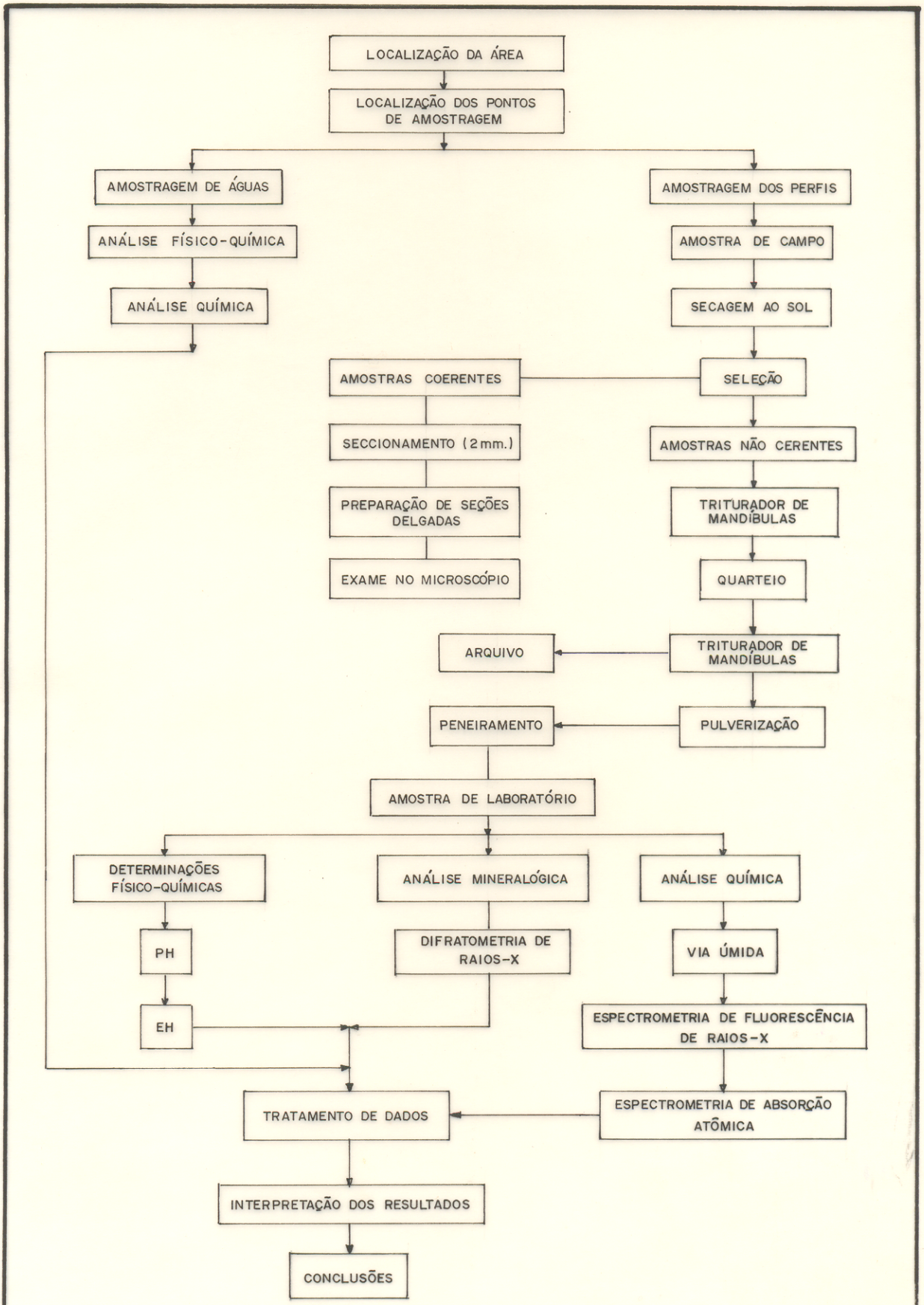


Fig. 04 — Fluxograma dos processamentos analíticos realizados

3.2.2 Preparação e Análise das Amostras de Solos e Rochas

3.2.2.1 Preparação das Amostras

As amostras de solos e rochas coletadas foram inicialmente secas em estufas, a temperatura inferior a 50°C. Empregou-se baixa temperatura no processo de secagem visando evitar a destruição da estrutura de argilo-minerais sensíveis a temperatura maior, eventualmente existentes nas amostras. Após a secagem separaram-se partes das amostras coerentes (rochas frescas e material pouco alterado) para preparação das seções delgadas a serem estudadas por microscopia ótica.

Todas as amostras foram posteriormente fragmentadas em trituradora de mandíbulas, com abertura de saída de aproximadamente 2mm. A homogeneidade do produto permitiu fazer-se um quarteio, usando-se um quarteador de campanas do tipo Jones; parte do produto foi guardado no arquivo e o restante foi novamente passado pelo triturador, fechando-se a abertura de saída a uma distância menor que 1mm; o produto obtido foi quarteado uma vez, para facilitar a sua posterior pulverização. Desta pulverização obteve-se um produto com granulometria menor que 80 mesh, produto este que foi posteriormente submetido as determinações físico-químicas e mineralógicas descritas abaixo.

3.2.2.2 Determinações Físico-Químicas

Para as medições de pH e Eh, misturou-se cada uma das amostras com água deionizada na proporção 2:3 (Guimarães et al., 1970), agitando-se vagarosamente.

Depois de deixar a mistura em repouso por duas horas foram feitas as medições de pH e Eh no pH-metro, modelo HM-7B, marca TOA. Para a determinação do pH, o aparelho foi calibrado com auxílio de soluções tampões de pH = 7 e pH - 4. Para as medições de Eh calibrou-se com a solução de referência Fe(II)-Fe(III), segundo o método referido em Standard Methods (1975).

3.2.2.3 Análise Mineralógica

A composição mineralógica das amostras foi determi

nada através de microscopia ótica e difração de raios-X.

As determinações mineralógicas através de raios- X foram feitas utilizando-se amostras pulverizadas e pressionadas levemente sobre uma lamina metálica. A determinação específica dos argilo-minerais foi efetuada após a separação, em suspensão aquosa, da fração menor que dois micra e preparação de lâminas com espessura entre 10 e 20 mg/cm (Brindley, 1981). Procedeu- se a identificação combinando-se as propriedades específicas de expansão das distâncias interplanares basais pela adição de etilenoglicol e posterior transformação térmica.

O instrumento utilizado foi difratômetro de raios-X da marca PHILIPS, tipo PW 1050/50, operado com os seguintes componentes: tubo de raios-X com ânodo de cobre, monocromador de grafite, detector proporcional ligado à unidade de controle PW 1390 e controle automático do goniômetro pela unidade PW 1394.

3.2.2.4 Análises Químicas

Em todas as amostras sólidas foram feitas determinações quantitativas para SiO_2, Al_2O_3, TiO_2, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, MnO_2, P_2O_5, perda ao fogo, Cu, Ni, Zn, Co, Cr, V, Ba, Sr, Rb, Y, Nb e Zr. Os métodos analíticos e equipamentos empregados foram os seguintes:

MÉTODO ANALÍTICO	EQUIPAMENTOS
Fluorescência de raios-X	Espectrômetro de raios-X, PHILIPS PW 1410/70
Absorção Atômica	Espectrômetro de absorção atômica KARL ZEISS, Mod. FMD4
	Espectrômetro de absorção atômica marca PERKIN ELMER, Mod. 400.
	Forno de grafite, marca PERKIN ELMER, Mod. H6 A 74.
Colorimétrico	Espectrômetro JR.III, marca COLEMAN, Mod. 6/8.
	Espectrômetro PM6, marca ZEISS.

Foram determinados por fluorescência de raios-X : SiO_2, Fe_2O_3, (ferro total), Al_2O_3, TiO_2, CaO, K_2O, MnO_2 e P_2O_5

em todas as amostras, exceto naquelas que apresentam dificuldades na preparação da pastilha por fusão com mistura fundente ($LiBO_2$-$Li_2B_4O_7$ em proporção 1:1) e amostras na relação 6:1.

Para a determinação química de MgO e Na_2O foi empregado o método de absorção atômica. O método de abertura ácida ($HClO_4$:HF na proporção 1:10) resultou ser o mais adequado. As soluções resultantes dessa abertura foram também aproveitadas para a leitura dos óxidos: Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO, K_2O e MnO_2 nas amostras provenientes do perfil S-3, as quais apresentaram problemas na preparação das pastilhas para a análise por fluorescência de raios-X. Os óxidos de titânio e fósforo do perfil S-3 foram determinados pelo método colorimétrico. A determinação de FeO para todas as amostras foi feita pelo método permanganométrico.

A determinação dos elementos traços Co, Ni, Zn, Cu, Cr, V e Ba foi feita pelo método de absorção atômica com abertura ácida, numa relação 1:3 de $HClO_4$:HF. As leituras para V e Ba foram feitas no forno de grafite.

Sr, Rb, Y, Zr e Nb foram determinados por fluorescência de raios-X. Para a confecção das pastilhas prensadas nessas determinações empregou-se o H_3BO_3 como material de compactação.

4 CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS DOS PERFIS

São apresentadas neste capítulo as características macroscópicas gerais dos seis perfis estudados. Uma síntese dessas características é apresentada na figura 05, a qual indica também a posição das amostras coletadas nos vários perfis. A profundidade de amostragem, em cada caso, é indicada na tabela 02.

4.1 Perfil S-2

O perfil S-2 está localizado na pedreira existente à margem leste da rodovia BR-226, a 5km ao sul de Porto Franco. A àrea está incluída na faixa de clima primeiro úmido, de acordo com Brasil C.I.P.G.C (1981).

O perfil caracteriza a alteração mais incipiente do basalto (Fig. 06); ele inicia-se na base, com basalto fresco de cor cinza escura e textura porfirítica, apresentando fenocristais de labradorita em matriz microcristalina constituída de augita, labradorita, pigeonita e opacos. A labradorita dos fenocristais tem composição An(52), de acordo com determinações feitas segundo o método de Michel-Levy. A composição modal do basalto é a seguinte: labradorita 60%, piroxênio (pigeonita e augita) 25%, opacos (magnetita) e outros 15%.

Sobre o basalto fresco desenvolve-se o horizonte C do perfil; com espessura de 40cm, composto de fragmentos de rocha mãe dispersos em matriz argilosa.

Os fragmentos são abundantes na base do horizonte onde atingem suas maiores dimensões (até 15cm de diâmetro) ; em direção ao topo do perfil eles tornam-se rapidamente menores e menos abundantes, de modo que no topo do horizonte suas dimensões oscilam em torno de 5cm de diâmetro. Da base para o topo do horizonte, sua coloração vai se tornando avermelhada, passando na porção mais superior para marron escura. Em toda extensão desse horizonte a quantidade de fragmentos é maior que a do material argiloso no qual eles estão envolvidos.

O horizonte C passa na sua parte superior para o horizonte A do perfil, de cor marron escura e rico em matéria orgânica. Esse horizonte tem espessura de 20cm. Não há, portanto ,

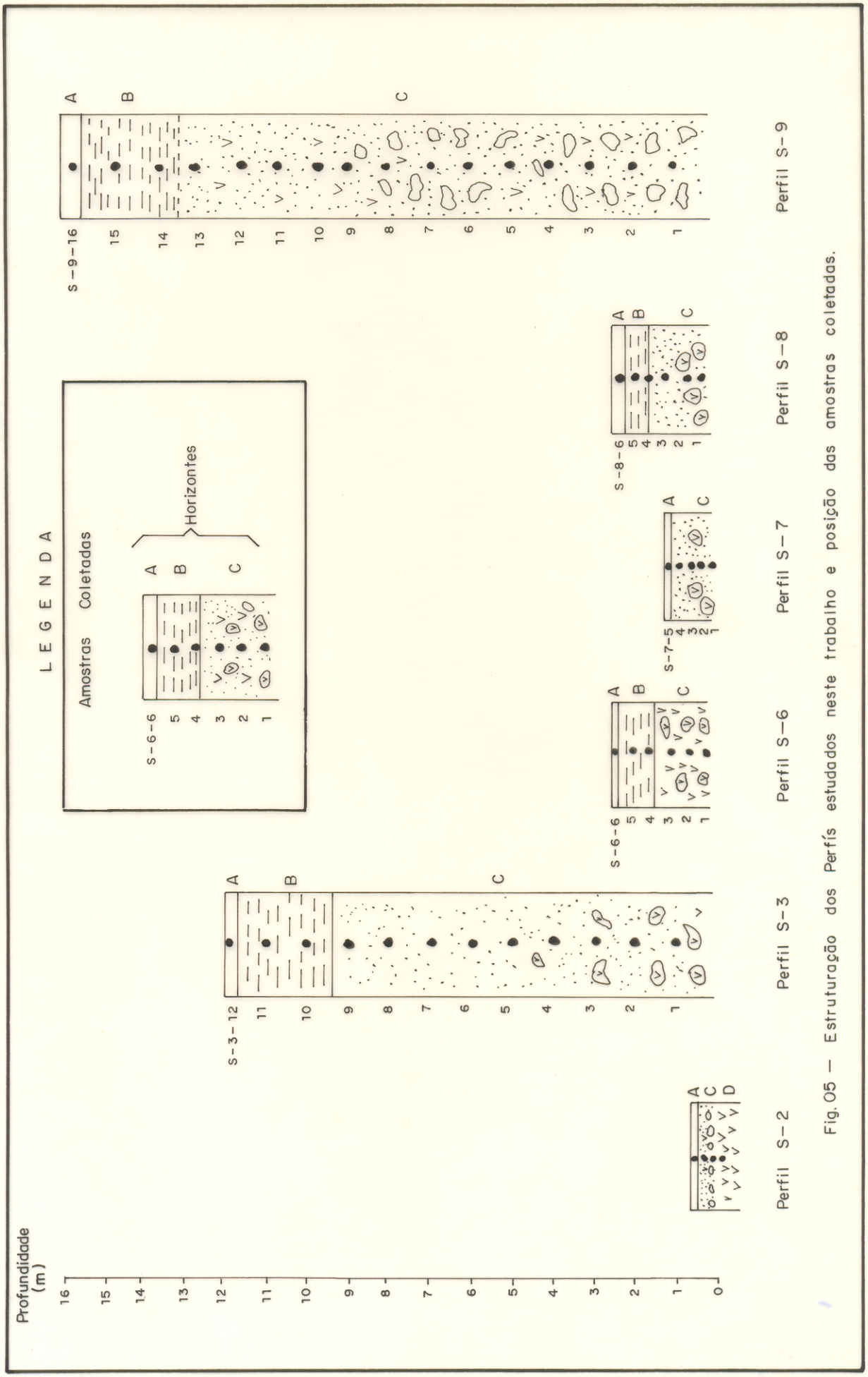


Fig. 05 — Estruturação dos Perfís estudados neste trabalho e posição das amostras coletadas.

TABELA 02: Minerais presentes nas amostras estudadas

Amostra	profundidade [m]	A	PI	P	G	I	H	M	S	K	HE
S-2-4	0.0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
S-2-3	.2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
S-2-2	.4	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0
S-2-1	.6	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0
S-3-12	0.0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
S-3-11	1.0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
S-3-10	2.0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
S-3-9	3.0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0
S-3-8	4.0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
S-3-7	5.0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
S-3-6	6.0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
S-3-5	7.0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0
S-3-4	8.0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
S-3-3	9.0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
S-3-2	10.0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0
S-3-1	11.0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0
S-6-6	0.0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
S-6-5	.5	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0
S-6-4	1.0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0
S-6-3	1.5	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0
S-6-2	2.0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
S-6-1	2.5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
S-7-5	0.0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
S-7-4	.3	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
S-7-3	.6	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
S-7-2	.9	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
S-7-1	1.2	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0
S-8-6	0.0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0
S-8-5	.5	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0
S-8-4	1.0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0
S-8-3	1.5	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0
S-8-2	2.0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0
S-8-1	2.5	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0
S-9-16	0.0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1
S-9-15	1.0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1
S-9-14	2.0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
S-9-13	3.0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1
S-9-12	4.0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1
S-9-11	5.0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
S-9-10	6.0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
S-9-9	7.0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
S-9-8	8.0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
S-9-7	9.0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
S-9-6	10.0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
S-9-5	11.0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
S-9-4	12.0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
S-9-3	13.0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
S-9-2	14.0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
S-9-1	15.0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1

A = Augita; PI = Pigeonita; P = Plagioclassio; G = Goethita; I = Ilita;
H = Haloisita; M = Magnetita; S = Smectita; K= Caolinita; HE = Hematita

1 = Mineral presente; 0 = Mineral ausente

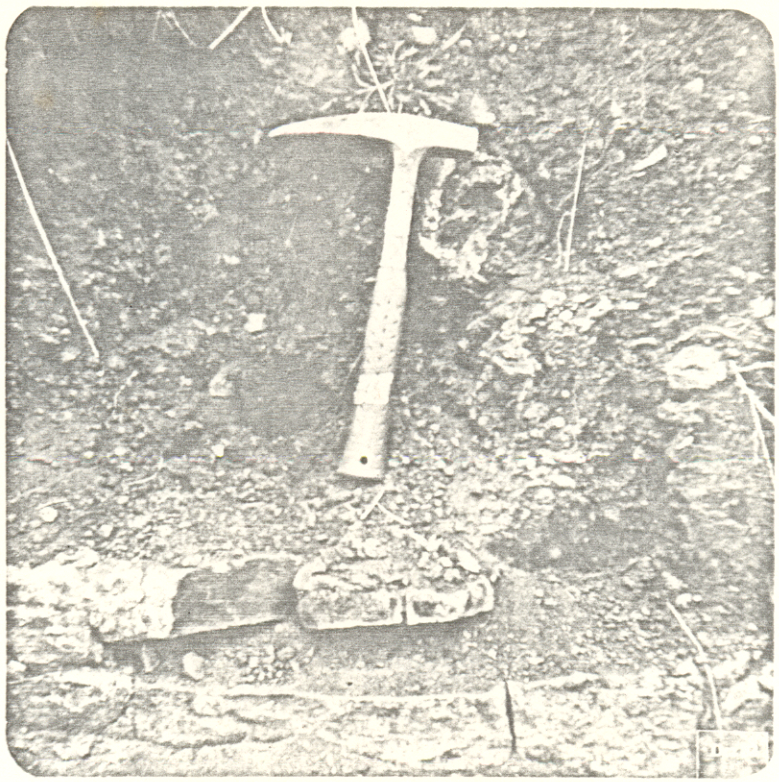


Fig. 06 — Perfil de solo desenvolvido sobre Rocha Basáltica, nos estágios iniciais do Intemperismo (Perfil S-2), na pedreira ao sul de Porto Franco.



Fig. 07 — Perfil de alteração em estágio intermediário (Não aparece material fresco, Perfil S-8), na estrada Porto Franco - Grajaú.

no perfil S-2, o desenvolvimento do horizonte B. Um fato adicional a registrar neste perfil é a falta de homogeneidade dos produtos de alteração formados a partir do basalto. Na verdade, imediatamente sobre a rocha fresca já se observam quantidades apreciáveis de material argiloso. Assim sendo, as características do basalto são preservadas no horizonte C essencialmente pelos fragmentos de rocha dispersos na matriz argilosa.

É evidente que a alteração foi grandemente facilitada pelo fraturamento do basalto, que propiciou o avanço maior do processo de alteração em alguns pontos, enquanto que em partes próximos o basalto era preservado.

As amostras foram coletadas neste perfil a intervalos de 20cm.

4.2 Perfil S-3

O perfil S-3 corresponde a um poço para água potável localizado no quintal da casa nº 745 da rua principal de Porto Franco, de propriedade do Sr. Carlos de Souza Ramos. De acordo com Brasil C.I.P.G.C. (1981), o clima da área onde se localiza o poço é também do tipo primeiro úmido.

O poço amostrado do perfil S-3 tem 12 metros de espessura. Ele é bem mais desenvolvido que o perfil S-2 e nele o basalto fresco não se encontra aflorante.

O material que ocorre na base do perfil, apesar de pouco compacto, ainda preserva as características texturais do basalto que lhe deu origem. O piroxênio ainda se encontra em grande parte preservado, mais o plagioclásio já se apresenta totalmente caolinizado, o que imprime a massa resultante uma coloração geral verde-clara. À medida que se avança em direção ao topo do perfil, o material se torna cada vez mais inconsistente, passando a se constituir em uma massa argilosa na qual ainda persistem pontos esverdeados de piroxênio. A coloração verde-clara vai ganhando tons amarelados e daí avermelhados, à medida que os hidróxidos de ferro vão se tornando mais abundantes. Essa gradação persiste por cerca de 9 metros em direção ao topo do perfil, até que o material se torna totalmente argiloso e adquire coloração marron. Neste ponto atinge-se o topo do horizonte C.

O horizonte B, que ocorre imediatamente acima, é pouco desenvolvido e apresenta espessura de cerca de dois metros. Ele é composto por uma massa argilosa inconsolidada, de cor vermelha escura, rica em hidróxidos de ferro. Não há mais qualquer relicto da rocha mãe. No topo do perfil ocorre um horizonte A, com cerca de 30m de espessura e rico em materia orgânica.

A amostragem do perfil S-3 foi feita a intervalos de 1 metro.

4.3 Perfil S-6

O perfil S-6 é um corte de estrada na margem sul da rodovia Porto Franco-Grajaú, a 33 km de Porto Franco. Na área onde se localiza o perfil o clima é do tipo subúmido-úmido, de acordo com Brasil.C.I.P.G.C. (1981).

O perfil tem espessura aflorante de 2,5 metros e apresenta os horizontes C, B e A muito bem definidos. O basalto fresco não está aflorante e o perfil inicia-se, na sua base, com basalto parcialmente decomposto, de coloração cinza esverdeada.

Na base do perfil as características texturais do basalto ainda estão muito bem preservadas, sendo possível identificar ainda cristais de piroxênio e plagioclásio não alterados, em meio a massa principal cinza esverdeada já parcialmente decomposta. Manchas centimétricas vermelhas a marrons são igualmente observáveis em meio a essa massa, aumentando em freqüência até a cerca de 1,5 metros da base do perfil.

A proporção de material argiloso aumenta até esse ponto, mantendo, no entanto, a coloração de tom cinza-esverdeado, que apenas se torna gradativamente mais clara que na base do perfil.

A 1,5 metros acima da base do perfil a coloração começa a mudar de verde cinza para verde amarela e daí para amarela. Consumada a mudança de cor, o material torna-se totalmente friável e altamente argiloso, perdendo-se integralmente as características texturais da rocha-mãe. As manchas vermelhas a marrons de hidróxidos de ferro tornam-se gradativamente menores e mais raras, a medida que a massa, no seu todo, adquire tons mais

avermelhados. O horizonte B tem espessura de 80cm, sobre ele desenvolve-se uma camada rica em humus, de cor cinza a preta, com 20cm de espessura, que caracteriza o horizonte A do perfil.

A amostragem deste perfil foi feita a intervalos de 50cm.

4.4 Perfil S-7

O perfil S-7 é um corte de estrada na rodovia Porto Franco-Grajaú, a 33km de Porto Franco, na margem norte da estrada. Situa-se, portanto, no mesmo ponto que o perfil S-6 , mas do lado oposto da estrada. O clima da área é do tipo subúmido-úmido, segundo Brasil C.I.P.G.C. (1981).

O perfil S-7 tem espessura aflorante de 1,2 metros. A rocha fresca não está aflorante e o perfil constitui- se essencialmente do horizonte C, com espessura de aproximadamente 1,1 metros, recoberto por 10cm de horizonte A. Na base do perfil o basalto, de cor verde, ainda apresenta-se moderadamente consistente, matendo sua textura totalmente preservada.

Apenas em alguns pontos distingue-se a presença de massas argilosas, igualmente esverdeada, em meio ao material menos alterado. A medida que se ascende no perfil o material torna se mais argiloso, perde gradativamente a consistência e muda sua cor para verde cinza e daí para amarelo esverdeado. O topo do perfil é formado por material argiloso em mistura com abundante matéria orgânica, o que dá ao conjunto a coloração negra, caracterizando o horizonte A do perfil.

A amostragem neste perfil foi feita a intervalos de 30cm.

4.5 Perfil S-8

O perfil S-8 corresponde a um corte de estrada na margem sul da rodovia Porto Franco-Grajaú, a 41km de Porto Franco. O clima da área é do tipo subúmido-úmido, segundo Brasil. C.I.P.G.C (1981).

O perfil S-8 (Fig. 07) tem espessura aflorante de 2,5 metros e foi amostrado a intervalos de 0,5 metros. A rocha

fresca não se encontra aflorante e o perfil apresenta apenas o horizonte C, com espessura de 1 metro, o horizonte B, com espessura de 1,2 metros e o horizonte A (30 cm).

A porção aflorante do horizonte C é apresentada por material pouco consistente, o qual, no entanto, guarda as principais características texturais do basalto fresco. A cor é verde clara gradando para verde amarelada e daí a amarelo, a medida que se avança em direção do topo do horizonte. Fragmentos centimétricos de rocha fresca são encontrados na base do afloramento, mas na porção mais superior do horizonte C o material já é quase que totalmente argiloso.

Acima do horizonte C desenvolve-se um horizonte B essencialmente argiloso, vermelho escuro a marron pela alta concentração de óxidos de ferro. As características texturais da rocha-mãe já foram totalmente perdidas neste horizonte. Finalmente, sobre o horizonte B ocorre um horizonte A de 30cm de espessura , rico em matéria orgânica em mistura com argila e de coloração negra.

4.6 Perfil S-9

O perfil S-9 é um corte de estrada na margem sul da rodovia Porto Franco-Grajaú, bem na entrada da cidade de Grajaú, a 50 metros a oeste da ponte de acesso a cidade. O clima da área é marcadamente mais seco que a das áreas situadas a oeste, sendo classificado em Brasil.C.I.P.G.C (1981) como do tipo subúmido-seco.

Este é o mais espesso de todos os perfis estudados. Ele possui espessura total aflorante de 16 metros e sua amostragem foi feita a intervalos regulares de 1 metro.

O basalto fresco não se encontra aflorante no perfil, embora o grau de alteração de rocha na parte basal do perfil seja muito incipiente. O material apresenta, assim, três horizontes. O horizonte C, com 13,5 metros de espessura aflorante, o horizonte B, com 2 metros de espessura e o horizonte A, com 50 cm de espessura.

O horizonte C inicia-se com basalto vesicular pouco alterado, ainda parcialmente compacto, de cor marrom escuro .

A medida que se ascende no perfil os plagioclásios tornam-se mais intensamente caolinizados e o piroxênio começa a decompor-se em uma massa argilosa esverdeada, de modo que, já a cerca de 4 metros da base do perfil, a cor da rocha alterada grada de marrom para esverdeada. Com o aumento da intensidade de alteração essa coloração atinge, já mais perto do topo do horizonte, tons mais claros, chegando a amarelo esbranquiçado. Neste ponto a rocha alterada ainda tem alguma consistência e guarda ainda semelhanças claras com a rocha fresca. A partir de 12 metros acima da base do perfil, o material perde rápida, mas gradativamente, sua consistência, torna-se quase que totalmente argiloso e adquire tonalidades amarronzadas em virtude da concentração de óxido de ferro.

A cerca de 14 metros acima da base do perfil inicia-se o horizonte B, bastante homogêneo, essencialmente, argiloso, rico em óxidos de ferro, que lhe conferem a típica cor marron.

No topo do horizonte B, a argila marron mistura-se com a matéria orgânica da superfície, adquire a cor preta e passa assim a caracterizar o horizonte A do perfil.

4.7 Conclusõẽs Preliminares sobre a Evolução dos Perfis de Alteração

A descrição dos perfis de alteração dos basaltos evidencia algumas características comuns aos vários perfis. Uma dessas características é a grande espessura do horizonte C, quando comparado com os outros horizontes do perfil. Embora em apenas um perfil (perfil S-2) tenha sido possível encontrar a rocha mãe fresca aflorante e, com isso, determinar-se precisamente a espessura do horizonte C, em todos os perfis descritos constatou se que a espessura do horizonte C é sempre superior a do horizonte C.

Nos perfis S-3 e S-9 o horizonte C tem espessura respectivamente 5 e 7 vezes maiores que o horizonte B. E esses valores devem ser considerados como mínimos, pois a espessura total do horizonte C nesses perfis não é conhecida.

O segundo aspecto importante a considerar é a ausência do horizonte B nos perfis menos desenvolvidos. Nos per-

fis S-2 e S-7, onde a rocha-mãe fresca está aflorante ou quase aflorante, e os perfis de alteração são ainda incipientes e delgados, o horizonte C passa diretamente ao horizonte A.

Essas duas observações (espessura acentuada do horizonte C em todos os perfis e a ausência do horizonte B em perfis de alteração incipiente) sugerem que a evolução do processo de alteração segue um padrão bem definido. Iniciando-se pela exposição da rocha à superfície, tem-se como primeira etapa desse processo, a desagregação da rocha e a sua alteração incipiente, formando o horizonte C. O desenvolvimento de um nível superficial rico em matéria orgânica sobre esse material desagregado leva a caracterização de um horizonte A. A medida que a alteração se aprofunda, amplia-se a espessura do horizonte C.

O horizonte B aparece, finalmente, como um resultado do processo de lixiviação, migração e reprecipitação dos elementos no perfil, apenas quando o horizonte C já atingiu espessura bastante expressiva.

5 MINERALOGIA DOS PERFIS

5.1 Minerais Ocorrentes nos Perfis

Cerca de uma dezena de diferentes espécies minerais foi identificada durante o estudo das amostras coletadas nos seis perfis descritos no capítulo anterior. A identificação foi possível principalmente através do emprego da microscopia ótica e da difração de raios-X. Os minerais augita, pigeonita, plagioclásio e magnetita, todos presentes no basalto fresco, foram identificados por microscopia ótica. Os minerais restantes, que ocorrem dentro dos produtos de alteração dos basaltos, foram identificados essencialmente por difratometria de raios-X. A goethita apresentou seus picos principais a 4.18A^{o}, 2.69A^{o}, 2.45A^{o} e 4.98A^{o}, a hematita pelos picos 2.69A^{o}, 1.69A^{o}, 2.51A^{o} e 3.66A^{o}. A identificação da smectita, caulinita, halloysita e da ilita foi feita utilizando-se os procedimentos específicos para argilo-minerais descritos por Brindley, (1981). A caolinita não ofereceu maiores problemas para sua identificação (picos 7.12A^{o} e 3.58A^{o}), e o mesmo acontecendo com ailita (pico 10A^{o}, 5A^{o} e 3.3A^{o}). A smectita foi bem caracterizada após o tratamento das amostras orientadas com etileno-glicol, que resultou em um deslocamento do pico de 15A para cercade 18A. A identificação da halloysita foi mais complicada e ainda não é totalmente segura. A ocorrência, nos difratogramas de raios-X, de uma banda longa e assimétrica, diminuindo de intensidade de 4.45A a 4.3A, mais intensa que os picos (001) e (002) de caolinita é indicativa da presença de halloysita nas amostras (Brindley, 1972). Esta banda não desaparece quando se trabalha com amostras orientadas (deflexões 00L), o que reforça a ideia da presença de halloysita nas amostras. A identificação precisa da halloysita só é possível, no entanto, com o auxílio do microscópio eletrônico. Assim sendo, desde que não foi possível estudar as amostras com o microscópio eletrônico, a identificação da halloysita neste trabalho é apenas tentativa e não pode ser considerada definitiva. Existe porém, uma grande probabilidade de que as deflexões 4.43A^{o} e 4.3A^{o} caracterizem realmente a presença de halloysita nas amostras.

Os minerais identificados em cada amostra são identificados na tabela 02.

5.2 Distribuição dos Minerais nos Perfis

A distribuição dos minerais nos perfis estudados em função da profundidade é indicada na tabela 02, a mesma que permite identificar vários minerais primários: a augita, a pigeonita e o plagioclásio (labradorita) e a magnetita. Todos os quatro ocorrem no basalto fresco e se decompõem à medida que o basalto se altera. A resistência ao processo de alteração é diferente para os quatro minerais, como demonstrado pela ordem com que desaparecem em cada perfil. Assim, a magnetita é o menos resistente entre os quatro minerais, desaparecendo já nos primeiros estágios do intemperismo. O plagioclásio (labradorita) é o segundo mineral a se decompor por ação do intemperismo. Segue-se a pigeonita e posteriormente, a augita. Os minerais primários estão restritos aos horizontes C e D do perfil, e eventualmente também no horizonte A, caso não ocorra horizonte B no perfil. Em qualquer caso, porém, não se observa a presença de minerais primários em amostras coletadas no horizonte B dos perfis estudados.

Entre os minerais secundários, a smectita é o primeiro a aparecer durante o processo de alteração. Já nos estágios mais incipientes do intemperismo, a smectita começa a ocorrer nas amostras, permanecendo presente via de regra em grande parte do horizonte C do perfil. Curiosamente, porém, o desaparecimento da smectita com o avanço do intemperismo ocorre, algumas vezes, antes do desaparecimento da augita, como observado no perfil S-3.

A goethita e a halloysita apresentam padrões de distribuição semelhantes em todos os perfis. Eles aparecem no início do processo de alteração, logo após o aparecimento da smectita e são preservados até o topo do perfil, embora a intensidade dos picos de halloysita nos difratogramas de raios-X diminuam substancialmente à media que se ascende no perfil. Este fato não acontece com a goethita, que se enriquece em direção ao topo do perfil.

A caolinita aparece no perfil sempre posteriormente a smectita e simultaneamente ou imediatamente após o aparecimento da halloysita. A caolinita é muito estável em relação ao intemperismo preservando-se, a partir de seu aparecimento, sempre até o topo dos perfis. Observando-se os difratogramas de

raios-X nota-se que à medida que se ascende no perfil aumenta a intensidade da deflexão principal de caolinita (d=7.12A^{o}) ao mesmo tempo em que diminui a intensidade de deflexão principal da halloysita (d=4.43A^{o}). Isto parece indicar que a caolinita é formada, pelo menos em parte, às expensas da halloysita.

A ilita foi detectada em pequenas quantidades em algumas das amostras estudadas. Ela se concentra nas porções intermediárias dos perfis e próximo ao topo dos mesmos.

A hematita foi detectada em um perfil, (S-9), onde porém ocorre em todas as amostras, desde a base até o topo do perfil.

5.3 Discussão sobre a Distribuição dos Minerais em Perfis

5.3.1 Resistência dos Minerais Primários ao Intemperismo

Considerando-se que a intensidade do intemperismo aumenta de baixo para cima no perfil, a resistência relativa dos minerais primários ao processo de alteração pode ser medida pelo grau de persistência dos minerais à medida que se ascende no perfil. Assim sendo, pode-se estabelecer para os minerais primários do basalto a seguinte ordem decrescente de resistência: augita > pigeonita >labradorita >magnetita. Quanto aos minerais secundários a ordem decrescente de resistência nos cados estudados é: hematita > caolinita >goethita > ilita > halloysita > smectita.

5.3.2 Seqüência das Alterações Minerais

A observação da evolução das características macroscópicas e da mineralogia das amostras nos perfis permite reconhecer três estágios principais no processo de alteração a que são submetidos os basaltos da região de Porto Franco-Grajaú.

O primeiro estágio (estágio inicial) consiste na ruptura e desagregação das estruturas cristalinas dos minerais primários,com perda de coerência da amostra e formação dos primeiros argilo-minerais (principalmente smectita e halloysita , mas também caolinita). Neste estágio o material alterado tem cor verde a amarelado. Este estágio termina com o desaparecimento com

pleto dos minerais primários augita, labradorita e pigeonita , (observados nos difratogramas de raios-X).

O segundo estágio (estágio pré-caolinito) é caracterizado pelo extensivo desenvolvimento de argilo-minerais do tipo da smectita e da halloysita. Os minerais primários não mais ocorrem ou são raros, a caolinita é usualmente rara e a goethita ou a hematita podem ocorrer nas amostras. As amostras tem cor amarela a marrom.

No terceiro estágio (estágio caolinítico) o solo adquire coloração vermelha escura. Os argilo-minerais que ocorrem são a caolinita e, em menor escala, a halloysita. A smectita já desapareceu completamente e os minerais primários também . A goethita ou a hematita são abundantes. A presença de um ou outro mineral parece estar relacionada a maior ou menor disponibilidade de água no solo. Nos perfis situados em áreas de clima sub-úmido-úmido e primeiro úmido, a goethita está sempre presente. No perfil S-9, situado em área de clima subúmido-seco, a hematita predomina em todo o perfil.

Os três estágios aqui descritos podem ser nitidamente observados em um perfil razoavelmente bem desenvolvidos. A figura 08 mostra difratogramas de raios-X de três amostras do perfil S-6. A amostra S-6-1, coletada a 2,5 metros de profundidade, caracteriza o estágio 1; a amostra S-6-2 (1,5 metros) caracteriza o estágio 2 e amostras S-6-6 (0 metro) caracteriza o estágio 3.

É importante notar que as transformações mineralógicas entre os vários estágios são absolutamente graduais. Isso é demonstrado pelos dados da tabela 03, indica o aumento gradativo da intensidade de pico/vale da base para o topo do perfil S-9.

Tabela 3 - Razão da altura do pico (P) e do vale (V) da smectita em lâminas orientadas para as amostras do perfil S-9. Grajaú:MA

AMOSTRAS	PROFUNDIDADE (m)	Razão Intensidade Pico/Vale
S-9-15	1	2.00
S-9-13	3	1.32
S-9-9	7	1.35
S-9-8	8	1.28
S-9-5	11	1.28

Um segundo exemplo da gradualidade das transformações mineralógicas é constatado na figura 09, onde a gradativa transformação de halloysita em caolinita é refletida pelo decréscimo contínuo na intensidade do pico principal da primeira ($d=4.43A^{o}$) e concomitante aumento da intensidade do pico principal da caolinita ($d=7.12A^{o}$) mas tal acontece só quando têm desaparecido a smectita, o que não acontece por xemplo no perfil S-6 (Fig. 8). As amostras pertencem ao perfil S-3 e estão ordenadas segundo com suas posições relativas no perfil.

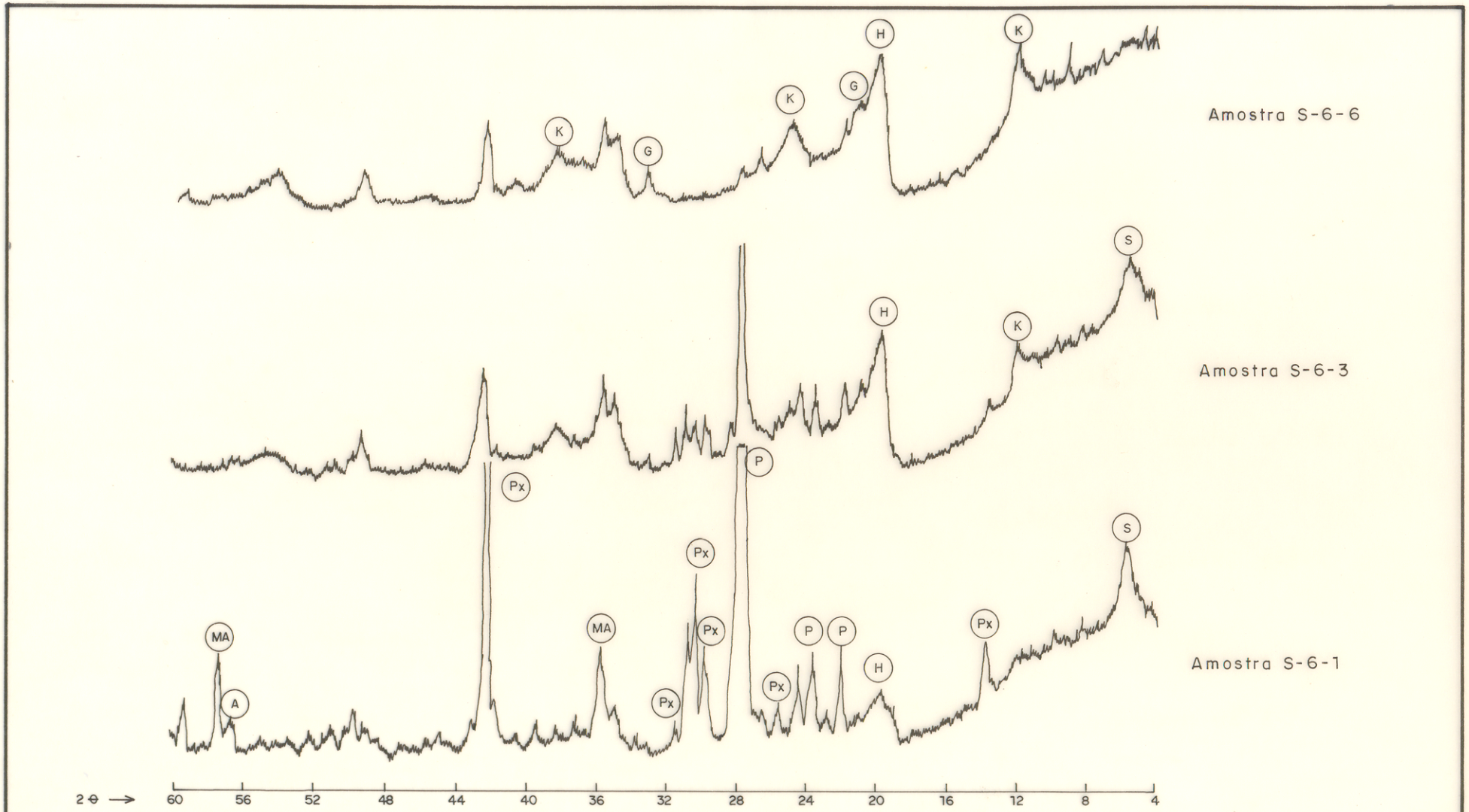


Fig. 08 – Estagios de alteração do basalto no perfil S-6; Amostra S-6-1: estágio inicial; Amostra S-6-3: estágio pré-caolinítico; Amostra S-6-6: estágio caolinítico.

As letras indicativas dos minerais, tem o mesmo significado que na tabela 1. (Px = Piroxênio)

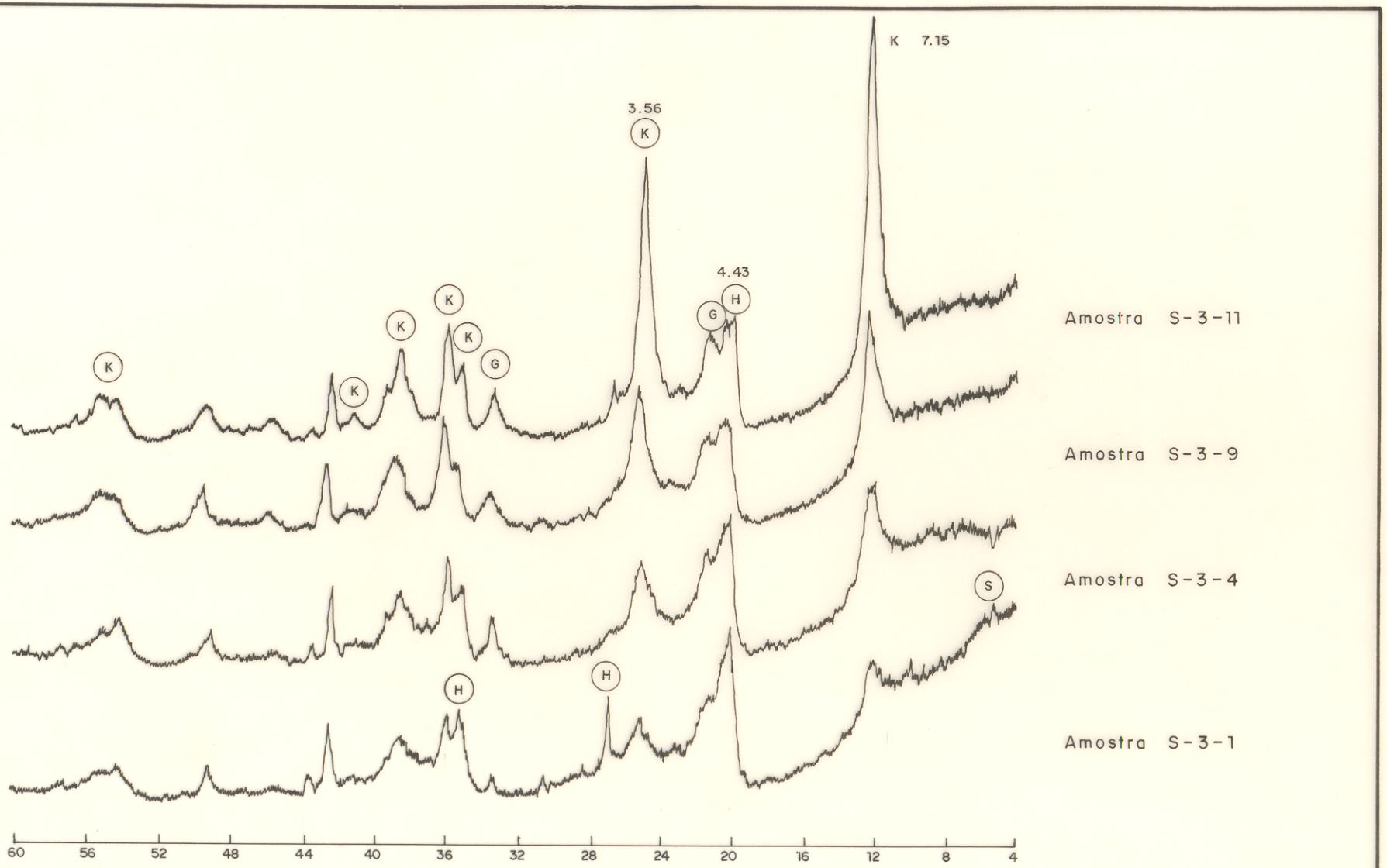


Fig. 09 – Transformação gradativa da halloysita (na base) em caulinita (no topo) no perfil S-3. Notar o aumento, da intensidade de deflexão d= 7.15 Å e a concomitante redução da intensidade do pico d= 4.43 Å.

6 DISTRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS NOS SOLOS E ÁGUAS ESTUDADOS

6.1 Distribuição dos Elementos nos Solos

As concentrações dos elementos principais e traços nas amostras de solo dos perfis S-2, S-3, S-6, S-7, S-8 e S-9 são apresentados nas tabelas 4,5,6,7,8 e 9 respectivamente. A distribuição desses elementos principais e traços em função da profundidade em cada um dos perfis é apresentada nas figuras 10 a 15.

6.1.1 Elementos Principais

Observando-se, nas figuras 10 a 15, os padrões de distribuição dos elementos nos solos estudados em função da profundidade pode-se distinguir três grupos principais de elementos maiores. O primeiro grupo é o dos elementos cujos teores aumentam irregular mas continuamente da base para o topo do perfil. O segundo grupo engloba aqueles elementos que se distribuem de maneira oposta, i.e., diminuem em teor da base para o topo do perfil. O terceiro grupo abrande os elementos de distribuição irregular, que sofrem aumentos e reduções de concentração dentro de vários pontos do perfil.

O grupo dos elementos que aumenta em concentração da base para o topo do perfil é composto por alumínio, ferro trivalente e titânio. Dos três, o ferro trivalente é aquele que aumenta em concentração mais fortemente à medida em que se ascende no perfil. Assim, enquanto que no basalto fresco os teores de Fe_2O_3 situam-se em torno de 2.4% em peso, nas partes mais intensamente alteradas dos perfis os teores atingem até 21% em peso. O alumínio também aumenta em concentração de baixo para cima no perfil, porém de forma menos acentuada. No basalto fresco o teor de Al_2O_3 é de aproximadamente de 14% em peso, enquanto que nas partes mais alteradas do perfil ele atinge até 25% em peso. O titânio apresenta igualmente uma leve tendência geral de aumento de concentração da base para o topo dos perfis. A concentração de TiO_2 no basalto fresco situa-se em torno de 1.2% em peso, enquanto que nas zonas de alteração mais pronunciada ela chega a cerca de 2.0% em peso.

TABELA 4 - Composição química das amostras do perfil S - 2 .Óxidos e perda ao fogo em % em peso, elementos em ppm. Profundidade em metros

Prof.	SiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	MnO2	P.F.	Soma
0.0	38.1	19.7	18.5	2.5	2.7	2.9	1.1	0.4	2.4	0.17	0.41	11.2	100.2
0.2	39.7	18.5	16.3	2.6	4.0	4.3	1.0	0.4	1.9	0.15	0.42	11.4	100.7
0.4	45.2	19.1	8.5	3.6	5.4	5.4	1.9	1.0	1.6	0.18	0.27	8.2	100.5
0.6	51.6	14.5	2.4	7.3	7.8	10.3	2.7	1.3	1.2	0.18	0.20	2.1	101.5

Prof.	Rb	Y	Nb	Co	Ni	Zn	V	Cu	Zr	Cr	Sr	Ba
0.0	18	40	28	71	73	131	132	226	209	108	87	123
0.2	17	35	23	75	83	125	136	188	163	141	373	195
0.4	34	33	20	60	86	115	114	140	151	157	163	205
0.6	41	27	18	41	72	103	93	109	125	134	202	74

TABELA 5 - Composição química das amostras do perfil S - 3 .Óxidos e perda ao fogo em % em peso, elementos em ppm. Profundidade em metros

Prof.	SiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	MnO2	P.F.	Soma
0.0	28.2	25.6	21.2	0.1	0.6	0.2	0.5	0.2	2.0	0.27	0.32	20.3	99.4
1.0	40.2	25.5	21.0	0.3	0.8	0.1	0.6	0.3	2.0	0.34	0.26	8.3	99.5
2.0	36.0	25.0	19.2	0.2	0.6	0.1	0.8	0.2	1.9	0.31	0.39	15.7	100.3
3.0	38.0	24.6	18.3	0.1	0.7	0.2	0.6	0.2	1.8	0.50	0.37	14.3	99.5
4.0	34.3	24.6	19.9	0.2	0.7	0.1	0.7	0.5	1.6	0.25	0.32	16.2	99.3
5.0	35.7	24.2	19.3	0.1	0.7	0.1	0.8	0.3	2.0	0.23	0.42	16.9	100.5
6.0	36.1	24.3	20.0	0.1	0.7	0.2	0.6	0.2	2.0	0.28	0.34	15.7	100.4
7.0	27.2	24.8	19.3	0.1	1.0	0.1	0.7	0.4	1.5	0.32	0.42	23.0	98.8
8.0	35.7	23.8	18.8	0.1	1.5	0.2	0.5	0.6	1.7	0.20	0.32	16.5	99.8
9.0	38.5	21.9	19.1	0.1	1.5	0.3	0.6	0.5	2.1	0.15	0.37	14.1	99.0
10.0	38.9	20.1	16.6	0.1	2.2	0.4	0.6	0.6	1.6	0.25	0.32	17.1	98.8
11.0	41.9	19.7	16.9	0.1	2.2	0.5	0.6	0.5	1.8	0.43	0.31	14.1	98.9

Prof.	Rb	Y	Nb	Co	Ni	Zn	V	Cu	Zr	Cr	Sr	Ba
0.0	11	129	22	167	271	235	114	449	184	229	9	64
1.0	13	80	21	153	165	83	128	221	191	96	4	81
2.0	14	115	21	176	135	112	96	323	187	155	9	49
3.0	10	123	18	128	149	108	96	296	166	201	9	49
4.0	12	134	21	186	241	202	112	401	180	11	6	35
5.0	15	135	22	220	223	184	104	346	185	142	7	93
6.0	13	127	23	148	118	129	96	307	181	135	7	52
7.0	26	157	22	248	378	160	56	554	180	179	10	296
8.0	27	156	20	210	283	180	48	503	169	185	13	426
9.0	32	208	16	169	189	134	92	452	174	190	22	311
10.0	42	472	19	148	322	451	80	642	141	112	38	274
11.0	32	417	20	150	234	455	72	609	151	203	45	325

TABELA 6 - Composição química das amostras do perfil S - 6 .Óxidos e perda ao fogo em % em peso, elementos em ppm. Profundidade em metros

Prof.	SiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	MnO2	P.F.	Soma
0.0	38.1	24.2	18.1	0.7	1.6	0.6	0.6	0.4	1.7	0.07	0.24	12.7	99.0
0.5	38.1	23.2	18.4	0.3	1.7	0.5	0.6	0.4	1.6	0.05	0.22	13.6	98.7
1.0	40.8	21.2	16.6	0.8	2.3	0.7	0.6	0.4	1.6	0.04	0.29	13.3	98.5
1.5	44.4	19.3	14.1	1.0	4.3	2.7	1.3	0.9	1.5	0.08	0.22	10.1	99.8
2.0	48.9	15.6	8.2	3.5	7.6	7.0	2.1	0.8	1.2	0.11	0.20	6.3	101.4
2.5	49.5	15.4	6.2	4.5	7.7	8.3	2.3	0.8	1.2	0.12	0.19	6.1	102.3

Prof.	Rb	Y	Nb	Co	Ni	Zn	V	Cu	Zr	Cr	Sr	Ba
0.0	22	11	13	53	123	113	171	176	151	171	32	134
0.5	23	11	13	54	106	106	146	161	143	192	34	78
1.0	18	13	11	63	97	91	124	144	129	198	40	212
1.5	21	28	11	48	102	105	129	139	122	184	119	281
2.0	14	13	13	46	82	97	122	111	118	208	225	209
2.5	14	29	13	43	76	93	115	103	115	154	266	103

TABELA 7 - Composição química das amostras do perfil S - 7 .Óxidos e perda ao fogo em % em peso, elementos em ppm. Profundidade em metros

Prof.	SiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	MnO2	P.F.	Soma
0.0	37.2	22.2	18.8	0.7	2.4	1.4	0.7	0.4	1.8	0.09	0.27	14.0	99.9
0.3	37.8	23.3	17.8	1.0	2.3	1.3	0.6	0,4	1.8	0.09	0.26	13.6	100.2
0.6	42.1	22.5	17.3	0.6	1.8	1.0	0.6	0.5	1.8	0.06	0.27	11.2	99.8
0.9	40.7	21.8	16.7	0.7	2.1	1.2	0.4	0.7	1.8	0.10	0.27	13.5	100.0
1.2	51.3	14.4	3.7	6.3	8.1	10.0	2.4	0.7	1.1	0.13	0.20	2.7	100.9

Prof.	Rb	Y	Nb	Co	Ni	Zn	V	Cu	Zr	Cr	Sr	Ba
0.0	20	17	15	53	103	90	142	119	143	180	122	225
0.3	18	22	15	59	127	113	152	126	154	215	95	265
0.6	15	20	13	56	119	103	155	125	145	207	86	225
0.9	18	29	13	58	111	121	155	87	140	187	94	211
1.2	13	45	16	42	80	108	148	70	110	178	356	113

TABELA 8 - Composição química das amostras do perfil S - 8 .Óxidos e perda ao fogo em % em peso, elementos em ppm. Profundidade em metros

Prof.	SiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	MnO2	P.F.	Soma
0.0	44.7	19.2	15.2	0.2	2.9	0.2	0.1	0.9	1.6	0.01	0.16	14.2	99.3
0.5	42.5	19.8	17.1	0.4	3.3	0.2	0.3	1.4	2.0	0.04	0.28	12.0	99.3
1.0	43.5	20.7	15.5	0.3	3.4	0.3	0.4	1.0	1.5	0.02	0.21	12.6	99.4
1.5	44.0	18.3	13.9	0.4	4.2	0.4	0.4	0.7	1.5	0.02	0.19	15.5	99.5
2.0	45.1	18.8	14.5	0.1	3.7	0.4	0.4	1.0	1.5	0.02	0.21	13.4	99.2
2.5	46.7	18.5	14.0	0.5	4.2	0.5	0.7	1.1	1.5	0.02	0.21	11.5	99.5

Prof.	Rb	Y	Nb	Co	Ni	Zn	V	Cu	Zr	Cr	Sr	Ba
0.0	39	54	13	46	102	115	174	152	165	200	103	243
0.5	49	66	16	64	173	142	171	166	167	173	103	496
1.0	31	56	10	52	115	124	152	118	132	209	88	404
1.5	29	67	9	46	100	124	135	71	109	179	135	574
2.0	34	52	10	46	106	133	133	83	127	203	162	583
2.5	32	49	10	48	100	122	129	111	122	225	188	652

TABELA 9 - Composição química das amostras do perfil S - 9 .Óxidos e perda ao fogo em % em peso, elementos em ppm. Profundidade em metros

Prof.	SiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	MnO2	P.F.	Soma
0.0	44.4	20.4	17.7	0.7	2.8	0.1	0.4	0.2	1.9	0.02	0.10	10.7	99.5
1.0	43.3	20.3	17.1	0.3	3.2	0.2	0.6	0.4	1.8	0.02	0.09	13.2	100.4
2.0	42.9	20.9	17.1	0.1	4.9	0.2	0.3	0.4	1.7	0.02	0.17	10.9	99.5
3.0	43.6	19.7	16.1	0.1	4.5	0.2	0.7	0.6	1.7	0.02	0.28	13.1	100.6
4.0	45.5	17.7	14.5	0.3	4.0	0.3	0.5	1.3	1.6	0.02	0.49	14.6	100.7
5.0	45.9	17.1	14.5	0.6	4.8	0.4	0.3	1.5	1.6	0.02	0.26	12.8	99.6
6.0	45.2	17.1	14.0	0.4	4.7	0.4	0.9	1.4	1.5	0.02	0.16	13.9	99.7
7.0	46.6	17.2	14.4	0.3	4.8	0.4	1.3	1.3	1.5	0.02	0.18	11.6	99.5
8.0	48.2	15.3	12.1	0.9	6.5	2.4	1.5	1.1	1.4	0.02	0.21	10.6	100.2
9.0	48.5	14.9	11.4	1.2	6.8	3.8	2.1	1.4	1.4	0.07	0.25	8.2	99.8
10.0	47.7	15.0	11.7	1.2	7.5	3.7	1.5	1.5	1.3	0.09	0.25	10.1	101.5
11.0	48.6	14.4	10.6	1.1	7.8	4.3	1.9	1.6	1.3	0.10	0.29	8.7	100.7
12.0	48.0	14.8	11.2	1.2	8.7	4.1	2.0	1.3	1.4	0.10	0.27	8.3	101.3
13.0	47.1	13.9	10.2	1.9	8.1	6.2	2.5	0.8	1.4	0.14	0.25	7.1	99.4
14.0	47.6	14.2	10.4	1.3	9.3	5.8	3.2	1.9	1.3	0.17	0.20	3.7	99.0
15.0	48.7	13.2	10.0	1.0	7.8	5.3	3.7	1.6	1.2	0.15	0.15	6.1	99.0

Continua

Continuação Tabela 9

Prof.	Rb	Y	Nb	Co	Ni	Zn	V	Cu	Zr	Cr	Sr	Ba
0.0	22	14	14	40	96	91	105	163	174	279	16	59
1.0	25	19	12	25	96	90	92	135	164	245	22	37
2.0	21	24	10	39	119	147	95	185	143	237	29	163
3.0	22	23	10	110	163	125	86	151	130	327	41	170
4.0	42	28	11	93	155	121	114	183	148	437	50	381
5.0	28	27	10	64	122	127	86	150	136	439	80	244
6.0	26	21	8	42	111	111	76	142	124	260	99	248
7.0	26	23	9	56	116	114	76	143	131	379	119	189
8.0	18	49	10	46	96	95	67	119	131	376	142	167
9.0	24	24	9	46	104	108	81	125	128	493	157	254
10.0	25	13	7	43	103	104	86	158	117	377	182	100
11.0	29	14	9	48	93	107	100	121	114	350	204	108
12.0	27	16	10	48	101	97	81	111	124	277	367	102
13.0	19	25	12	45	101	98	105	132	126	328	492	74
14.0	37	29	13	44	103	96	81	202	128	351	315	153
15.0	32	23	12	43	100	86	105	116	123	249	259	191

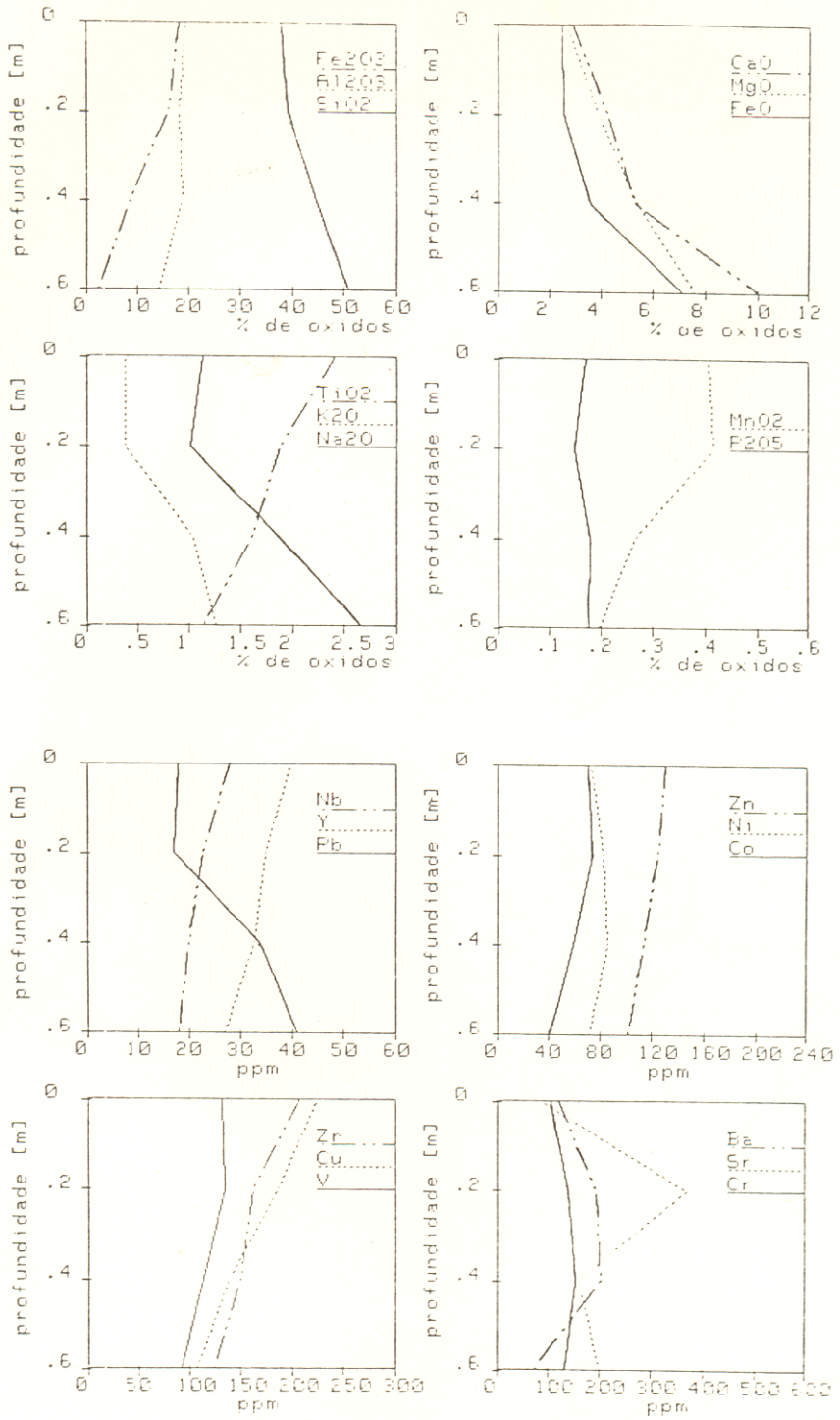


Fig. 10 — Distribuição dos elementos maiores (Expressos em % em peso de oxidos) e dos elementos traços (Expressos em partes por milhão) segundo a profundidade. Perfil S-2.

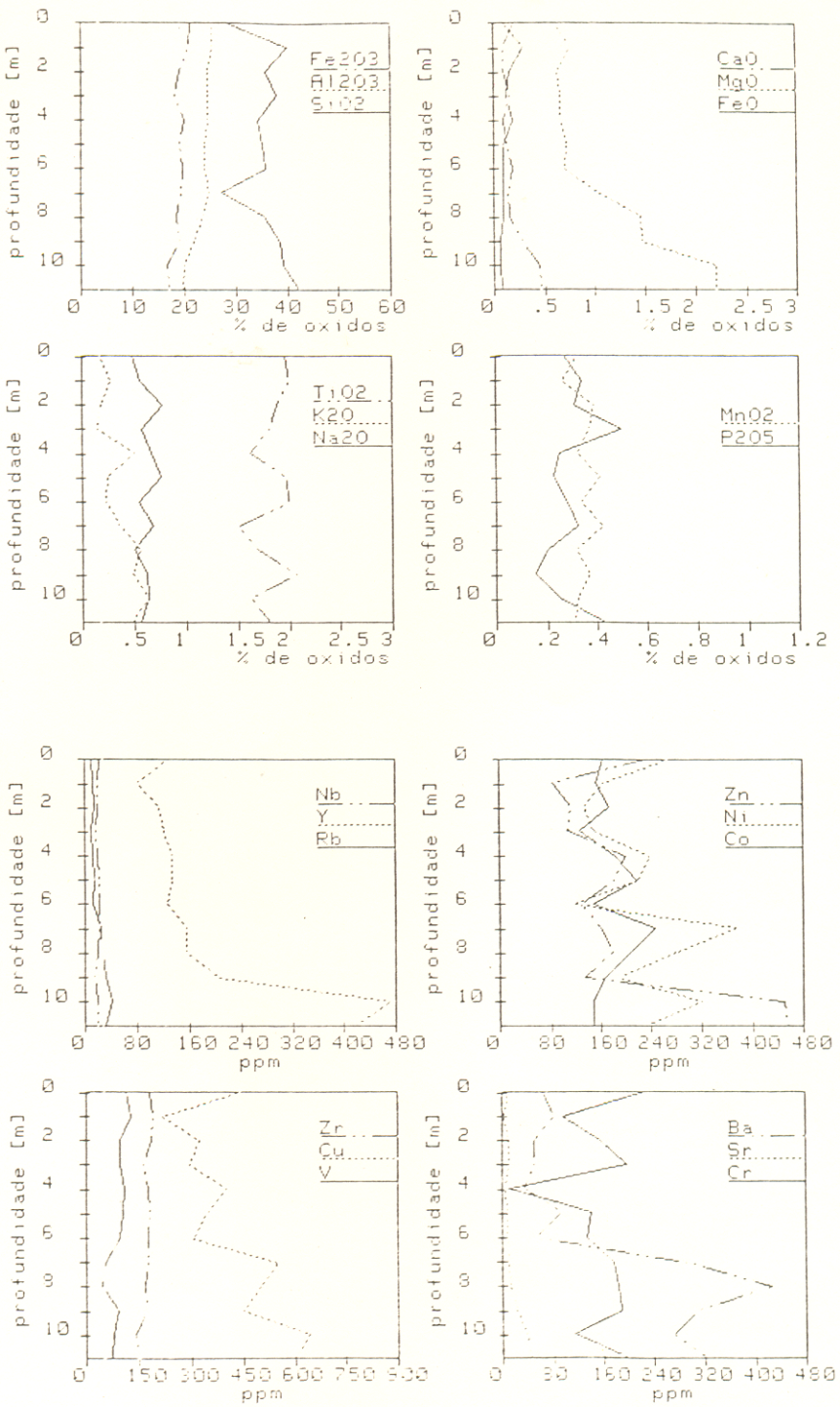


Fig. 11 — Distribuição dos elementos maiores (Expressos em % em peso de óxidos) e dos elementos traços (Expressos em partes por milhão) segundo a profundidade. Perfil S–3.

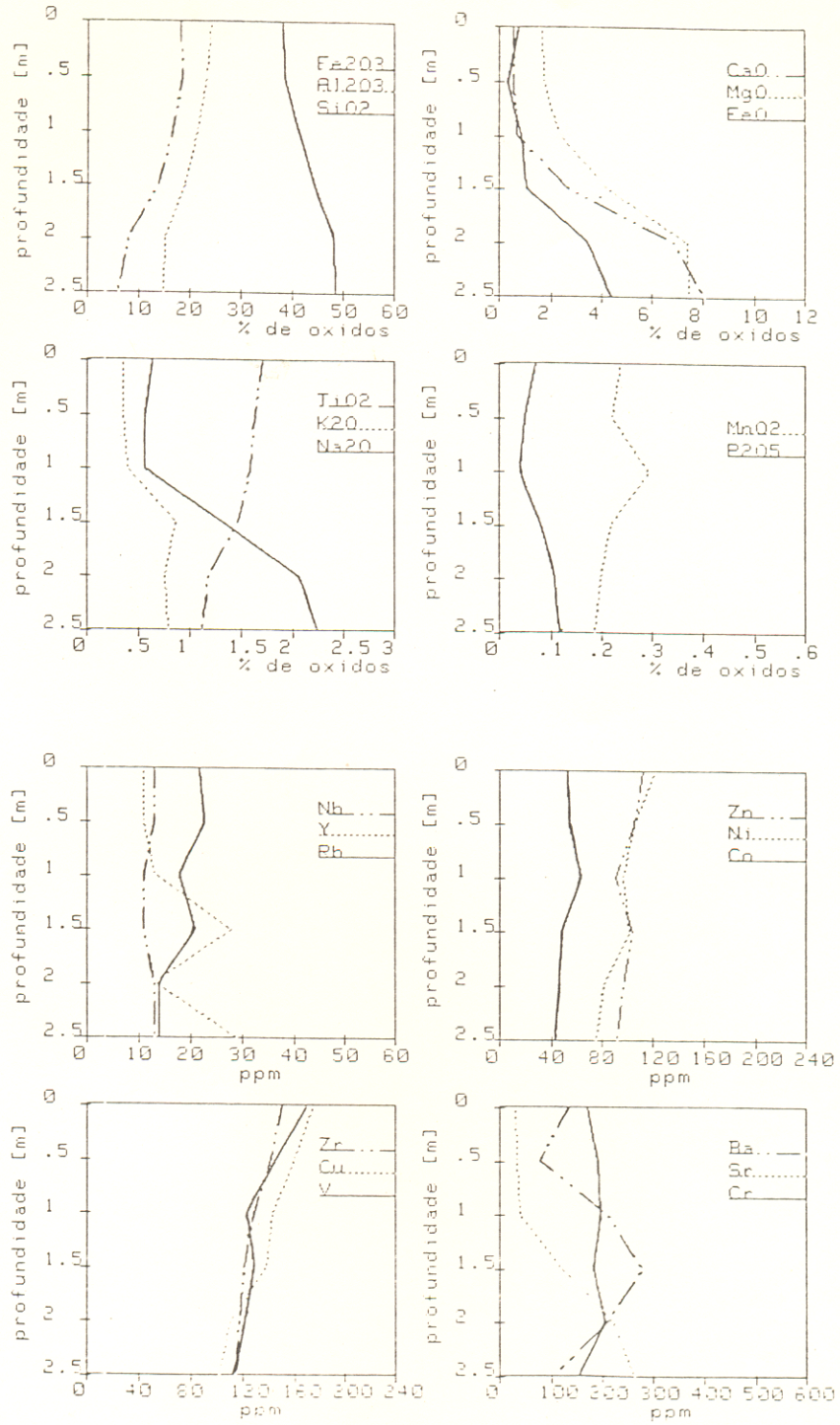


Fig. 12 — Distribuição dos elementos maiores (Expressos em % em peso de óxidos) e dos elementos traços (Expressos em partes por milhão) segundo a profundidade. Perfil S–6.

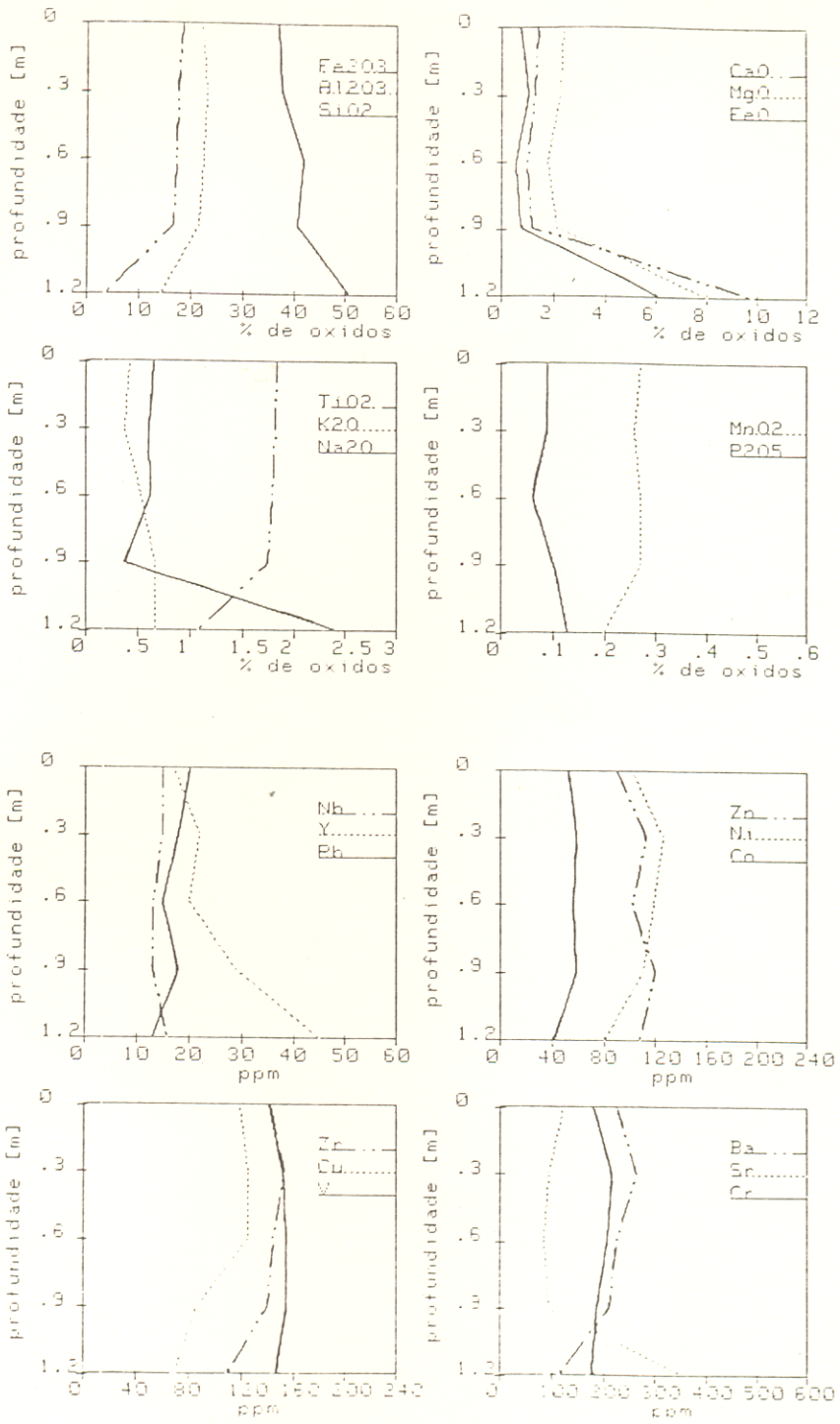


Fig. 13 — Distribuição dos elementos maiores (Expressos em % em peso de óxidos) e dos elementos traços (Expressos em partes por milhão) segundo a profundidade. Perfil S—7.

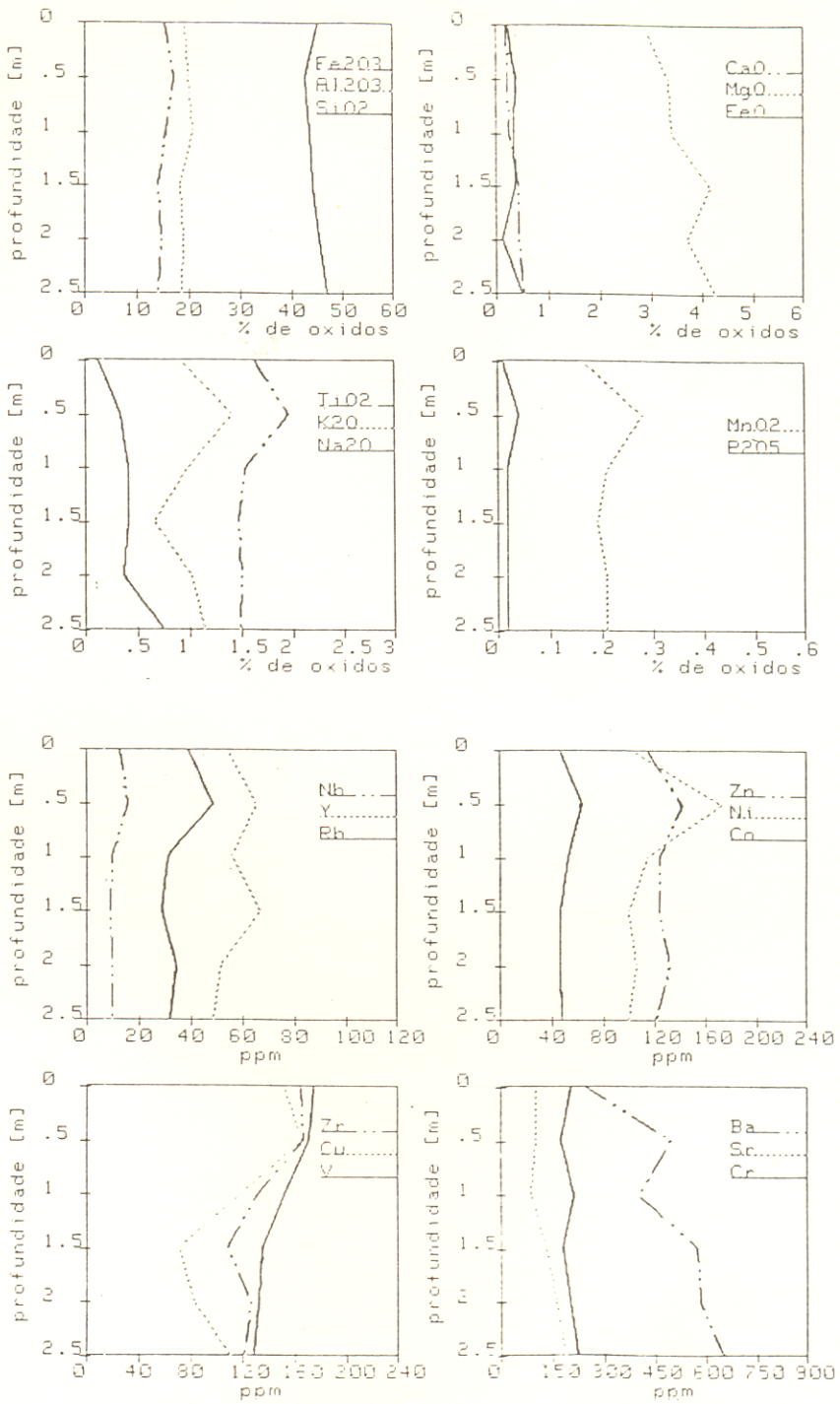


Fig. 14 — Distribuição dos elementos maiores (Expressos em % em peso de óxidos) e dos elementos traços (Expressos em partes por milhão) segundo a profundidade. Perfil S — 8.

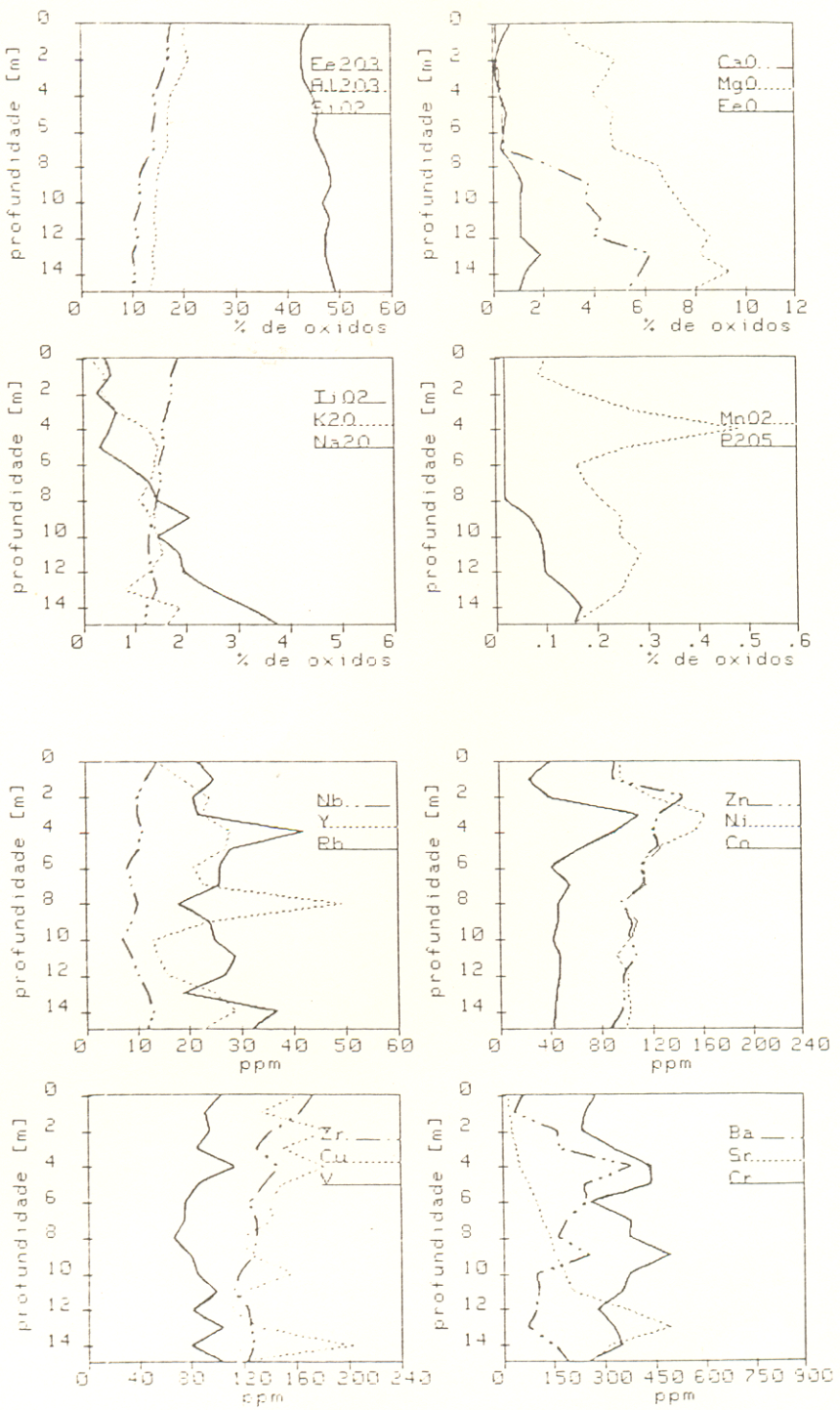


Fig. 15 — Distribuição dos elementos maiores (Expressos em % em peso de óxidos) e dos elementos traços (Expressos em partes por milhão) segundo a profundidade. Perfil S—9

O grupo dos elementos principais que apresentam tendência geral de redução dos teores da base do perfil para o seu topo abrange: silício, ferro divalente, magnésio, cálcio, sódio e potássio.

A intensidade da redução das concentrações à medida que progride o processo de alteração varia de elemento para elemento, como atestam as diferenças entre os teores dos óxidos correspondentes no basalto fresco e na zona de alteração mais intensa. Para o SiO_2 seus teores são , respectivamente, 52 e 28% em peso; para o FeO, 7.3 e 0.1% em peso; para o MgO, 7.8 e 0.6% em peso; para o CaO, 10.3 e 0.1% em peso; para o Na_2O, 2.7 e 0.1% em peso e para o K_2O, 1.29 e 0.17% em peso.

Os teores dos elementos do terceito grupo, constituído por manganês e fósforo, variam irregularmente no perfil . O MnO_2 apresenta tores mais elevados na parte média do perfil , diminuindo na sua parte superior. O P_2O_5 tem comportamento inverso; suas concentrações são reduzidas na parte média do perfil e aumentadas na parte superior. Os teores de ambos os elementos em todos os perfis são relativamente baixos. Os teores de MnO_2 variam entre 0.1 e 0.5% em peso, enquanto que os de P_2O_5 oscilam entre 0.02 e 0.5% em peso.

6.1.2 Elementos Traços

Os elementos traços tem sua distribuição geralmente relacionada à dos elementos maiores, em conseqüência de suas fixações em minerais desses elementos maiores. Semelhantemente ao que acontece com os elementos principais, os elementos traços podem ser divididos em três grupos em função de seus padrões de distribuição nos perfis estudados. O primeiro grupo, dos elementos cujas concentrações aumenta de um modo geral da base para o topo do perfil, inclui Co, Ni, Zn, V, Cu e Zr. O segundo grupo de elementos que, de uma maneira geral, diminuem de teores da base para o topo do perfil, abrange Rb, Y, Nb e Sr. O terceiro grupo é caracterizado pelos elementos de distribuição irregular (Cr e Ba). As características mais importantes do padrão de distribuição de cada elemento traço são discutidos a seguir:

Rubídio - O teor de rubídio no basalto fresco é de 41 ppm. A concentração diminui à medida que se ascende no perfil, chegando até cerca de 11ppm nas partes mais superiores.

Ítrio - O basalto fresco contém 27 ppm de Y. A tendência geral é de redução do teor de Y de baixo para cima nos perfis estudados. Os teores de Y nas amostras estudadas variam entre 14 e 40 ppm, mas valores anômalos de até 470 ppm foram detectados no perfil S-3.

Nióbio - O nióbio tem um padrão de distribuição algo semelhante ao de Ítrio. No basalto fresco o teor de Nióbio é de 20 ppm. No solo, os teores variam de 7 a 28 ppm, com leve tendência de diminuição de teor, da base para o topo dos perfis.

Bário - O basalto fresco contém 74 ppm de bário . Os teores de bário no solo oscilam entre 35 e 652 ppm. A distribuição é irregular, geralmente com uma tendência de aumentar de concentração na parte média do perfil e redução no seu topo.

Cobalto - O teor de cobalto no basalto fresco é de 41 ppm. Os teores crescem, de um modo geral, da base para o topo do perfil chegando a atingir até 110 ppm, baixando posteriormente na parte mais superior dos perfis. Teores anômalos de até 220 ppm, são detectados no perfil S-3.

Cromo - A distribuição de cromo nas amostras dos perfis estudados é bastante irregular. O basalto fresco possui 134 ppm de Cr enquanto que os teores de Cr no solo variam entre 96 e 439 ppm. Não é possível identificar uma tendência definida para a distribuição do cromo. Em alguns perfis sua concentração cresce irregularmente, em outros decresce também irregularmente em direção ao topo.

Cobre - A tendência geral da distribuição do cobre nos perfis estudados é a de um aumento em concentração a partir da base em direção ao topo. No basalto fresco o teor de cobre é de 109 pp,, nas amostras de solo os teores variam entre 70 e 226 ppm. No perfil S-3 foram detectados valores anômalos para o cobre, que atingiam até 642 ppm.

Níquel - O níquel tem padrão de distribuição muito semelhante ao do cobalto. O teor de Ni no basalto fresco é de 72 ppm e aumenta a medida que avança em direção as partes superio -

res do perfil, caindo apenas no topo do perfil. No solo os teo - res de Ni variam entre o teor detectado no basalto fresco e 173 ppm. Valores anômalos, de até 378 ppm, foram, porém, detectados no perfil S-3.

Estrôncio - Os teores de estrôncio variam nas amostras estudadas entre 4 e 492 ppm. O basalto fresco contém 202 ppm de Sr. De um modo geral os teores de Sr decrescem gradativamente da base para o topo dos perfis estudados.

Vanádio - Os teores de vanádio nas amostras estudadas variam entre 48 e 174 ppm. De um modo geral a concentração de vanádio aumenta a partir da rocha fresca, que contém 93 ppm de V, em direção ao topo do perfil.

Zinco - O teor de zinco no basalto fresco é de 103 ppm. O zinco apresenta leve tendência de aumento de concentra - ção até a parte média, diminuindo novamente de teor na parte mais superior do perfil. Os teores variam entre 86 e 142 ppm, mas teores anômalos, de até 450 ppm, foram encontrados no perfil S-3.

Zircônio - O zircônio apresenta a tendência geral de aumentar de concentração da base para o topo dos perfis. No basalto fresco o teor é de 109 a 209 ppm.

6.2 Valores de Eh e pH nos Solos

Os valores medidos de pH e Eh nas amostras coletadas são indicada na tabela 10. Nota-se que os valores de pH variam de moderadamente alcalinos a moderadamente ácidos (8.65 a 4.60). Os valores mais altos foram determinados nas amostras frescas e pouco alteradas, coletadas nas partes mais profundas dos perfis. Os valores decrescem de maneira contínua da base para o topo dos perfis. Um ligeiro acréscimo é notado apenas no horizonte A de alguns dos perfis estudados.

Todos os valores de Eh medidos são positivos, caracterizando portanto ambientes oxidantes. Os valores varial entre + 0.48 V e + 0.74 Volt. Os valores mais baixos são encontrados nas amostras coletadas nas partes mais profundas dos perfis. À medida em que se ascende nos perfis os valores de Eh tornando-se gradativamente maiores. Um ligeiro decréscimo dos valores é detectado apenas nas amostras coletadas nas zonas mais superiores

TABELA 10: Valores de pH e Eh para amostras em mistura com agua na relação 3:2

Amostra	profundidade [metros]	pH	Eh[Volts] [Volts]	Estagio de alteracao
S-2-4	0.0	6.50	0.64	2
S-2-3	0.2	6.70	0.64	1
S-2-2	0.4	6.80	0.63	1
S-2-1	0.6	8.65	0.54	1
S-3-12	0.0	4.80	0.74	3
S-3-11	1.0	4.60	0.75	3
S-3-10	2.0	4.70	0.74	3
S-3-9	3.0	4.65	0.75	3
S-3-8	4.0	4.60	0.75	3
S-3-7	5.0	4.60	0.75	3
S-3-6	6.0	4.60	0.75	3
S-3-5	7.0	4.70	0.74	3
S-3-4	8.0	4.70	0.75	3
S-3-3	9.0	4.90	0.73	3
S-3-2	10.0	4.90	0.73	3
S-3-1	11.0	5.10	0.72	2
S-6-6	0.0	5.30	0.72	3
S-6-5	0.5	5.15	0.74	3
S-6-4	1.0	5.40	0.72	2
S-6-3	1.5	6.00	0.69	2
S-6-2	2.0	6.80	0.63	1
S-6-1	2.5	7.35	0.62	1
S-7-5	0.0	5.50	0.71	3
S-7-4	0.3	5.80	0.71	3
S-7-3	0.6	5.90	0.69	3
S-7-2	0.9	6.00	0.69	2
S-7-1	1.2	7.60	0.59	1
S-8-6	0.0	5.35	0.67	2
S-8-5	0.5	5.60	0.71	2
S-8-4	1.0	5.65	0.72	2
S-8-3	1.5	5.80	0.71	2
S-8-2	2.0	5.90	0.69	2
S-8-1	2.5	5.95	0.69	2
S-9-16	0.0	5.40	0.53	2
S-9-15	1.0	5.60	0.62	2
S-9-14	2.0	5.20	0.64	2
S-9-13	3.0	5.10	0.63	2
S-9-12	4.0	5.35	0.63	2
S-9-11	5.0	5.50	0.62	2
S-9-10	6.0	6.20	0.58	2
S-9-9	7.0	6.60	0.56	2
S-9-8	8.0	7.20	0.53	1
S-9-7	9.0	7.15	0.53	1
S-9-6	10.0	7.20	0.52	1
S-9-5	11.0	7.60	0.51	1
S-9-4	12.0	7.30	0.52	1
S-9-3	13.0	7.70	0.51	1
S-9-2	14.0	8.30	0.48	1
S-9-1	15.0	8.35	0.48	1

dos perfis (horizonte A). Esse decréscimo é resultante da abun - dância, nesse horizonte, de matéria orgânica, agente tipicamente redutor.

6.3 Distribuição dos Elementos e Valores de Condutividade e pH nas Amostras de Água

As amostras de água analisadas neste trabalho foram coletadas em sete (7) diferentes locais, sendo três em rios (águas de superfície) e quatro (4) em poços (água subterrânea). As amostras de água de superfície receberam os números A-1, A-2 e A-3. As amostras de água subterrânea foram denominadas A-4 , A-5, A-6 e A-7. Os locais de coleta foram os seguintes:

Amostra A-1 - Rio Tocantins, sob a ponte Juscelino Kubstchek na cidade de Estreito.

Amostra A-2 - Rio Itaueiras, na sua confluência com a BR-226, a 11km ao norte de Estreito.

Amostra A-3 - Rio Sucupira, na sua confluência com a Rodovia BR-226, a 23km ao norte de Estreito.

Amostra A-4 - Poço no Entroncamento de Porto Franco, na casa do Sr. Carlos de Souza Ramos.

Amostra A-5 - Poço na Fazendo Bom Jesus, margem norte da Radovia Porto Franco-Grajaú, a 43 km de Porto Franco.

Amostra A-6 - Poço na Fazenda Santa Tereza, na margem Sul da Rodovia Porto Franco-Grajapu, a 50 metros a leste do ponto A-5.

Amostra A-7 - Poço na Fazenda Toladeira, na Rodo - via BR-010, a 5km ao norte de Porto Franco.

Em cada ponto as amostras foram coletadas quatro vezes: a primeira vez em agosto de 1982 (lote nº 1), a segunda em novembro de 1982 (lonte nº 2), a terceira em março de 1983 (lote nº 3) e a quarta em junho de 1983 (lote nº 4). Os resultados das análises físico-químicas das amostras dos quatro lotes são apresentados nas tabelas 11,12,13 e 14. Os dados sobre a condutividade e o pH dessas aáguas são apresentados nas tabelas 15 e 16. As concentrações dos elementos traços nas amostras de água foram determinadas apenas para os lotes 2,3 e 4. Nas amostras do lote 1 foram determinados apenas os elementos principais.

O significado das características físico-quimicas

das águas estudadas e sua influência no processo de intemperismo dos basaltos da área são discutidos no próximo capítulo. É de se destacar aqui, porém, a forte variação sazonal experimentada pela concentração da maioria dos elementos químicos dissolvidos nas águas de superfície e de subsuperfície. Variações não tão intensas mas claramente perceptíveis são observadas também nos valores de condutividade e de pH das amostras de água coletadas em diferentes épocas do ano.

TABELA 11 : Constuintes químicos das águas em contato com os perfis de alteração. Concentrações de Na, K, Ca, Mg, Si, Fe,Cl, expressas em ppm, e os restantes em ppb; lote No 1 .

	Local de coleta						
Elemento	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
Na	1.2	1.2	6.1	2.6	6.2	9.0	4.6
K	1.3	2.5	2.4	1.9	2.5	2.6	1.8
Ca	8.5	16.2	36.2	7.7	28.9	19.7	35.1
Mg	4.2	4.2	9.8	5.4	17.1	9.1	20.3
Si	5.4	17.6	21.1	16.6	31.6	26.8	25.1
Fe	0.3	0.7	0.6	0.6	0.6	0.2	0.4
Cl	4.1	4.1	6.1	10.2	6.1	5.1	17.3

TABELA 12 : Constuintes químicos das águas em contato com os perfis de alteração. Concentrações de Na, K, Ca, Mg, Si, Fe,Cl, expressas em ppm, e os restantes em ppb; lote No 2 .

	Local de coleta						
Elemento	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
Na	1.4	3.5	5.8	2.8	6.2	4.6	9.0
K	1.9	2.2	2.4	1.9	2.0	2.1	1.3
Ca	6.0	7.7	28.2	8.5	31.4	23.7	34.2
Mg	2.7	11.0	12.5	8.5	20.8	11.7	22.5
Si	3.2	13.2	17.0	15.0	27.0	24.0	19.0
Fe	0.8	0.7	0.6	0.6	0.3	0.3	0.2
Cl	12.1	4.1	5.7	8.9	7.3	4.9	9.7
Cd	1.2	0.4	0.7	0.4	0.8	0.5	0.7
Al	17	8	8	7	6	7	14
Bi	5	8	12	9	16	10	18
Co	17	30	27	33	46	33	43
Ba	50	91	91	279	94	50	75
Cr	4	4	4	3	5	5	5
Mn	16	18	16	16	13	14	18
Cu	12	5	11	7	15	10	15
Ni	43	130	75	58	73	69	81
Sr	23	43	83	74	86	51	122
V	24	60	48	49	65	68	81

TABELA 13 : Constuintes químicos das águas em contato com os perfis de alteração. Concentrações de Na, K, Ca, Mg, Si, Fe,Cl, expressas em ppm, e os restantes em ppb; lote No 3 .

	Local de coleta						
Elemento	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
Na	2.2	3.7	6.5	4.6	6.6	4.8	9.8
K	1.7	2.2	2.5	1.9	2.1	2.1	1.8
Ca	8.1	13.9	28.9	5.4	28.1	21.6	35.8
Mg	3.7	6.5	11.9	6.1	17.5	12.4	20.6
Si	6.0	9.6	12.6	9.2	14.2	11.4	13.4
Fe	1.9	1.5	0.4	0.2	0.1	0.1	0.2
Cl	2.2	2.2	2.9	7.3	4.1	2.9	7.9
Cd	0.6	0.8	1.1	1.0	1.1	1.0	1.2
Al	171	41	24	14	24	20	24
Bi	24	36	44	44	56	56	58
Co	26	32	39	41	43	43	49
Ba	88	68	68	244	94	47	41
Cr	7	3	4	3	3	4	4
Mn	46	49	32	8	10	19	20
Cu	6	4	10	9	9	8	10
Ni	10	10	13	21	15	33	15
Sr	31	43	81	61	74	49	162
V	139	78	55	44	44	44	44

TABELA 14 : Constuintes químicos das águas em contato com os perfis de alteração. Concentrações de Na, K, Ca, Mg, Si, Fe,Cl, expressas em ppm, e os restantes em ppb; lote No 4 .

	Local de coleta						
Elemento	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
Na	1.1	2.8	5.9	2.2	5.7	3.7	8.2
K	1.1	2.4	2.2	1.6	2.2	2.3	1.7
Ca	9.0	13.9	29.0	5.7	26.1	21.6	35.9
Mg	2.1	5.7	11.6	5.8	15.8	10.7	19.1
Si	6.6	14.6	5.8	14.0	10.0	11.5	5.0
Fe	0.3	0.7	0.4	0.5	0.2	0.1	0.2
Cl	3.1	6.3	8.3	12.7	8.9	5.2	17.2
Cd	0.7	1.1	0.9	0.9	1.4	1.2	1.5
Al	67	57	126	82	122	73	92
Bi	30	52	40	66	64	48	58
Co	27	44	40	50	52	46	51
Ba	59	53	90	29	70	41	41
Cr	1	2	3	5	2	4	1
Mn	16	39	36	56	15	19	27
Cu	6	5	19	18	6	6	14
Ni	13	21	13	36	26	21	36
Sr	27	38	71	81	79	47	155
V	122	67	44	33	50	44	67

TABELA 15 : Condutividade em micromhos/cm, das águas de Porto-Fran_
co-Grajaú:MA.

Local de coleta	Lote 1	2	3	4
A-1	64	55	58	84
A-2	115	130	112	104
A-3	220	235	240	255
A-4	91	115	105	115
A-5	280	305	285	285
A-6	165	215	210	215
A-7	330	320	350	360

TABELA 16 : Valores do pH das aguas de Porto Franco-Grajaú:MA.

Local de coleta	Lote 1	2	3	4
A-1	6.9	7.3	7.3	7.3
A-2	6.9	7.4	7.2	7.7
A-3	7.0	7.4	7.5	7.7
A-4	6.8	6.2	6.0	6.9
A-5	7.0	7.1	7.5	7.4
A-6	7.0	7.4	7.9	7.5
A-7	6.9	7.0	7.3	7.5

7 DISCUSSÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

No presente capítulo procura-se discutir e interpretar os dados apresentados no capítulo anterior, visando determinar-se a influência dos parâmetros físico-químicos, tais como o pH, e Eh e os gradientes de composição química na evolução dos processos de intemperismo das rochas basálticas da região de Porto Franco-Grajaú.

Discussões e conclusões preliminares sobre a evolução física dos perfis de alteração dessas rochas e sobre as alterações minerais provocadas pelo intemperismo foram já apresentados nos capítulos 4 e 5.

7.1 A Influência do pH e do Eh nos Processos de Alteração Supergênica dos Basaltos da Região de Porto Franco-Grajaú

7.1.1 Limites dos Valores de pH e Eh nos Processos Estudados

Os valores de pH mais altos encontrados nos diferentes perfis correspondem as rochas frescas, como conseqüência dos altos teores em óxidos metálicos (FeO, CaO, MgO etc) que elas apresentam. Os valores de pH nessas rochas situam-se em torno de 8.5. As águas que percolam o basalto, por outro lado, são águas meteóricas acidificadas pela dissolução de CaO_2 da atmosfera e pelos ácidos orgânicos gerados pela matéria orgânica em decomposição. Garrels e Christ (1965) mostram que apenas por efeito de dissolução do CO_2 atmosférico, o pH das águas naturais já atinge valores em torno de 5.7. A abundância de matéria orgânica na área em estudo contribui para a redução ainda maior do pH.

As rochas basálticas foram formadas em condições mais redutoras que as atualmente observadas na área, fato atestado pela abundância de ferro divalente nessa rocha. O ambiente de intemperismo no qual se encontra o basalto, no entanto, é altamente oxidante, em conseqüência da abundância do oxigênio na atmosfera e de água no ambiente superficial.

A partir dessas considerações iniciais é fácil constatar que a tendência dominante no decorrer dos processos de intemperismo é a de diminuição gradual do pH e o aumento relativo do Eh, da base para o topo dos perfis. Esse fato é efetiva -

mente observado em todos os perfis (Fig. 16) sendo as taxas de variação de Eh e pH particularmente intensas nas zonas situadas imediatamente acima do basalto fresco, como pode ser notado no caso do perfil S-2 (Fig. 16), onde em cerca de 20cm a partir de rocha fresca o pH decresce em duas unidades e o Eh cresce de 0.1 Volt. Essas variações abruptas são características do primeiro estágio de alteração, descrito no capítulo 5.

No segundo estágio de alteração (estágio pré-caolínítico) no qual predominam a smectita e a halloysita no perfil , as taxas de variações de pH e Eh com a profundidade são menores, como se observa nos perfis S-6, S-7 e S-9 (Figura 16) . O terceiro estágio de alteração (caolinítico) caracteriza-se pelos valores razoavelmente constantes para o pH próximo de 5 e Eh em torno de 0.75 Volt, como se observa no perfil S-3 (Figura 16).

No perfil S-9, desenvolvido em clima mais seco que os restantes, as tendências de variação de pH e Eh são muito menos claras, embora ainda perceptíveis (Figura 16) . Em todos os perfis registra-se a inversão no comportamento do Eh quando se atinge o horizonte A. Ela é devida à presença de matéria orgânica, que origina um microambiente redutor nessa parte do perfil.

7.1.2 Influência do pH e do Eh na Formação de Novos Minerais

Ao se abordar a evolução do processo de alteração e a formação de argilo-minerais, nota-se que o pH do meio não é uma variável independente no processo intempérico, mas, ao contrário, parece estar interrelacionado com:

- a estrutura e a composição dos argilo-minerais as quais, em última análise, condicionam o seu valor.
- a velocidade de remoção tanto dos cátions como da sílica, que são os constituintes esssenciais dos argilo-minerais.

Quando o processo de alteração está se iniciando , a lixiviação, embora muito interna, ainda não é suficiente para a remoção completa da sílica e dos cátions, principalmente dos metais alcalino-terrosos. Assim sendo, o ambiente torna-se alca-

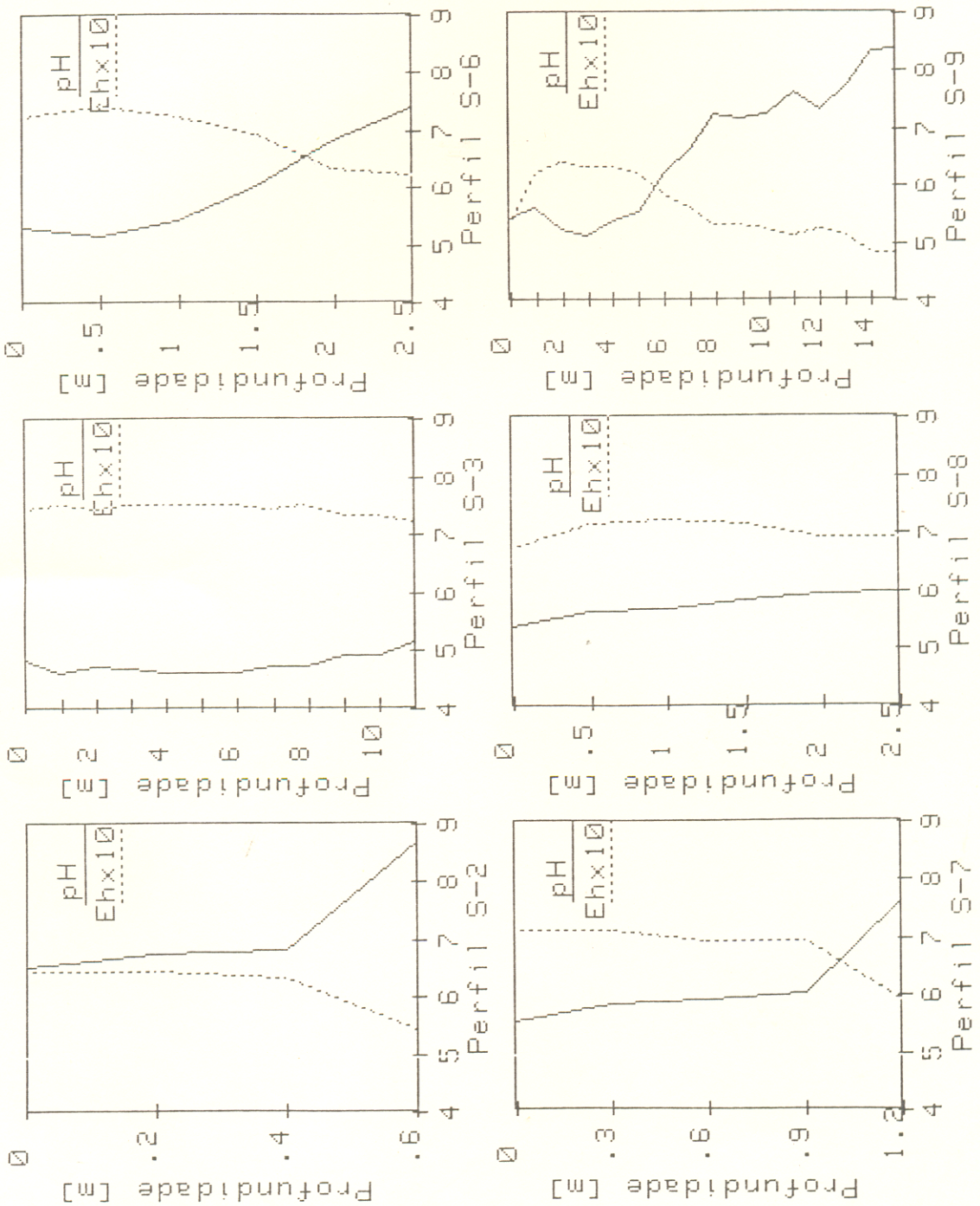


Fig. 16 — Relação entre o pH, Eh e a profundidade dos perfis de alteração

lino, propício à formação de argilo-minerais trifórmicos,o que explica o aparecimento e a preservação da smectita enquanto o pH permanece alcalino ou neutro. Nestas condições se observa, tam - bém, a formação da halloysita.

O fato de existir uma quantidade maior de smectita no perfil S-9, nas mesmas condições de pH dos perfis de clima primeiro úmido, deve-se ao fato de que o perfil S-9 está localizado numa área de clima do tipo subúmido-seco, no qual a capacidade de remoção de cátions é menor. Isto explica também porque a smectita é o argilo-mineral predominante ao longo da maior parte do perfil de alteração.

Nos estágios avançados do intemperismo, quando o ambiente é de natureza ácida, a smectita desaparece completamente, sendo a caolinita e provavelmente a halloysita os únicos argilo-minerais formados.

Na medida em que o intemperismo progride, ocorre o enriquecimento desses minerais no perfil,principalmente da caolinita.

A influência do Eh na formação dos argilo-minerais pode ser apreciada especialmente quando se trata de argilo-minerais que contém elementos polivalentes, principalmente no ferro. A amplitude de oxidação determina a existência ou não de Fe (II), cuja disponibilidade condiciona a formação de argilo-minerais trifórmicos, nos quais o ferro (II) ocupa a posição octaédrica da estrutura do mineral.

7.2 Estudos dos Gradientes de Composição Química nos Processos de Alteração Supergênica

7.2.1 Migração e Concentração dos Elementos Maiores

A composição química das amostras dos diversos perfis de alteração foi dada nas tabelas 04 - 09; a distribuião dos elementos maiores com a profundidade em cada perfil, é mostrada nas figuras 10, 15.

Já nas discussões preliminares apresentadas no capítulo 6 observou-se que, embora esses elementos possam ser divididos em grupos de distribuição genericamente semelhantes, os

comportamentos individuais dos elementos são diferentes entre si.

7.2.1.1 Comportamento do Elemento Alumínio

Os teores de alumínio aumentam de baixo para cima ao longo de cada um dos perfis de alteração, o que significa que o alumínio quase não foi lixiviado durante o intemperismo, fato que também é confirmado pelos baixos teores de alumínio nas amostras de água, coletadas durante as 4 etapas do ano (Tabelas 11 - 14). Isso é devido a que a solubilidade do alumínio em águas, na faixa de pH observada (6 a 7.5), é praticamente nula, (Mason, 1952).

7.2.1.2 Comportamento do Elemento Ferro

A distribuição do ferro, nos perfis em função da profundidade revela um considerável acréscimo de Fe (III) em direção a superfície, enquanto que o Fe (II), sofre substancial perda no mesmo sentido. Este padrão reflete principalmente a transformação de Fe (II) em Fe (III), e não a lixiviação do elemento para fora do perfil, já que as concentrações de ferro nas águas subterrâneas analisadas são muito pequenas (inferiores a 1 ppm).

7.2.1.3 Comportamento dos Elementos Cálcio e Magnésio

De acordo com Golddschmidt (1954), durante o intemperismo químico, o cálcio entra em solução como bicarbonato, e o magnésio na forma de $MgCl_2$ ou $MgSO_4$; outra parte do Mg é transportado mecanicamente em partículas minerais finamente divididas e parcialmente associadas a minerais argilosos de Mg.

A percentagem de óxido de magnésio na rocha fresca é menor que a de óxido de cálcio, mas à medida que o intemperismo ocorre, existe uma gradual diminuição da razão CaO:MgO em todos os perfis pré-caoliníticos, o que significa que o magnésio é retido nos argilo-minerais, provavelmente formando parte das suas estruturas, o que não acontece com o elemento Ca (tabela 17).

A distribuição de cálcio e magnésio nas águas em contato com os basaltos (tabelas 11 - 14) confirma este comporta -

TABELA 17 - Relações de concentração dos elementos alcalinos e alcalino-terrosos, em função da profundidade nos perfis de alteração dos basaltos de Porto Franco-Grajau:MA.

Perfil S- 2

Prof.[m]	CaO:MgO	Ca:Sr	Sr:Ba	Cao:Na2O	Na2O:K2O	K2O:Rb
0.0	1.1	337	0.7	2.6	0.3	211
0.2	1.1	116	1.9	4.2	0.4	233
0.4	1.0	332	0.8	2.9	0.6	306
0.6	1.3	508	2.7	3.8	0.5	315

Perfil S- 3

Prof.[m]	CaO:MgO	Ca:Sr	Sr:Ba	Cao:Na2O	Na2O:K2O	K2O:Rb
0.0	0.3	102	0.1	0.4	2.9	147
1.0	0.1	116	0.1	0.2	2.0	152
2.0	0.1	127	0.1	0.1	4.2	153
3.0	0.2	115	0.0	0.3	3.9	211
4.0	0.1	140	0.0	0.1	1.3	138
5.0	0.2	271	0.1	0.2	3.1	177
6.0	0.3	186	0.1	0.3	2.4	167
7.0	0.1	150	0.2	0.2	1.9	425
8.0	0.1	178	0.2	0.3	0.9	150
9.0	0.2	100	0.2	0.5	1.3	136
10.0	0.2	250	0.1	0.7	1.0	215
11.0	0.2	222	0.1	0.8	1.2	154

Perfil S- 6

Prof.[m]	CaO:MgO	Ca:Sr	Sr:Ba	Cao:Na2O	Na2O:K2O	K2O:Rb
0.0	0.4	181	0.2	0.9	0.6	159
0.5	0.3	155	0.4	0.9	0.6	152
1.0	0.3	175	0.2	1.3	0.7	222
1.5	0.6	225	0.4	2.0	0.7	414
2.0	0.9	311	1.1	3.3	0.4	550
2.5	1.1	312	2.6	3.6	0.4	579

Perfil S- 7

Prof.[m]	CaO:MgO	Ca:Sr	Sr:Ba	Cao:Na2O	Na2O:K2O	K2O:Rb
0.0	0.6	116	0.5	2.2	0.7	215
0.3	0.6	134	0.4	2.1	0.6	211
0.6	0.5	113	0.4	1.5	0.8	353
0.9	0.5	123	0.4	3.0	1.7	377
1.2	1.2	280	3.2	4.1	0.3	523

Continua

Continuação Tabela 17

Perfil S- 8

Prof.[m]	CaO:MgO	Ca:Sr	Sr:Ba	Cao:Na2O	Na2O:K2O	K2O:Rb
0.0	0.1	-1	-1.0	1.7	7.4	228
0.5	0.1	22	0.2	0.7	4.1	288
1.0	0.1	29	0.2	0.6	2.4	313
1.5	0.1	32	0.2	1.1	1.6	228
2.0	0.1	26	0.3	1.2	2.8	297
2.5	0.1	27	0.3	0.7	1.5	356

Perfil S- 9

Prof.[m]	CaO:MgO	Ca:Sr	Sr:Ba	Cao:Na2O	Na2O:K2O	K2O:Rb
0.0	0.1	81	0.3	0.3	0.4	77
1.0	0.1	68	0.6	0.3	0.8	168
2.0	0.0	62	0.2	0.6	1.3	176
3.0	0.1	56	0.2	0.4	1.0	291
4.0	0.1	60	0.1	0.6	2.5	309
5.0	0.1	47	0.6	1.3	4.8	518
6.0	0.1	39	0.8	0.5	1.7	542
7.0	0.1	35	0.6	0.3	1.0	500
8.0	0.4	169	0.9	1.7	0.8	611
9.0	0.6	241	0.6	1.8	0.7	562
10.0	0.5	204	1.8	2.5	1.0	600
11.0	0.6	210	1.9	2.3	0.8	541
12.0	0.5	111	3.6	2.1	0.7	478
13.0	0.8	125	6.7	2.5	0.3	410
14.0	0.6	185	2.1	1.8	0.6	508
15.0	0.7	204	1.4	1.4	0.4	505

mento. Em todas as amostras, coletadas nas diferentes épocas do ano, o conteúdo de Ca é sempre maior que a do Mg, o que indica que o primeiro foi mais rapidamente lixiviado, já que a única fonte para esses elementos na área é o próprio basalto.

Por outro lado, as tabelas 11 - 14 mostram que o conteúdo de cálcio em todas as amostras de água, é várias vezes superior ao do sódio, o que reflete o fato de que os minerais da série dos plagioclásios presentes estão, em termos composicionais, mais próximos da anortita do que o da albita.

7.2.1.4 Comportamento dos Elementos Sódio e Potássio

Estes elementos são muito solúveis em água e portanto facilmente liberados em solução durante os processos de intemperismo.

A análise química do basalto fresco revela um conteúdo de potássio ligeiramente superior ao do sódio, mas a análise química destes elementos em águas superficiais e subterrâneas (tabelas 11 - 14), mostram que a concentração de potássio é menor que a do sódio, o que significa que o potássio fica retido na zona de intemperismo formando parte da estrutura dos argilo-minerais ou sendo absorvido por estes.

A análise da tabela 17 mostra, porém, comportamentos fortemente variáveis nas relações Na:K nos diversos perfis de alteração, o que significa que o potássio é retido quando ocorre a formação de ilita no perfil ou outro argilo-mineral capaz de adsorvê-lo.

7.2.1.5 Comportamento do Elemento Titânio

Este elemento, na forma de seu principal óxido, TiO_2 (anatásio e rutilo), é completamente insolúvel, pelo que durante o intemperismo permanece longamente nos resistatos. Assim sendo, o titânio mostra uma leve tendência de aumentar no sentido da superfície em todos os perfis de alteração.

7.2.1.6 Comportamento do Elemento Manganês

Nos estágios iniciais do intemperismo, existe uma

tendência de aumentar seu conteúdo em direção à superfície, mas quando a alteração é muito avançada, este elemento é carregado em solução.

7.2.1.7 Comportamento do Elemento Fósforo

De acordo com Rankama e Sahama (1950) as soluções intempéricas contém fosfatos alcalinos em solução e fosfatos de cálcio coloidal ou dissolvido. O fosfato de cálcio é solúvel em águas que contém CO_2 ou que são ricas em materia orgânica. Uma considerável parte do fósforo é retido nos registros na forma de apatita insolúvel, monazita ou ainda, pelo menos em parte, na estrutura dos argilo-minerais silicatados.

Nos estágios avançados do intemperismo (horizonte B do perfil S-3), existe uma leve tendência de enriquecimento do fósforo, enquanto que em todos os perfis restantes observa-se uma perda gradual e constante do elemento. Isto indica que enquanto existem elementos alcalinos, formam-se fosfatos solúveis, concentrando-se o fósforo nos perfis somente após a maior parte desses elementos metálicos ter sido lixiviado.

7.2.1.8 Perda ao Fogo

Estão compreendidos neste item água, CO_2, OH^- etc cujos conteúdos aumentam no sentido da superfície em todos os perfis de alteração, indicando que estes novos componentes, notadamente atmosféricos, são incorporados na estrutura dos novos minerais na media que o intemperismo progrida. Quanto mais alterado é o produto, mais expressiva e a presença desses componentes.

7.2.2 Migração e Concentração dos Elementos Traços na Zona de Alteração Supergênica

Os 12 elementos traços que foram determinados têm comportamentos variados na zona de alteração, dependendo em grande parte do estágio em que se encontra o processo de intemperismo e portanto, de natureza dos argilo-minerais formados. De algum modo o comportamento dos elementos traços também está ligado

à quantidade relativa dos elementos maiores presentes na zona . Um fato importante no condicionamento da distribuição dos ele - mentos em ambientes aquosos é, como acentuou Goldschmidt (1954) o potencial iônico.

$$\emptyset = z / r$$

onde:

$\emptyset$ = potencial iônico
z = carga iônica
r = raio iônico

O potencial iônico é muito significativo em todos os processos formadores de minerais em um meio aquoso. Ele forne ce uma explicação para o comportamento semelhante, de elementos dessemelhantes, como é o caso do alumínio trivalente e do titâ - nio quadrivalente, que ficam retidos na zona intempérica, enquan to que os elementos com potencial iônico baixo, tais como o só- dio, o cálcio, o magnésio, o potássio, o ferro (II) etc. entram em solução, também em forma diferenciada.

Goldschmidt (1954), dividiu os elementos, conside- rando seus potenciais iônicos, em três grupos: (Fig. 17).

Grupo I - Metais com baixo potencial iônico, facilmente car- regados em solução, embora possam também ser adsor vidos pelos argilo-minerais.

Grupo II - Elementos com potencial iônico intermediário, pre- cipitados por hidrólise, seus ions estando associa dos com os grupos hidroxila provenientes das solu- ções aquosas.

Grupo III - Elementos com potenciais iônicos ainda mais eleva- dos, que formam ânions complexos contendo oxigênio, os quais, usualmente, são de novo solúveis.

Quando se assinalam os elementos em um diagrama com o raio iônico indicado no eixo das ordenadas e a carga iôni- ca positiva no eixo das abscissas, o campo pode assim, ser divi- dido em três partes (Figura 17): cátions solúveis, elementos dos hidrolisatos e elementos dos ânions complexos solúveis.

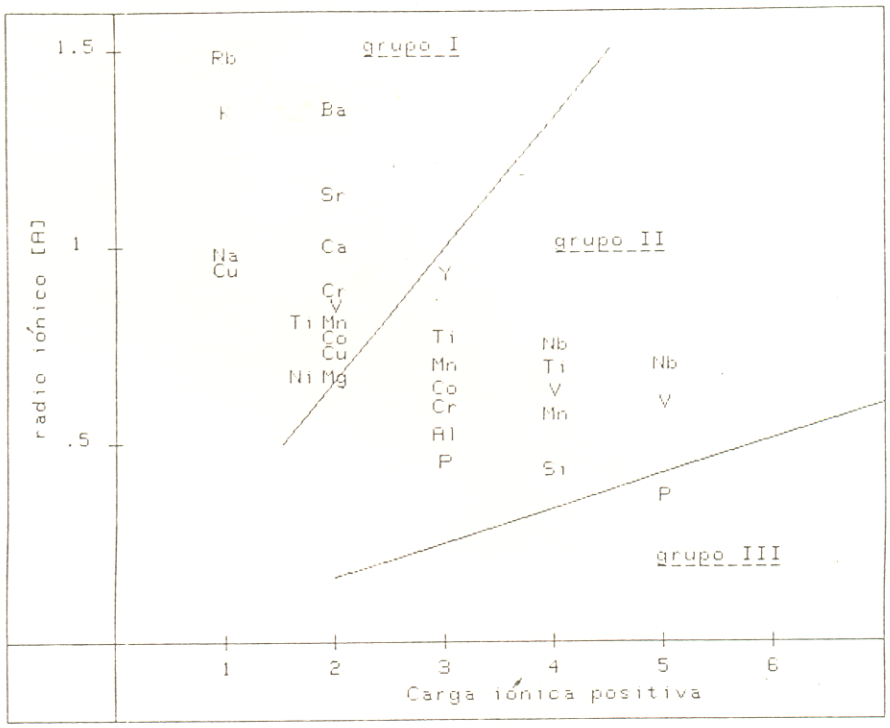


Fig. 17 — Separação geoquímica dos elementos analisados, com base em seu potencial ionico.

O comportamento dos elementos ao longo dos perfis de alteração e sua relação com o potencial iônico e com outros fatores condicionantes serão discutidos a seguir, de acordo com os três grupos identificados.

Elementos do grupo I: Segundo a tabela 17, nos perfis onde ainda não existe predominância de caolinita, a distribuição dos elementos alcalinos e alcalino-terrosos está perfeitamente controlada pelos seus respectivos valores de potencial iônico; assim, o Rb é retido na zona intempérica preferencialmente ao potássio, e este, por sua vez preferencialmente ao sódio; da mesma forma, em direção à superfície, a ordem de retenção nos perfis é, claramente, Ba > Sr > Ca >Mg, o que significa que o bário é adsorvido nos hidrosilicatos mais fortemente que os restantes elementos assinalados; a solubilidade do magnésio é muito crítica por ele se encontrar no limite que determina a faixa de comportamento correspondente ao grupo I.

O ferro no estado ferroso pode ser transportado em solução (z/r = 2.7), mas tal acontece apenas em pequena escala, em vista do ambiente fortemente oxidante, que transforma este elemento ao estado férrico, o qual apresenta um potencial iônico muito mais alto (z/r = 4.7), localizado no campo dos hidrolisatos.

Elementos do grupo II: Segundo o critério de Goldschmidt (1954) de separação dos elementos concetrar-se-ão "in situ" todos aqueles elementos que tem seus potenciais iônicos localizados no campo II da figura 17.

Junto com os elementos residuais por excelência, como Al, Ti e Fe (III), localizam-se no campo II também o Y e Zr. Estes elementos mostram clara tendência de concentração em todos os perfis estudados.

Semelhantemente, o manganês é retido na zona de intemperismo enquanto as condições são favoráveis à sua existência na forma hidratada quadrivalente (z/r = 6.7), sendo dissolvido quando está na forma divalente (z/r = 2.5).

O comportamento do vanádio depende também em grande parte do potencial de oxirredução do ambiente. No estado de +3 e +4 o vanádio tem um comportamento essencialmente de hidrosi

licato. No entanto se o ambiente é muito oxidante, o vánadio passa ao campo III dos ions complexos, podendo desta maneira, ser removido em solução. O leve enriquecimento deste elemento observado nos perfis estudados indica que, embora o ambiente, seja muito oxidante, não o é ainda a ponto de oxidar o vanádio a seu estado mais elevado (V).

Elementos do grupo III: Embora o fósforo pertença ao grupo III, só em alguns perfis nota-se para o fosforo o comportamento característico desse grupo, no que diz respeito à sua remoção em solução. Nos outros perfis o comportamento do fósforo é muito irregular, devido, provavelmente, à formação temporária de compostos insolúveis como fósforo de cálcio ou de alumínio. A pequena quantidade de fósforo nos perfis não permite, porém, comprovar a existência de qualquer mineral de fósforo, nas amostras estudadas.

7.2.3 Cálculo de Ganhos e Perdas Durante o Intemperismo

As figuras 10-15 que mostram a distribuição dos elementos nos perfis em função da profundidade, revelam que a concentração de alguns constituintes é reduzida à medida que , partindo-se da base, aproxima-se do topo dos perfis. Isto ocorre rapidamente com os elementos alcalinos, alcalino-terrosos e o ferro (II), e mais lentamente para a sílica. Simultaneamente nota-se um gradual e constante incremento, no mesmo sentido, dos teores dos elementos Fe (III), Al e Ti e, em determinadas partes do perfil, do manganês e do fósforo. A simples análise dessas figuras não permite determinar, porém, com precisão a ordem de rapidez com que os elementos são lixiviados, pois este comportamento varia de um perfil para outro, embora o tipo de material original seja semelhante. Isso significa, em outras palavras,que a maior ou menor facilidade com que um elemento é removido do perfil depende não apenas de rocha-mãe, mas também do clima e do estágio em que se encontra o processo de intemperismo.

Mais díficil ainda é determinar quantitativamente a perda de cada constituinte, principalmente naqueles perfis onde a amostra mais profunda não é precisamente o basalto fresco, o que dificulta a comparação da rocha fresca e da rocha alterada . Porém, mesmo quando no perfil ocorre a rocha-mãe inalterada, es-

sa comparação não pode ser feita diretamente, pois os resultados das análises químicas são referidos a amostras específicas, cuja interrelação em termos composicionais não é conhecida a priori . É necessário, portanto, empregar-se um "padrão interno", cuja quantidade seja constante em todas as amostras, se se quiser, a partir deles, estabelecer comparações de perdas e ganhos para os outros elementos.

Seguindo-se a metodologia adotada por Krauskopf (1967) verifica-se que a alumina é o padrão interno apropriado para o cálculo de perdas e ganhos de elementos durante o intemperismo dos basaltos da região de Porto Franco-Grajaú. Isso porque a alumina é lixiviada em escala insignificante, como comprovam os baixos teores de alumínio, na ordem de ppb, nas águas superfíciais e subterrâneas da área (tabelas 11-14), quando comparados com a grande quantidade de alumínio originalmente existente no basalto fresco. A íntima lixiviação do alumínio reflete-se no forte aumento relativo de suas concentrações nos perfis, à medida que o intemperismo é intensificado.

Os cálculos de perdas e ganhos foram feitos, portanto, segundo a metodologia proposta por Krauskopf (1967) e adotando-se o Al_2O_3 como constante. A amostra mais profunda de cada perfil, embora nem sempre corresponda ao basalto fresco, foi tomada como o material original, o qual é submetida a ulterior alteração ao longo do perfil.

Os resultados dos cálculos efetuados são apresentados nas tabelas 18 a 23. Os percentuais deperda ou ganho para cada elemento são apresentados graficamente em cada perfil nas figuras 18 a 23. A observação dessas figuras leva as seguintes conclusões:

1. Os valores percentuais negativos para a sílica refletem o processo de dessilificação constante ao longo de todos os perfis de alteração. As perdas mais intensas são registradas nas proximidades do basalto fresco. A proporção de perda é menor quando o argilo-mineral predominante é a caolinita.

2. Sendo o alumínio o elemento base de referência para os cálculos, a representação gráfica de seus ganhos ou perdas é uma linha paralela ao eixo das ordenadas, o mesmo que representa a profundidade.

TABELA 18 - Calculo do aumento ou diminuicao percentual de cada constituinte, para amostras do perfil S - 2 , considerando o Al203 como constante, segundo o metodo de Krauskopf (1967).

Prof.	Si02	Al203	Fe203	FeO	MgO	CaO	Na20	K20	Ti02	P205	Mn02
0.0	-45.5	0.0	461.8	-74.8	-74.5	-78.9	-68.9	-78.3	53.2	-30.3	51.2
0.2	-39.5	0.0	426.9	-72.6	-60.2	-67.0	-70.1	-76.9	27.4	-34.6	64.8
0.4	-33.1	0.0	168.1	-62.1	-46.9	-59.7	-46.9	-38.5	6.9	-23.7	3.0
0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Prof.	Rb	Y	Nb	Co	Ni	Zn	V	Cu	Zr	Cr	Sr	Ba
0.0	-60.6	9.3	14.7	27.7	-20.2	-0.2	4.7	52.9	23.3	-40.6	-60.2	22.6
0.2	-60.5	1.7	0.2	43.5	-0.6	-0.8	14.7	35.3	2.3	-10.4	44.9	106.7
0.4	-30.7	-0.8	-10.3	11.6	-0.9	-10.8	-0.5	-0.0	-0.9	-10.6	-30.5	111.3
0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABELA 19 - Calculo do aumento ou diminuicao percentual de cada constituinte, para amostras do perfil S - 3 , considerando o Al203 como constante, segundo o metodo de Krauskopf (1967).

Prof.	Si02	Al203	Fe203	FeO	MgO	CaO	Na20	K20	Ti02	P205	Mn02
0.0	-48.1	0.0	-3.1	-3.7	-78.9	-66.5	-32.6	-72.1	-16.5	-51.6	-20.4
1.0	-25.7	0.0	-3.3	181.2	-73.1	-83.1	-22.4	-53.8	-13.8	-38.7	-34.9
2.0	-32.0	0.0	-10.0	58.2	-77.2	-84.5	11.6	-68.0	-16.5	-43.0	-.5
3.0	-27.4	0.0	-13.2	30.2	-75.9	-72.1	-17.0	-74.4	-19.9	-6.8	-4.4
4.0	-34.5	0.0	-5.4	80.3	-75.8	-84.3	-4.1	-13.0	-27.9	-53.4	-17.3
5.0	-30.5	0.0	-6.6	-8.0	-72.8	-76.9	12.4	-56.5	-9.2	-56.3	10.7
6.0	-30.1	0.0	-3.7	1.5	-74.0	-66.5	-20.2	-60.3	-9.8	-47.1	-10.9
7.0	-48.3	0.0	-9.1	-.5	-62.6	-75.8	-3.3	-39.0	-33.7	-40.8	7.8
8.0	-29.4	0.0	-7.6	-6.8	-44.8	-73.0	-26.0	0.5	-21.7	-61.5	-14.5
9.0	-17.0	0.0	2.1	-32.3	-39.8	-45.0	-.0	-5.9	2.8	-68.5	7.8
10.0	-8.7	0.0	-3.0	-13.9	-1.6	-5.9	12.4	33.9	-11.5	-42.8	1.5
11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Prof.	Rb	Y	Nb	Co	Ni	Zn	V	Cu	Zr	Cr	Sr	Ba
0.0	-70.5	-70.2	-10.2	-10.2	-10.7	-60.2	22.0	-40.2	-0.1	-10.0	-80.6	-80.8
1.0	-60.5	-80.1	-10.6	-20.9	-40.3	-80.9	37.9	-70.9	-0.9	-60.3	-90.1	-80.7
2.0	-60.4	-70.2	-10.0	-0.2	-50.4	-80.5	5.4	-50.1	-0.1	-30.6	-80.2	-80.1
3.0	-70.0	-70.4	-20.9	-30.6	-40.0	-80.0	6.8	-60.1	-10.9	-20.7	-80.0	-80.9
4.0	-60.9	-70.2	-10.8	0.6	-10.5	-60.4	24.7	-40.2	-0.5	-90.7	-80.3	-90.4
5.0	-60.7	-70.5	-10.1	19.9	-20.1	-60.9	18.1	-50.6	0.1	-40.8	-80.3	-70.6
6.0	-60.0	-70.3	-0.6	-10.9	-50.1	-70.0	8.3	-50.1	-0.7	-40.0	-80.4	-80.0
7.0	-30.3	-70.0	-10.4	31.6	28.6	-70.0	-30.1	-20.6	-0.1	-20.8	-80.3	-20.5
8.0	-30.1	-60.0	-10.1	16.0	0.2	-60.2	-40.8	-30.6	-0.2	-20.5	-70.1	8.6
9.0	-0.7	-50.0	-20.8	1.7	-20.1	-70.4	15.4	-30.0	4.1	-10.5	-50.9	-10.6
10.0	29.1	11.3	-0.6	-0.0	35.3	-0.5	9.3	3.7	-0.2	-40.7	-10.9	-10.1
11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABELA 20 - Calculo do aumento ou diminuicao percentual de cada constituinte, para amostras do perfil S - 6 , considerando o Al2O3 como constante, segundo o metodo de Krauskopf (1967).

Prof.	SiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	MnO2
0.0	-51.0	0.0	85.1	-89.8	-86.4	-95.6	-82.2	-72.5	-5.9	-62.8	-19.6
0.5	-49.0	0.0	95.4	-95.7	-85.4	-95.8	-83.8	-71.3	-6.0	-72.4	-23.2
1.0	-40.4	0.0	92.3	-86.4	-78.3	-93.9	-82.3	-64.2	-.4	-75.8	10.7
1.5	-28.3	0.0	81.2	-81.8	-55.3	-74.2	-53.9	-14.1	3.0	-46.7	-7.4
2.0	-2.5	0.0	29.3	-23.5	-2.7	-16.8	-9.0	-6.2	3.0	-9.5	3.9
2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Prof.	Rb	Y	Nb	Co	Ni	Zn	V	Cu	Zr	Cr	Sr	Ba
0.0	0.1	-70.8	-30.3	-20.5	3.1	-20.6	-0.3	8.8	-10.4	-20.3	-90.3	-10.1
0.5	9.0	-70.8	-30.7	-10.7	-0.5	-20.4	-10.8	3.7	-10.5	-10.3	-90.5	-40.8
1.0	-0.8	-60.5	-30.6	6.2	-0.5	-20.1	-20.8	1.4	-10.7	-0.8	-80.1	49.2
1.5	20.0	-20.8	-30.3	-10.7	7.4	-0.7	-10.3	8.0	-10.1	-0.4	-60.2	118.3
2.0	-0.3	-50.7	-0.3	5.6	6.5	3.0	4.7	6.4	1.3	33.3	-10.5	100.3
2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABELA 21 - Calculo do aumento ou diminuicao percentual de cada constituinte, para amostras do perfil S - 7 , considerando o Al203 como constante, segundo o metodo de Krauskopf (1967).

Prof.	Si02	Al203	Fe203	FeO	MgO	CaO	Na20	K20	Ti02	P205	Mn02
0.0	-53.1	0.0	229.1	-92.6	-81.1	-90.8	-82.5	-59.1	9.1	-55.2	-12.7
0.3	-54.6	0.0	196.1	-89.8	-82.9	-92.1	-84.6	-65.6	3.9	-57.4	-20.0
0.6	-47.6	0.0	199.3	-94.1	-86.0	-93.8	-83.5	-50.3	4.8	-70.6	-13.9
0.9	-47.7	0.0	198.2	-92.5	-82.6	-92.4	-89.5	-34.2	5.7	-49.4	-11.2
1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Prof.	Rb	Y	Nb	Co	Ni	Zn	V	Cu	Zr	Cr	Sr	Ba
0.0	0.5	-70.6	-30.4	-10.4	-10.8	-40.1	-30.0	9.9	-10.9	-30.6	-70.8	28.7
0.3	-10.8	-60.9	-40.3	-10.5	-0.3	-30.6	-30.8	10.8	-10.8	-20.7	-80.6	44.3
0.6	-20.4	-70.6	-40.2	-10.9	-0.1	-30.2	-30.2	13.9	-10.9	-20.8	-80.6	27.0
0.9	-0.9	-50.6	-40.5	-0.1	-0.7	-20.3	-30.1	-10.2	-10.2	-30.9	-80.6	22.9
1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABELA 22 - Calculo do aumento ou diminuicao percentual de cada constituinte, para amostras do perfil S - 8 , considerando o Al203 como constante, segundo o metodo de Krauskopf (1967).

Prof.	SiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	MnO2
0.0	-7.6	0.0	4.3	-59.5	-35.2	-62.2	-84.4	-24.7	4.9	-51.8	-26.5
0.5	-14.8	0.0	13.6	-32.7	-26.8	-57.8	-57.1	15.6	22.3	86.9	24.6
1.0	-17.0	0.0	-1.5	-39.4	-28.3	-54.6	-50.6	-24.2	-8.5	-10.9	-10.9
1.5	-4.9	0.0	0.2	-27.4	-1.3	-14.9	-44.1	-41.6	0.2	0.9	-8.7
2.0	-5.0	0.0	1.6	-76.4	-14.8	-17.2	-52.2	-13.0	-1.1	-1.8	-1.8
2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Prof.	Rb	Y	Nb	Co	Ni	Zn	V	Cu	Zr	Cr	Sr	Ba
0.0	17.5	6.3	25.4	-0.6	-0.6	-0.1	30.1	32.1	30.4	-10.3	-40.2	-60.1
0.5	43.1	25.9	49.6	24.6	61.7	8.8	23.9	39.8	27.9	-20.1	-40.8	-20.9
1.0	-10.6	1.9	-10.9	-0.4	2.5	-0.4	5.0	-0.2	-0.6	-10.2	-50.3	-40.8
1.5	-0.6	37.9	-0.2	-0.3	0.9	2.5	5.6	-30.5	-0.9	-10.7	-20.6	-10.2
2.0	4.3	4.2	-0.8	-0.9	4.1	7.0	1.2	-20.6	2.2	-10.4	-10.4	-10.2
2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABELA 23 - Calculo do aumento ou diminuicao percentual de cada constituinte, para amostras do perfil S - 9 , considerando o Al203 como constante, segundo o metodo de Krauskopf (1967).

Prof.	Si02	Al203	Fe203	FeO	MgO	CaO	Na20	K20	Ti02	P205	Mn02
0.0	-41.0	0.0	15.1	-53.2	-76.8	-98.4	-92.4	-93.2	2.1	-91.4	-56.8
1.0	-42.1	0.0	11.6	-81.3	-73.0	-98.1	-90.2	-83.0	-3.4	-91.3	-60.9
2.0	-44.2	0.0	8.6	-91.2	-60.3	-97.8	-95.3	-85.4	-6.5	-91.5	-28.2
3.0	-39.9	0.0	8.6	-90.7	-61.4	-97.1	-88.1	-73.3	-5.5	-91.0	25.4
4.0	-30.3	0.0	8.1	-78.6	-61.9	-95.8	-89.6	-39.7	-.0	-90.0	143.9
5.0	-27.1	0.0	12.4	-55.5	-52.9	-94.4	-93.8	-30.3	4.3	-89.7	34.2
6.0	-28.2	0.0	8.7	-66.3	-53.5	-94.3	-82.4	-32.2	-3.0	-89.7	-17.5
7.0	-26.4	0.0	11.0	-77.9	-53.1	-93.9	-73.0	-37.8	-.2	-89.7	-7.6
8.0	-14.5	0.0	4.8	-26.4	-27.7	-60.7	-66.5	-41.0	4.7	-88.5	21.0
9.0	-11.5	0.0	1.2	1.3	-22.2	-36.1	-50.5	-25.4	6.3	-58.5	48.3
10.0	-13.9	0.0	3.0	0.2	-15.6	-38.0	-65.2	-18.0	-2.3	-47.2	46.6
11.0	-8.1	0.0	-1.8	4.1	-7.5	-25.3	-53.2	-10.1	2.4	-38.5	78.2
12.0	-11.9	0.0	0.3	1.8	0.2	-31.3	-52.7	-28.4	4.5	-40.4	60.9
13.0	-7.7	0.0	-2.5	75.8	-.9	11.5	-36.7	-53.8	15.7	-10.9	59.1
14.0	-9.1	0.0	-3.4	18.7	10.7	2.5	-20.9	8.6	-1.5	5.4	24.0
15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Continua

Continuação Tabela 23

Prof.	Rb	Y	Nb	Co	Ni	Zn	V	Cu	Zr	Cr	Sr	Ba
0.0	-50.5	-60.6	-20.4	-30.8	-30.8	-30.5	-30.2	-0.0	-0.4	-20.4	-90.0	-80.0
1.0	-40.1	-40.2	-30.9	-60.1	-30.5	-30.8	-40.9	-20.2	-10.1	-30.9	-90.5	-80.4
2.0	-50.4	-30.9	-40.2	-40.5	-20.6	8.4	-40.6	1.1	-20.3	-30.7	-90.9	-40.9
3.0	-50.8	-30.8	-40.0	71.9	9.5	-0.3	-40.0	-10.5	-20.0	-10.8	-80.4	-40.2
4.0	-0.0	-0.1	-30.6	61.5	15.7	5.0	-10.9	17.8	-10.2	31.0	-80.6	48.9
5.0	-30.3	-0.1	-30.5	15.2	-0.6	14.3	-30.6	0.1	-10.4	36.5	-70.1	-0.1
6.0	-30.1	-20.4	-40.4	-20.4	-10.1	0.1	-40.0	-0.3	-20.0	-10.2	-70.4	0.5
7.0	-30.4	-20.0	-40.2	0.3	-10.7	2.1	-40.3	-0.1	-10.0	17.2	-60.6	-20.8
8.0	-50.4	84.1	-20.0	-0.6	-10.0	-0.5	-40.9	-10.4	-0.0	30.5	-50.6	-20.4
9.0	-30.3	-0.2	-30.3	-0.8	-0.5	11.7	-30.4	-0.1	-0.4	76.2	-40.1	18.3
10.0	-30.3	-50.3	-40.7	-10.0	-0.4	6.4	-20.0	19.8	-10.3	33.2	-30.2	-50.9
11.0	-10.4	-40.9	-30.9	2.9	-10.3	14.7	-10.2	-0.8	-10.6	29.6	-20.4	-40.9
12.0	-20.6	-30.8	-20.5	0.2	-0.7	0.8	-30.0	-10.5	-0.9	0.6	26.7	-50.3
13.0	-40.3	3.8	-0.5	0.1	-0.6	8.8	-0.5	8.6	-0.2	25.7	81.3	-60.0
14.0	7.5	17.2	0.7	-0.9	-0.2	3.8	-20.3	61.9	-0.2	31.1	13.1	-20.5
15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

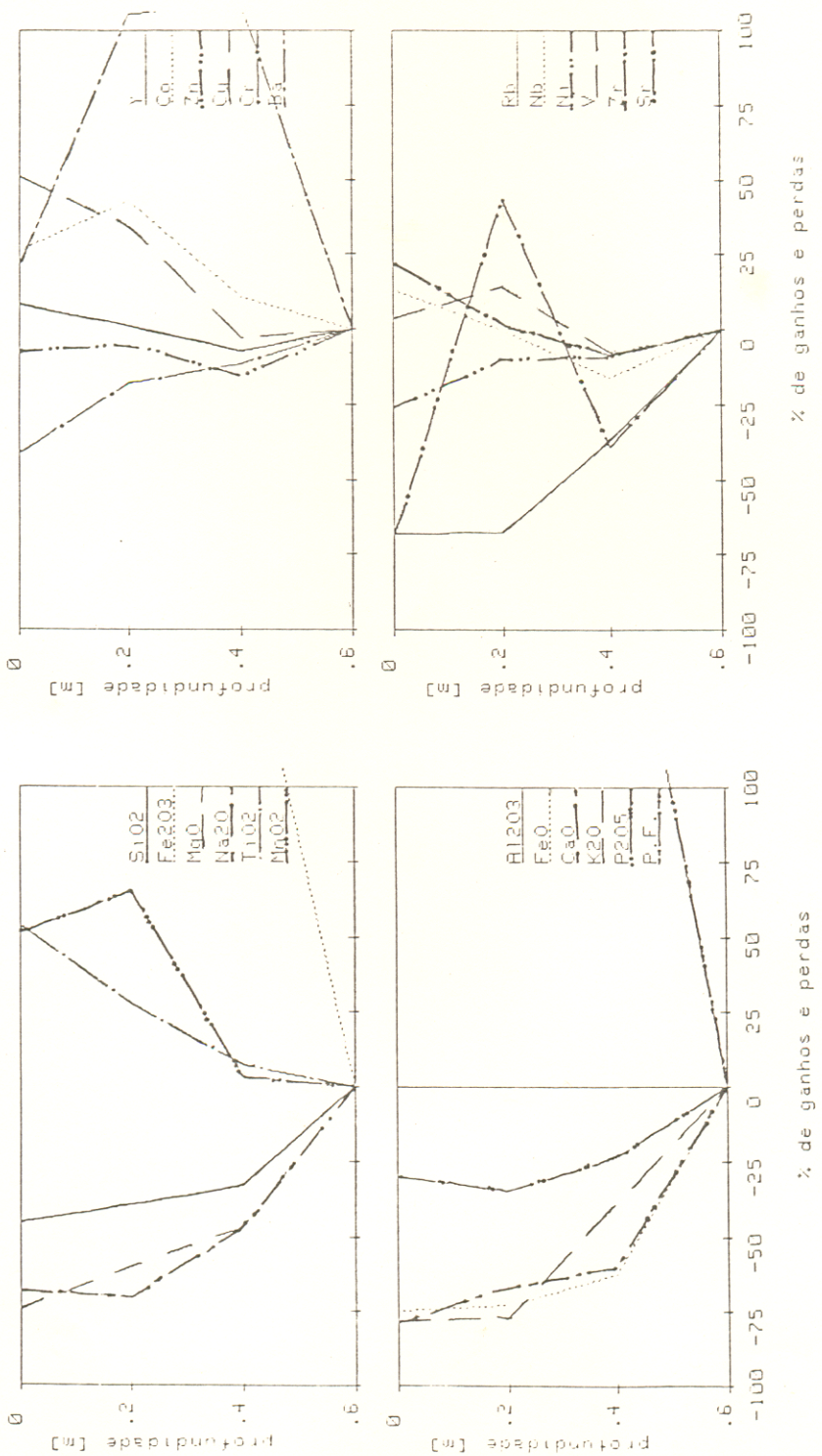


Fig. 18 — Representação gráfica das perdas e ganhos, em percentagem, dos constituintes químicos ao longo do Perfil S — 2

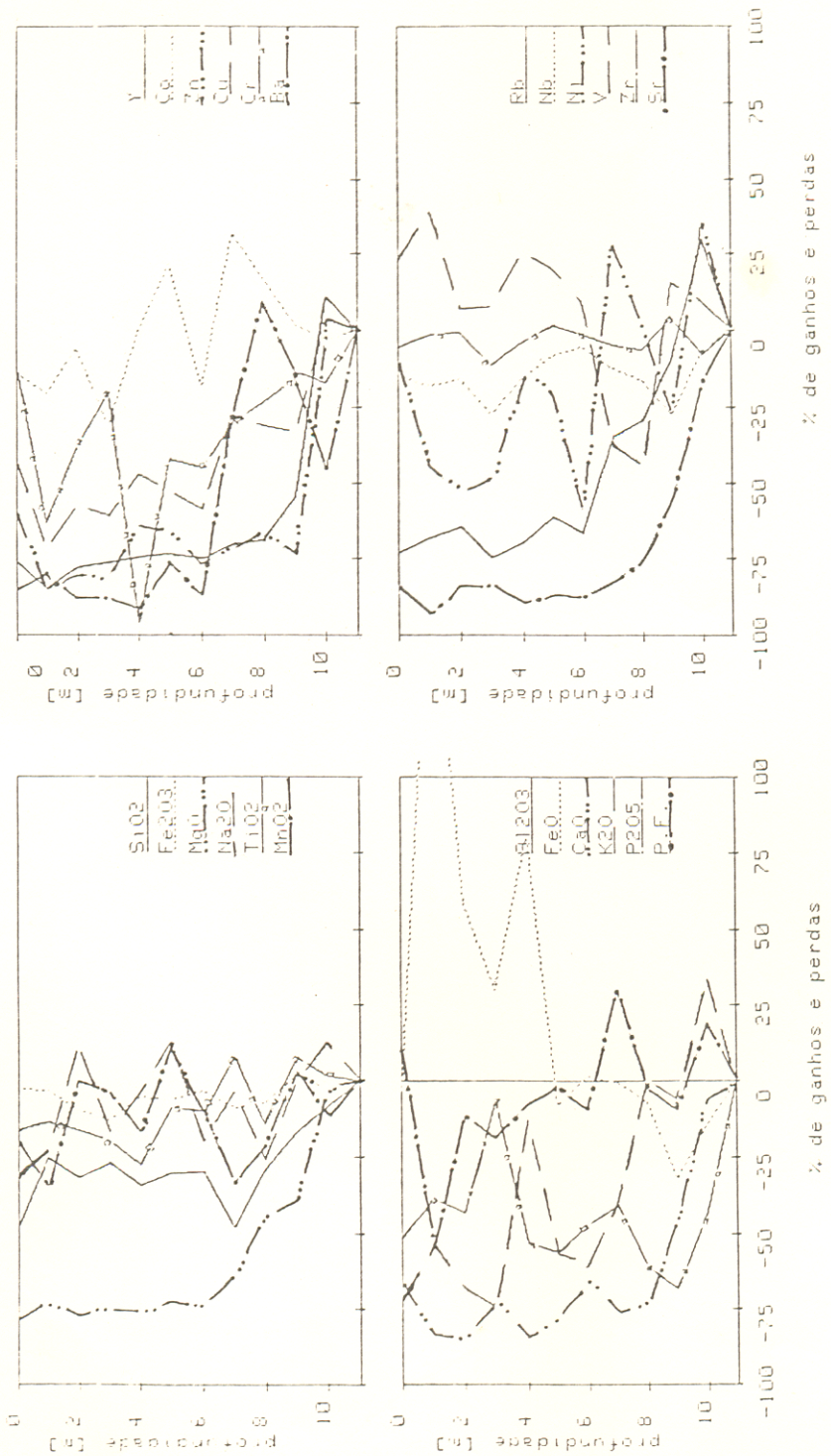


Fig. 19 — Representação gráfica das perdas e ganhos, em percentagem, dos constituintes químicos ao longo do Perfil S — 3.

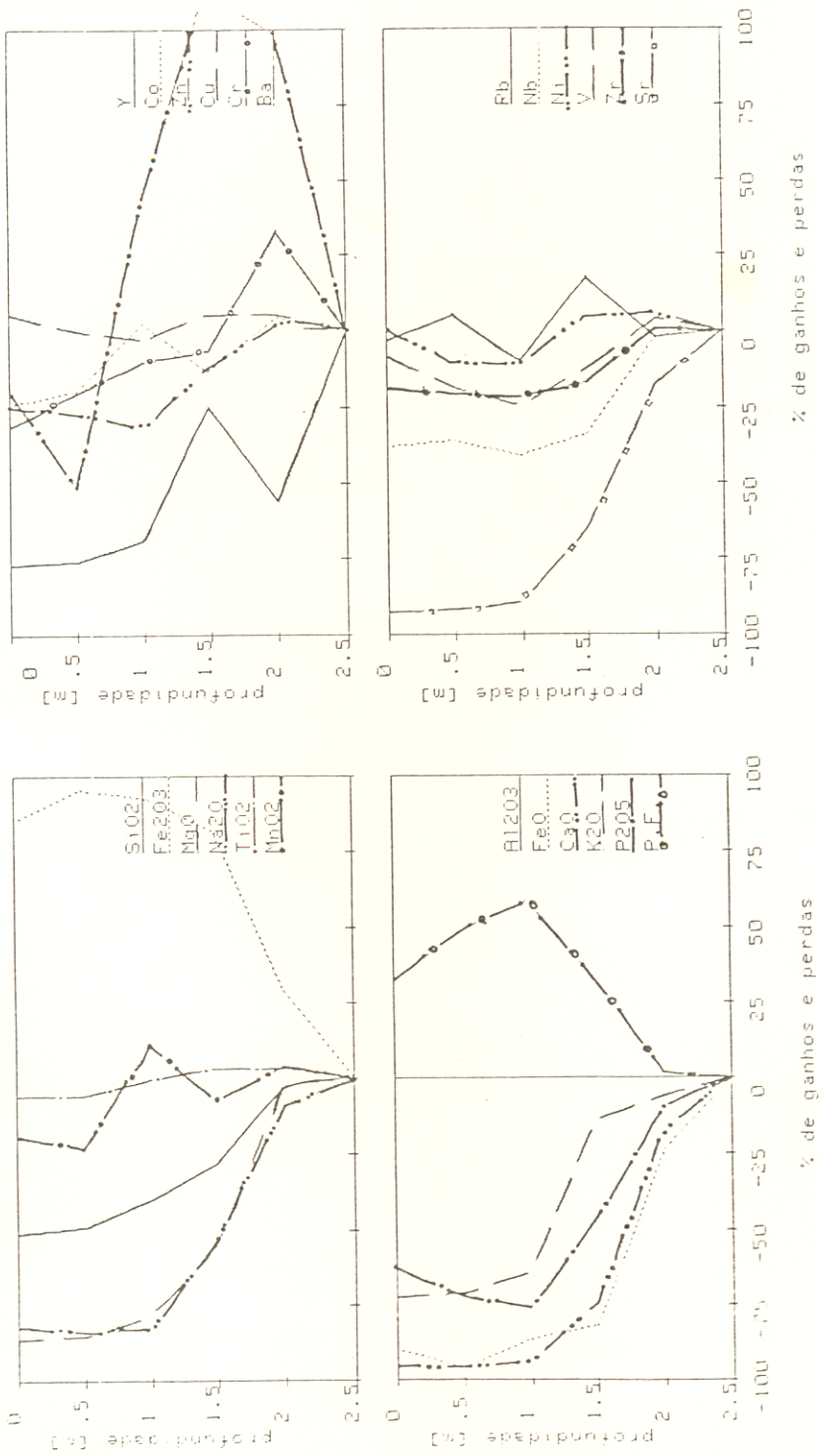


Fig. 20 — Representação gráfica das perdas e ganhos, em percentagem, dos constituintes químicos ao longo do Perfil S-6

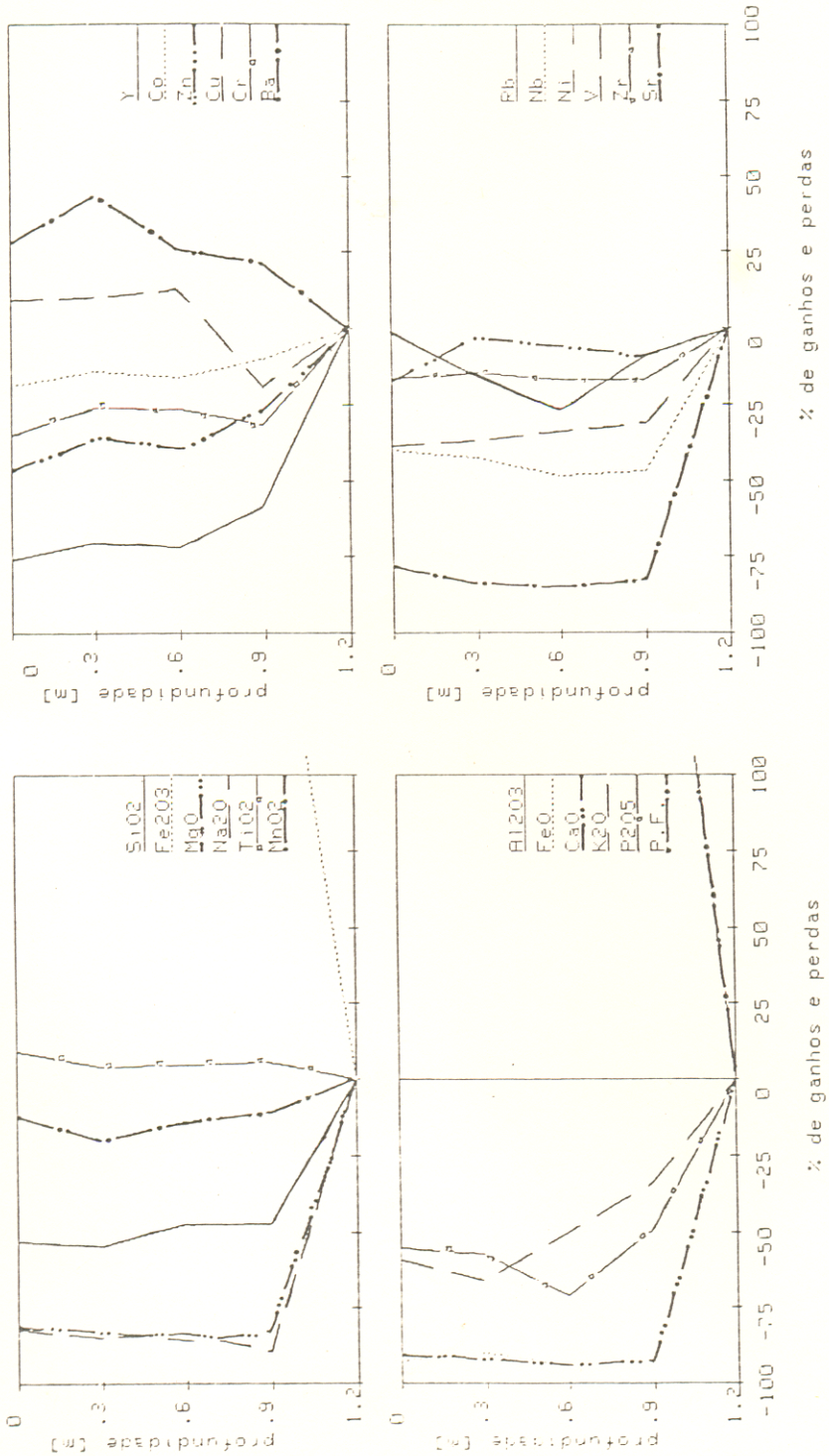


Fig. 21 — Representação gráfica das perdas e ganhos, em percentagem, dos constituintes químicos ao longo do Perfil S-7.

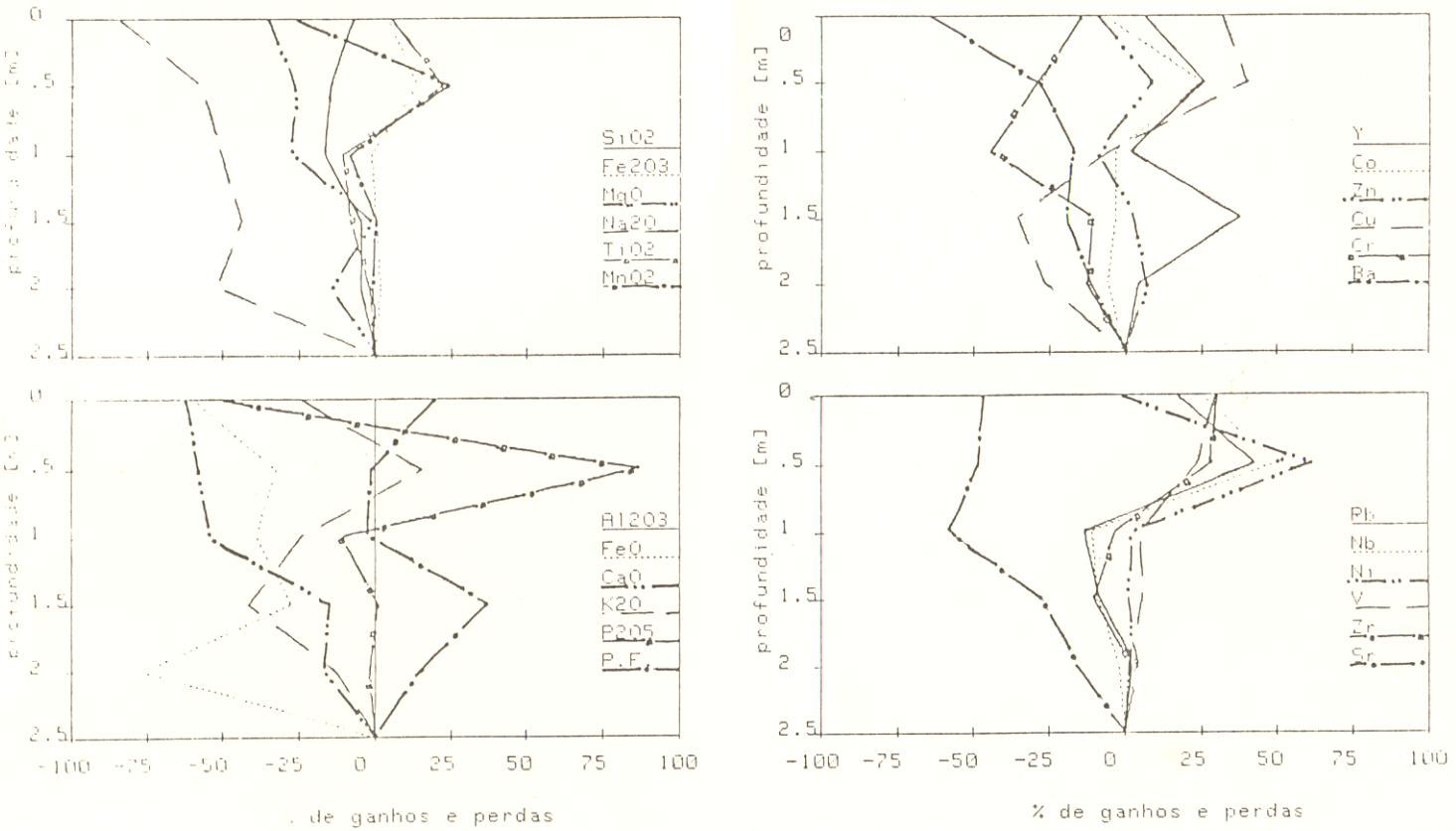


Fig. 22— Representação gráfica das perdas e ganhos, em percentagem, dos constituintes químicos ao longo do Perfil S—8.

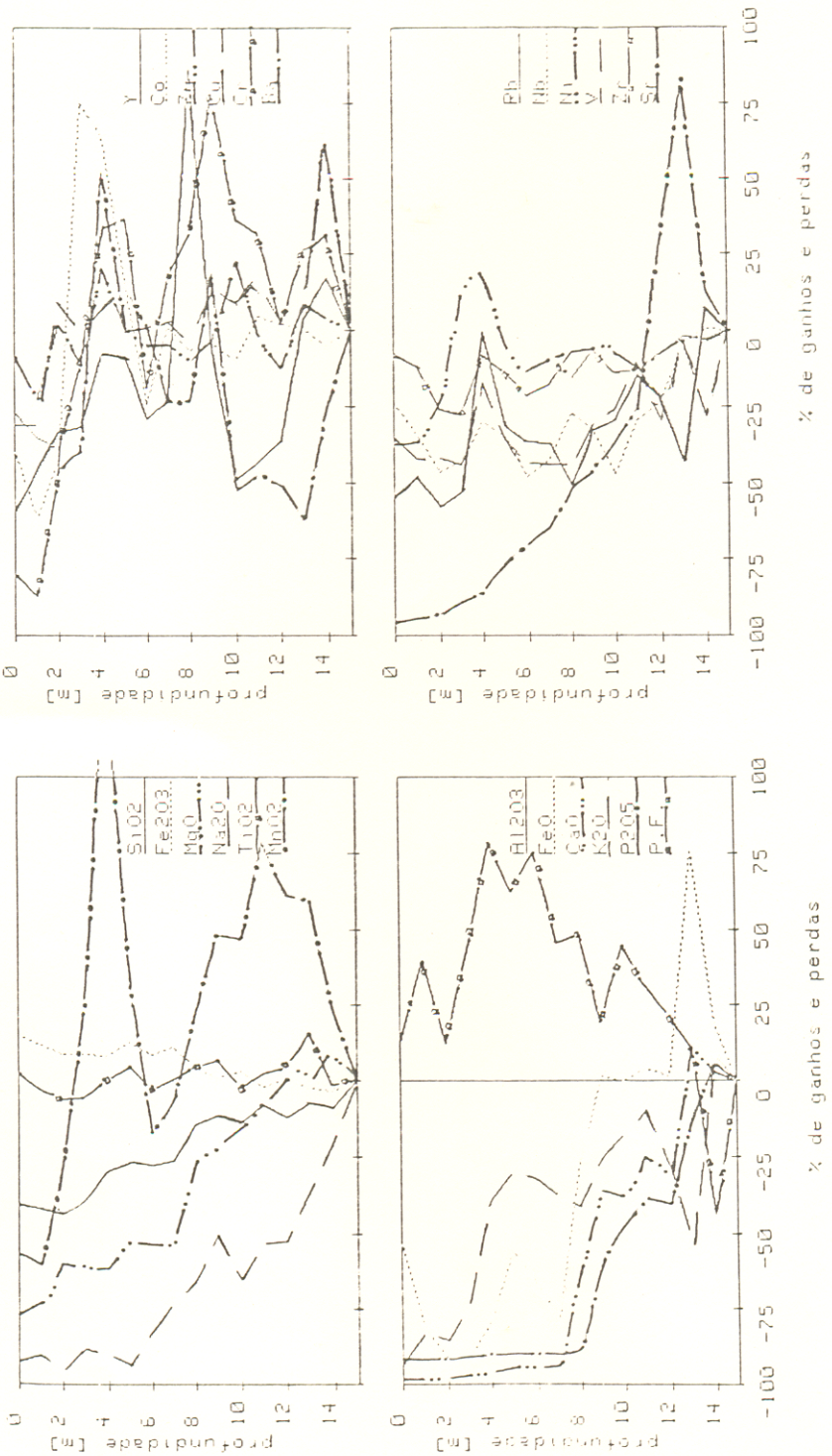


Fig. 23 — Representação gráfica das perdas e ganhos, em percentagem, dos constituintes químicos ao longo do Perfil S-9.

3. Poucos são os elementos cuja representação fica no lado direito da linha do alumínio que representa perda ou ganho igual a zero. Entre estes encontra-se o titânio, que principalmente nas etapas iniciais de alteração é ainda mais enriquecido que o alumínio. No entanto, nos perfis em estágio de alteração mais avançado, o titânio manifesta uma leve tendência de perda quando comparado com o alumínio.

4. O Fe (III) apresenta uma percentagem de ganho acima de 100 % já no início da laterização e nem sempre pode ser representado graficamente. Esse enorme enriquecimento relativo do Fe (III) é conseqüência da rápida oxidação do Fe (II) que existe em muito maior proporção na rocha-mãe. Quando se considera as perdas e ganhos do ferro total, verifica-se que ele se enriquece em menor proporção que o alumínio.

5. Em algumas partes dos perfis, o manganês também apresenta enriquecimento relativo maior que o do alumínio, aparentemente em conseqüência de processos de oxidação. No entanto, em estágios mais avançados do intemperismo, ele apresenta relativa perda por remoção.

6. Os elementos alcalinos e alcalino-terrosos são intensamerte lixiviados já nas primeiras fases do intemperismo.

7. A mobilidade relativa dos elementos está relacionada de algum modo as condições ambientais, e, em conseqüência ao estágio de alteração em que se encontra a amostra considerada. Dessa forma foram classificados as mobilidades relativas dos elementos segundo o estágio de alteração em que se encontram os mesmos no quadro seguinte:

7.2.4 Influência das Concentrações Químicas na Formação de Novos Minerais

Embora as quantidades relativas dos elementos presentes em um meio não determinem a composição química dos produtos formados, e muito menos o tipo específico de mineral a ser formado, elas podem servir de parâmetros limites para o desenvolvimento de novas espécies minerais. Assim, por exemplo o forte processo de oxidação observado na área, pelo qual o ferro (II) transforma-se completa e rapidamente em ferro (III), elimina a

MODALIDADE RELATIVA	AMBIENTE ALCALINO		AMBIENTE ÁCIDO
	ESTÁGIO INICIAL	ESTÁGIO PRÉ-CAOLINÍTICO	ESTÁGIO CAOLINÍTICO
Muito Alta	FeO, Na_2O	FeO, MgO, Na_2O, K_2O, P_2O_5 Sr	MgO, CaO Y, Sr
Alta	MgO, CaO, K_2O Rb, Sr	CaO, Y	Na_2O, K_2O Rb, Zn, Cu
Média	SiO_2, P_2O_5	SiO_2 Nb, Cr, Rb, Ba	FeO, SiO_2, P_2O_5, MnO_2 Ni, Cu, Ba
Baixa	Nb, V, Ze, Ni, Zn, Cr	MnO_2 V, Zr, Co, Ni, Zn	V, Nb, Co, Zr
Muito Baixa à imóvel	Al_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2, MnO_2, Y, Co, Cu, Ba	Al_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2, Cu	Al_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2,

possibilidade de formação de qualquer mineral que contenha na sua estrutura o ferro na forma divalente.

Por outro lado, outro processo importante no intemperismo, a hidrólise dos silicatos, é condicionada pelas quantidades relativas de água, ácidos e cátions, principalmente alcalinos e alcalino-terrosos em solução, os quais determinam a natureza e a quantidade dos argilo-minerais formados.

O diagrama triangular, construído segundo o método de Wraschaw e Roy (1961), no qual se considera a somatória dos % em peso dos óxidos divalentes (RO) e a % de Al_2O_3 e a % de SiO_2 (Fig. 24), mostra que nas etapas iniciais do intemperismo, existe certa tendência para a formação de smectita, enquanto que nas etapas mais avançadas a tendência é para a formação da caolinita. Isso já pode ser deduzido a partir da análise da razão SiO_2/Al_2O_3 nas amostras de solo pois, na medida que a alteração progride, esta relação diminui, facilitando assim a transformação da smectita onde a razão SiO_2/Al_2O_3 é aproximadamente: 2:1, para a caolinita, na qual a razão é de 1:1.

7.2.5 A Constância dos Óxidos Residuais

Tomando-se em cada amostra os teores de Al_2O_3, TiO_2 e Fe_2O_3 (total), recalculando-se esses valores para 100% e plotando-se os mesmos em um diagrama triangular, como já utilizado por Chesworth et al. (1981), verifica-se que os pontos correspondentes agrupam-se em uma área muito estreita do diagrama, com uma dispersão mínima (Fig. 25). Esse fato é conseqüência da retenção substancial dos três óxidos no perfil, indicando que, embora seus teores possam variar individualmente, as relações desses teores entre si permanecem constantes em todos os estágios do intemperismo registrados na área de estudo. Assim sendo, conclui-se que a somatória total dos teores dos óxidos residuais Al_2O_3, TiO_2 e Fe_2O_3 (total) em qualquer amostra pode ser tomada como uma medida semi-quantitativa do estágio de intemperismo no qual a citada amostra se encontra.

Os valores da soma total dos óxidos residuais (RES) $= Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3$ (total) para as rochas frescas disponíveis incluídas as amostras de basalto fresco coletadas respectivamente

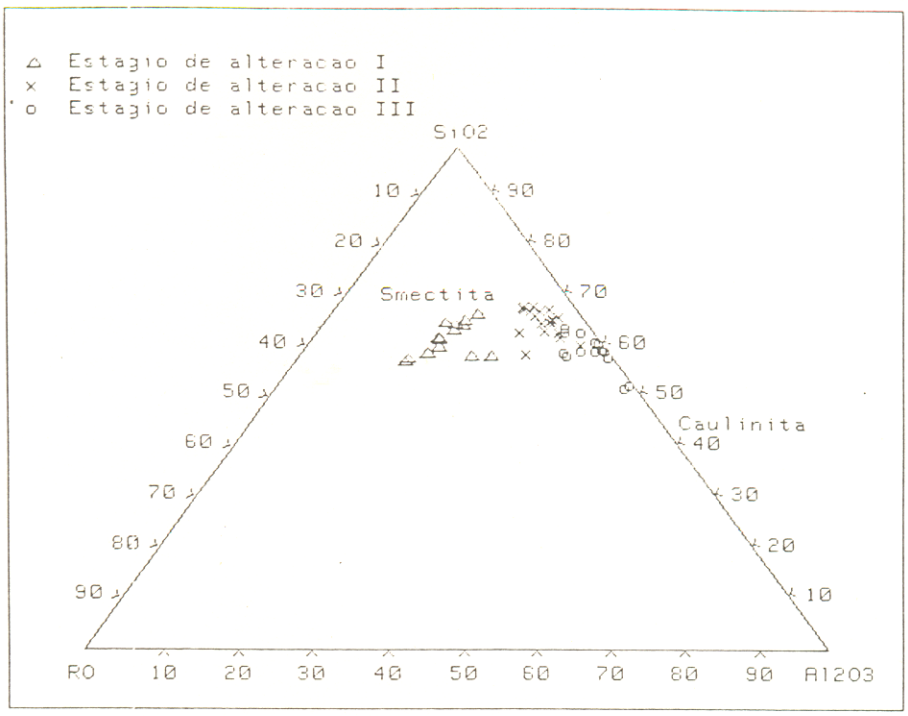


Fig. 24 — Distribuição em diagrama triangular dos valores de RO, Al_2O_3 e SiO_2 (RO = % CaO + % MgO + % FeO)

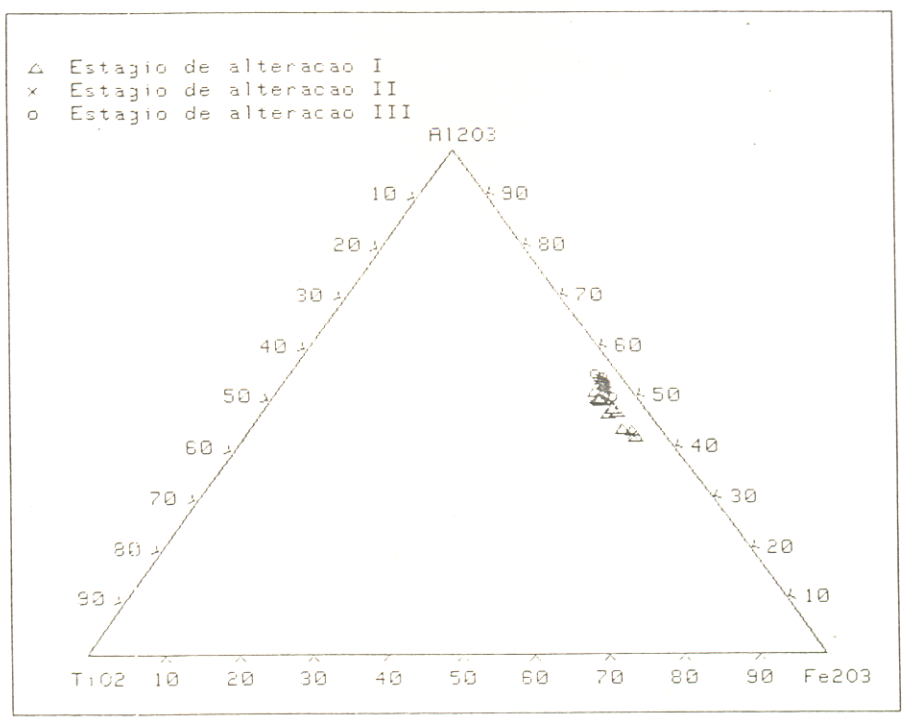


Fig. 25 — Distribuição em diagrama triangular dos valores percentuais de Al_2O_3, Fe_2O_3 e TiO_2 de todas as amostras estudadas.

na margem do rio Tocantins na cidade de Estreito, (S-1) e na margem direita a 30km de Porto Franco na rodovia Porto Franco - Grajaú, (S-4), são muito semelhantes como se nota abaixo:

Amostra	RES
S-1	25,4 %
S-2-1	26,4 %
S-4	26,0 %
S-9-1	25,5 %

O valor médio de RES nas amostras de basalto fresco é portanto, de aproximadamente 26%.

Em amostras que caracterizam a etapa em que desaparece completamente a smectita, considerada como limite superior do estágio de alteração pré-caolinítica incluindo uma outra amostra coletada a 36km de Porto Franco na rodovia Porto-Franco-Grajaú (S-5), observa-se um valor quase que constante, como se nota abaixo:

Amostra	RES
S-3-3	43,5 %
S-5	44,8 %
S-6-5	43,6 %

O valor médio para o RES, neste caso, é de 44%.

Estes dois valores limitam perfeitamente portanto, o início da alteração, com a ruptura das estruturas cristalinas originais, correspondentes ao basalto fresco com RES = 26%, e o final da alteração pré-caolinítica, ou início de alteração caolinítica com RES = 44%. As amostras com valores acima de 44% de RES apresentam a caolinita como único argilo-mineral.

7.2.6 O Processo de Dessilificação em Função dos Gradientes de Concentração Química

Tendo em vista a constância dos óxidos residuais Fe_2O_3, Al_2O_3 e TiO_2 nos perfis independentemente do estágio do intemperismo, é possível utilizar qualquer par destes óxidos para servir como referência na medida do grau de dessilificação que

ocorre a cada ponto dos perfis de alteração.

Na figura 26, o par Al_2O_3-Fe_2O_3 (total) é tomada como referência e o processo de dessilificação é acompanhada através de um diagrama Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2. As concentrações dos três óxidos em cada amostra de solo, recalculados para o total de 100% são plotados no diagrama, permitindo a caracterização de um "trend" bem definido: à medida em que aumenta a intensidade do intemperismo, os pontos afastam-se continuamente do vértice correspondente à SiO_2, em um processo geometricamente rigoroso. Praticamente todos os pontos registrados no diagrama caem sobre uma reta que corta o vértice da sílica. Isso significa, de acordo com as leis da geometria, que ao longo dessa linha a relação Fe_2O_3/Al_2O_3 permanece sempre constante, mostrando que o processo de alteração dos basaltos estudados é essencialmente um processo de dessilificação no qual o ferro e o alumínio mantem-se constante. Assim sendo, até o estágio de intemperismo alcançado nos perfis estudados não é possível, ainda, observar qualquer tendência de concentração preferencial de Al_2O_3 ou de Fe_2O_3, que indique a predisposição para a formação de uma bauxita ou de uma laterita ferruginosa na área.

7.2.7 Relação entre a Percentagem de Óxidos Residuais e a Profundidade

As variações de percentagem total dos óxidos residuais Al_2O_3, Fe_2O_3 (total) e TiO_2, são mostrados na figura 27. A diversidade de espessuras dos perfis de alteração fez necessário utilizar-se uma escala logarítmica para a apresentação no eixo das ordenadas. No eixo das abscissas representou-se a soma total dos óxidos residuais (RES).

O estágio de alteração em cada ponto do perfil pode ser estimado analisando-se os valores de RES nas amostras e comparando-se esses valores com os limites estabelecidos acima.

Como se pode ver na figura 27, quanto mais profundamente a curva de RES do perfil corta a linha correspondente a RES de 26% tanto mais desenvolvido é o perfil e mais avançado é o processo de alteração nesse perfil.

Da mesma forma, quanto mais para a direita a curva de RES de cada perfil corta ao eixo das abscissas no nível cor-

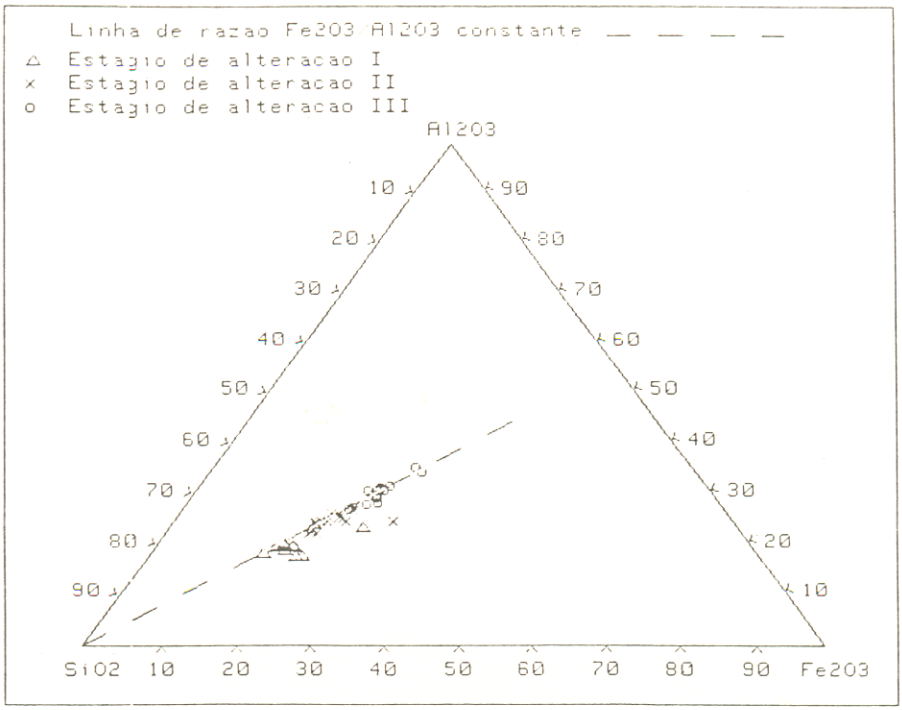


Fig. 26 — Variação gradativa do teor de SiO_2 para todas as amostras estudadas em relação aos teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

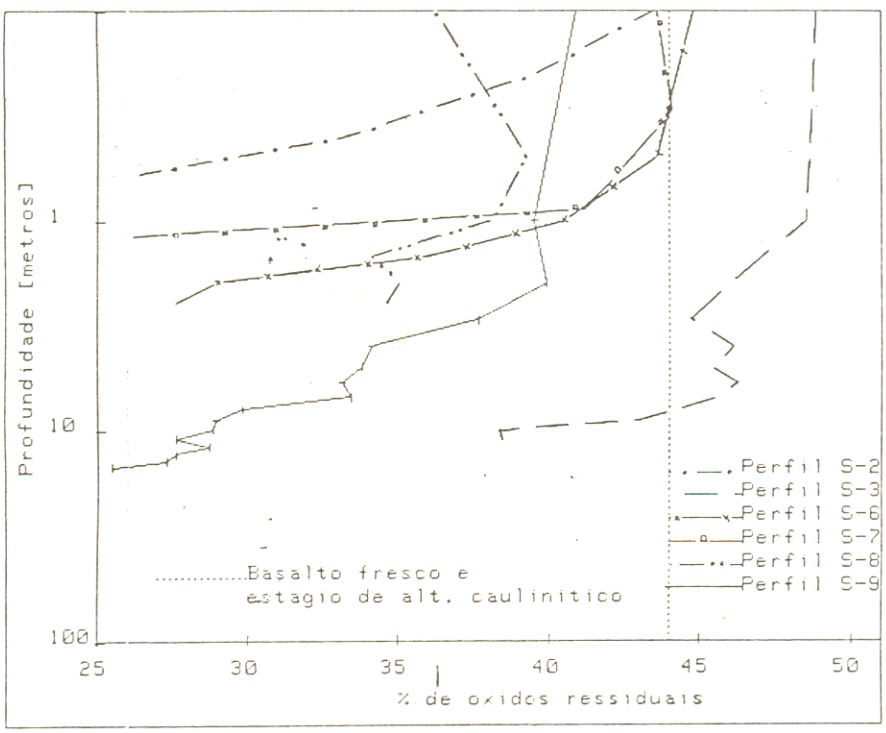


Fig. 27 — Variação percentual dos óxidos residuais: Al_2O_3 , Fe_2O_3 (total) e TiO_2 segundo a profundidade.

respondente a profundidade zero, tanto mais desenvolvido e o perfil. Se a corte ocorre a um valor de RES superior a 44% o estágio de intemperismo caolinítico foi seguramente atingido nesse perfil.

7.3 Influência dos Constituintes Dissolvidos no Processo de Alteração Supergênica

7.3.1 Influência dos Constituintes Dissolvidos na Mobilidade dos Elementos

As águas superficiais e subterrâneas foram coletadas dentro da área de afloramento dos derrames basálticos, de modo que todos os seus constituintes dissolvidos devem derivar desse material e de seus produtos de alteração percolados pela água.

A composição dessas águas refletem, assim, a natureza e a extensão do intemperismo a que esses materiais foram submetidos.

A situação geográfica da zona de estudo, distante do litoral, e a detecção de conteúdos relativamente baixos de cloretos e sulfatos nessas águas (tabelas 11-14) indicam que os mesmos são, essencialmente, de origem meteórica.

As análises químicas das águas assinalam conteúdos relativamente altos de silício, o que confirma a extensa dessilificação que ocorre na área.

Segundo Garrels e Christ (1965), as águas metóricas têm um valor de pH aproximadamente igual a 5. Considerando-se os elevados teores de silício disssolvido encontrados, seria de se esperar que essas águas fossem francamente ácidas, mas as medições feitas (tabela 16) indicam que as mesmas são ligeiramente alcalinas. A explicação para que tal aconteça é o elevado teor em elementos alcalinos e alcalino-terrosos, o que reflete um intenso processo de lixiviação, e não apenas desses elementos, como também de outros cátions, pois os valores detectados para os correspodentes índices de condutividade elétrica indicam teores bastante altos. Por outro lado, é provável a existência de um componente tampão.

Embora os valores nulos determinados para a alcalinidade à fenoftaleina indiquem concentrações igualmente nulos em íons hidroxila e/ou carbonato livres em solução, as determinações de alcalinidade ao metilorange em quantidades razoáveis indicam, em contraposição, ocorrências também significativas de ions HCO_3^-, o qual poderia atuar como regulador do pH.

Os conteúdos de Fe^{++} nas águas de origem superficial são mais altos que nas águas subterrâneas. Isso é devido à presença, tanto nos pontos de coleta de água superficial nas margens dos rios, como no próprio leito dos rios, de basalto fresco, com maior disponibilidade do ferro divalente. Essa hipótese é corroborada pelos resultados das análises dos poços 5 e 6 os quais durante a primeira e segunda etapa de coleta, mostram teores relativamente altos de ferro, em comparação com as outras épocas, em conseqüência dos trabalhos de aprofundamento neles realizados pouco antes das citadas coletas.

Os teores de Al(+3) são muito baixos (na ordem de ppb) o que confirma ser este o elemento menos transportado pelas soluções intempéricas.

As concentrações de Ca^{++} e Mg^{++}, encontram-se numa proporção média de 2:1, exceto no poço 4, onde a relação de concentração é 1:1. A relação de concentração 2:1 entre o Ca^{++} e o Mg^{++} indica que existe uma retenção do magnésio, nos argilo-minerais, enquanto que o Ca^{++} é removido com maior facilidade. No caso do poço 4, localizado em Porto Franco, juntamente com a amostra de água também foram coletadas amostras de solo ao longo das paredes do poço até uma profundidade de 11 metros. Os dados indicam para este solo (perfil S-3) um estágio muito avançado de alteração, com predominância de caolinita, cuja capacidade de retenção de cátions é muito menor que a da smectita. Por esta razão o Ca^{++} e o Mg^{++} são removidos com a mesma facilidade no perfil S-3 e apresentam teores semelhantes na amostra A-4.

A relação média de concentração Ca^{++} : Na^{+}, igual a 4:1, e reflexo do caráter mais calcíco do plagioclásio que ocorre nos basaltos (labradorita).

Os teores muito baixos de K^{+}, comparados com a quantidade existente nos perfis, confirma a tendência de ser este elemento retido nas argilo-minerais.

7.3.2 Influência dos Constituintes Dissolvidos na Formação de Novos Minerais

A predicão e interpretação do meio ambiente em que se formam os argilo-minerais no processo geoquímico, pode ser feita através do uso de diagramas de atividade, os quais representam o equilíbrio entre os minerais e as soluções aquosas.

A composição dos minerais na crosta terrestre pode ser descrita no sistema $MgO-CaO-FeO-Na_2O-K_2O-Al_2O_3-SiO_2-CO_2-H_2O$; dos quais os três últimos não se dissociam em apreciável extensão, ocorrendo em forma primária como moléculas neutras ou formando complexos com os outros íons em solução (Helgeson, 1969b).

Os restantes óxidos se dissociam completamente de acordo com a equação estebelecida por Helgeson (1969b):

$$M_cO_a + cz\ H^+ \rightleftharpoons c\ M^{z+} + cz/2\ H_2O$$

onde:

M= cátion do componente oxidado
O= oxigênio
H= hidrogênio
c= Número de moles do cátion em um mol de óxido
a= Número de moles do ânion em um mol de óxido
z= Carga de cátion

Uma equação modificada pode ser escrita com o mesmo objetivo da seguinte maneira:

$$M_cSi_bO_a + cz\ H^+ \rightleftharpoons c\ M^{z+} + b\ H_4SiO_4$$

onde:

b= Número de moles de silício = número de moles de H_4SiO_4

A aplicação da lei de ação das massas da equação modificada de Helgeson tem como resultado:

$$K = \frac{(M^{z+})^c\ (H_4SiO_4)^b}{(H^+)^{cz}}$$

$$\log K = c \log (M^{z+}) + b \log (H_4SiO_4) - cz \log (H^+)$$

Sendo b = 0 para os óxidos que não tem silíca na sua estrutura.

$$\log K'' = c \log (M^{z+}) + b'' \log (H_4SiO_4) - c'' z \log (H^+)$$

$$\log K' = c \log (M^{z+}) + b' \log (H_4SiO_4) - c' z \log (H^+)$$

$$\log K''/K' = \log K = (c''-c') \log(M^{z+})/H^+) + (b''-b') \log (H_4SiO_4)$$

Se conhecidas as constantes de equilíbrio para cada sistema mineral, a última equação pode ser interpretada como sendo a equação de uma linha reta do sistema binário considerado. Da mesma forma, outros sistemas binários podem ser representados por equações semelhantes. As interseções das retas representativas dessas equações delimitarão áreas ou superfícies de equilíbrio, constituindo assim os denominados diagramas de atividade, os quais podem ser construídos assinalando-se nas abscissas o valor do logarítmo da atividade do H_4SiO_4 e nas ordenadas o logarítimo da razão das atividades $[M^{v+}] / [H+]$, sendo M a atividade do metal e v a sua valência.

Os valores de concentração como logarítmo das atividades, (expressos em moles/litro), estão pormenorizados nas figuras 28-29 A e B.

Na construção dos diagramas fez-se uso dos dados e equações termodinâmicas apresentados por Helgeson (1969a), os quais estão sujeitos a incertezas, devido a complexidade e natureza muito ampla dos argilo-minerais observados, principalmente das smectitas, cuja composição não é única e definida.

7.3.2.1 Sistema $HCl - H_2O - Al_2O_3 - Na_2O - SiO_2$ a 25°C

Albita - Gibbsita

$$NaAlSi_3O_8 + H^+ + 7H_2O \rightleftharpoons Na^+ + 3H_4SiO_4 + Al(OH)_3$$

$$\log K = \log (Na^+)/(H^+) + 3 \log(H_4SiO_4) = - 4.02$$

Albita - smectita

$$7NaAlSiO_3O_8 + 6H^+ + 20H_2O \rightleftharpoons 3Na_{.33}Al_{2.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2 + 6Na^+ + 10H_4SiO_4$$

$$\log K = 0.6 \log (Na^+)/(H^+) + \log (H_4SiO_4) = 0.852$$

Albita - caolinita

$$2NaAlSi_3O_8 + 2H^+ + 7H_2O \rightleftharpoons 2Na^+ + 4H_4SiO_4 + Al_2Si_2O_5(OH)_4$$

$$\log (Na^+)/(H^+) + 2 \log (H_4SiO_4) = \log K = 0.125$$

Caolonita - smectita-Na

$$6Na_{0.33}Al_{2.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2 + 2H^+ + 23H_2O \rightleftharpoons 7Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2Na^+ + 8H_4SiO_4$$

$$\log K = \log (Na^+)/(H^+) + 4 \log (H_4SiO_4)\ 1\ -7.645$$

É possível também obter o valor da variação de energia livre em condições padrões para a reação acima, a partir da equação:

$$\Delta F^o_r = -1.364 \log K$$

$$\Delta F^o_r = 10.58 \text{ Kcal}$$

Caolinita - Gibbisita

$$Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 5H_2O \qquad 2H_4SiO_4 + 2Al(OH)_3$$

$$\log K = \log (H_4SiO_4) = -4.145$$

$$\Delta F^o_r = 11.473 \text{ Kcal}$$

Para fins de comparação e de análise da viabilidade da formação de um ou outro mineral a partir da albita, tem-se

as seguintes equações:

$$14NaAlSiO_3O_8 + 12H^+ + 40H_2O \rightleftharpoons 6Na_{0.33}Al_{2.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2 + 12Na^+ + 20H_4SiO_4 \quad \Delta F_r^o = -23.777 \text{ Kcal}$$

$$14NaAlSiO_3O_8 + 14H^+ + 49H_2O \rightleftharpoons 7Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 14Na^+ + 28H_4SiO_4 \quad \Delta F_r^o = 0.606 \text{ Kcal}$$

$$14NaAlSi_3O_8 + 14H^+ + 98H_2O \rightleftharpoons 14Al(OH)_3 + 42H_4SiO_4 \quad \Delta F_r^o = 77.892 \text{ Kcal}$$

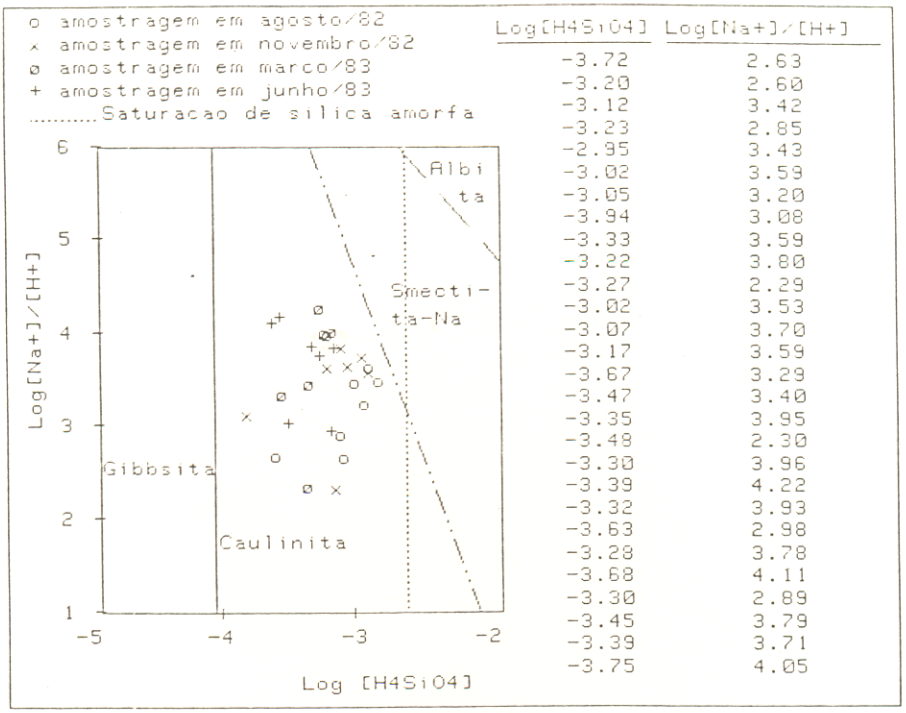
Estequiometricamente a intensidade no grau de lixiviação necessária para a formação dos argilo-minerais aumenta no sentido smectita-Na - caolinita - Gibbsita, a facilidade termodinâmica de formação aumenta nas condições padrões no mesmo sentido. Por outro lado, quanto mais ácidos sejam as soluções percolantes, mais rápido será o processo de hidrólise.

Nas condições termodinâmicas padrões não é possível a transformação de smectita em caolinita (F = 10.43 Kcal) , nem da caolinita em gibbsita, mas uma intensa lixiviação deslocaria no sentido de formar estes argilo-minerais.

Na Figura 28-A este diagrama é aplicado aos dados obtidos nas águas da região de Porto Franco-Grajaú. Observando - se nessa figura que a concentração relativamente alta do H_4SiO_4 nas águas estudadas descarta a possibilidade de formação de gibbsita. Por outro lado, nas condições de lixiviação intensa, com valores de pH compreendida entre neutro e ligeiramente alcalino, a quantidade de Na+ é insuficiente para a formação da smectita - Na, o que implica na formação de caolinita segundo o sistema considerado.

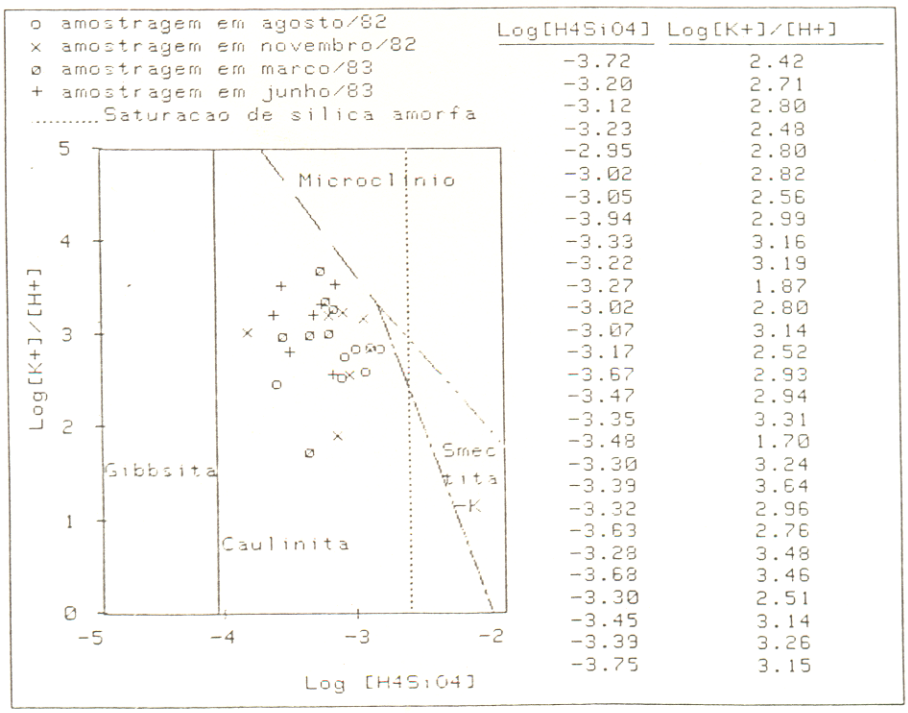
7.3.2.2 Sistema $HCl - H_2O - Al_2O_3 - K_2O - SiO_2$ a 25°C

$$7KAlSi_3O_8 + 6H^+ + 20H_2O \rightleftharpoons 3K_{0.33}Al_{2.33}SiO_{3.67}O_{10}(OH)_2 + 10H_4SiO_4 + 6K^+$$



Log[H4SiO4]	Log[Na+]/[H+]
-3.72	2.63
-3.20	2.60
-3.12	3.42
-3.23	2.85
-2.95	3.43
-3.02	3.59
-3.05	3.20
-3.94	3.08
-3.33	3.59
-3.22	3.80
-3.27	2.29
-3.02	3.53
-3.07	3.70
-3.17	3.59
-3.67	3.29
-3.47	3.40
-3.35	3.95
-3.48	2.30
-3.30	3.96
-3.39	4.22
-3.32	3.93
-3.63	2.98
-3.28	3.78
-3.68	4.11
-3.30	2.89
-3.45	3.79
-3.39	3.71
-3.75	4.05

(A)



Log[H4SiO4]	Log[K+]/[H+]
-3.72	2.42
-3.20	2.71
-3.12	2.80
-3.23	2.48
-2.95	2.80
-3.02	2.82
-3.05	2.56
-3.94	2.99
-3.33	3.16
-3.22	3.19
-3.27	1.87
-3.02	2.80
-3.07	3.14
-3.17	2.52
-3.67	2.93
-3.47	2.94
-3.35	3.31
-3.48	1.70
-3.30	3.24
-3.39	3.64
-3.32	2.96
-3.63	2.76
-3.28	3.48
-3.68	3.46
-3.30	2.51
-3.45	3.14
-3.39	3.26
-3.75	3.15

Fig. 28 — Diagramas de atividade/atividade, mostrando relações de estabilidade nos sistemas: (A) $Na_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ e (B) $K_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$.

$$\log K = 0.6 \log (K^+)/(H^+ + \log (H_4SiO_4) = 0.929$$

$$2KAlSiO_3O_8 + 2H^+ + 7H_2O \rightleftharpoons 2K^+ + 4H_4SiO_4 + Al_2Si_2O_5(OH)_2$$

$$\log K = \log (K^+)/(H^+) + 2 \log (H_2SiO_4) = -2.525$$

$$6K_{0.33}Al_{2.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2 + 2H^+ + 23H_2O \rightleftharpoons 7Al_2SiO_2O_5(OH)_4 + 2K^+ + 8H_4SiO_4 + 23.21 \text{ Kcal}$$

$$\log K = \log (K^+)/(H^+) + 4 \log (H_4SiO_4) = -8.385$$

Como a atividade alta da sílica dissolvida elimina a possibilidade de formação da gibbsita, as reações e constantes de equilíbrio só foram consideradas para o k-feldspato, smectita -K e caolinita.

As condições termodinâmicas padrões impossibilitam a transformação da caolinita em smectita-K, porém a intensa lixiviação favorece essa transformação.

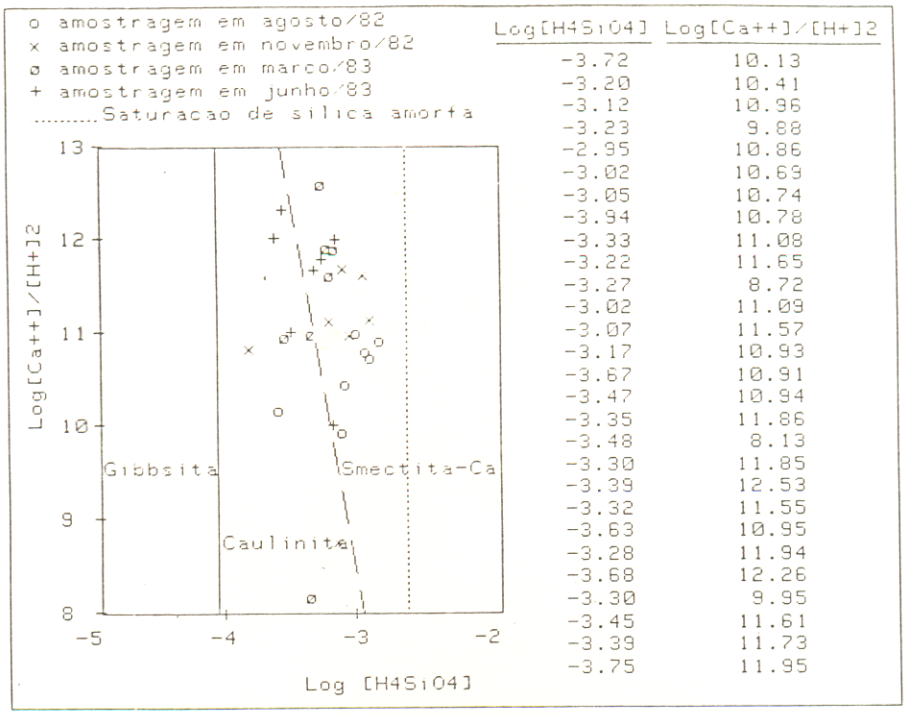
Os valores da atividade do potássio para todas as águas foram locadas nos diagramas bidimensionais, (Figura 28-B), situando-se todas elas no campo de estabilidade da caolinita. A formação deste argilo-mineral é limitada pela atividade da sílica, não mudando a sua natureza com o aumento ou diminuição relativa do K+.

7.3.2.3 Sistema HCl - H_2O - Al_2O_3 - MgO - SiO_2 a 25°C

$$7Al_2Si_2O_5(OH)_4 + Mg^{++} + 8H_4SiO_4 \rightleftharpoons 6Mg_{0.167}Al_{2.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2 + 2H^+ + 23H_2O \quad \Delta F_r^o = -23.26 \text{Kca}$$

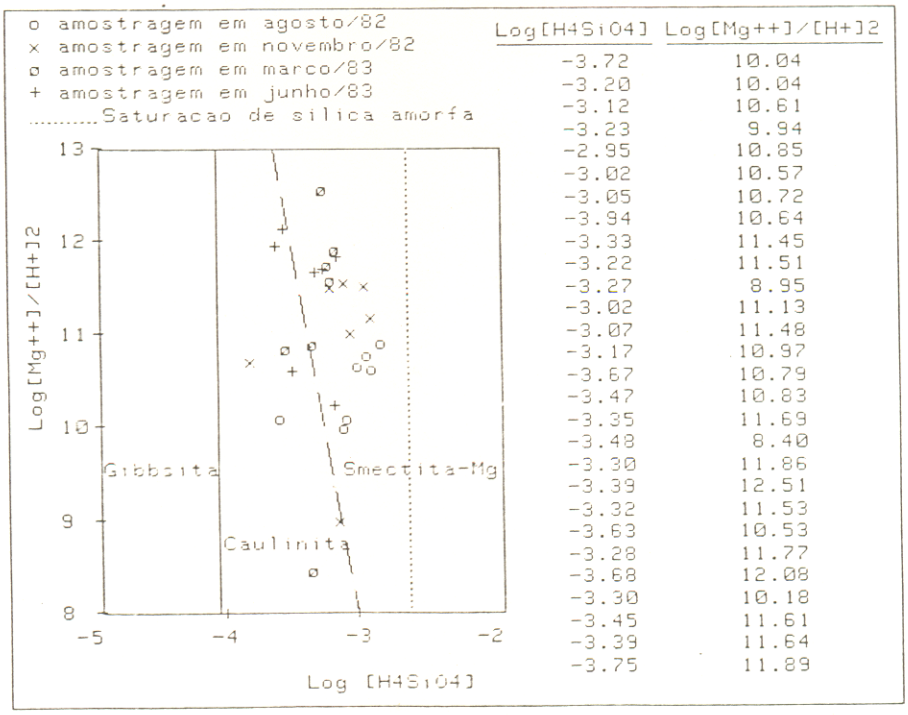
$$\log K = \log (Mg^{++})/(H^+)^2 + 8 \log (H_4SiO_4) = -16.81$$

Quando as concentrações de magnésio são plotados no diagrama de atividades correspondente, todas as amostras, exceto a amostra do rio Tocantins (A-1) e a amostra coletada no poço número 4, que está em contato com o material longamente intemperizado, situam-se no campo de estabilidade da smectita-Mg (Figura 29-B). Isso se deve ao fato de que o magnésio está presente nos basaltos em quantidade considerável e revela que o primeiro



Log[H4SiO4]	Log[Ca++]/[H+]2
-3.72	10.13
-3.20	10.41
-3.12	10.96
-3.23	9.88
-2.95	10.86
-3.02	10.69
-3.05	10.74
-3.94	10.78
-3.33	11.08
-3.22	11.65
-3.27	8.72
-3.02	11.09
-3.07	11.57
-3.17	10.93
-3.67	10.91
-3.47	10.94
-3.35	11.86
-3.48	8.13
-3.30	11.85
-3.39	12.53
-3.32	11.55
-3.63	10.95
-3.28	11.94
-3.68	12.26
-3.30	9.95
-3.45	11.61
-3.39	11.73
-3.75	11.95

(A)



Log[H4SiO4]	Log[Mg++]/[H+]2
-3.72	10.04
-3.20	10.04
-3.12	10.61
-3.23	9.94
-2.95	10.85
-3.02	10.57
-3.05	10.72
-3.94	10.64
-3.33	11.45
-3.22	11.51
-3.27	8.95
-3.02	11.13
-3.07	11.48
-3.17	10.97
-3.67	10.79
-3.47	10.83
-3.35	11.69
-3.48	8.40
-3.30	11.86
-3.39	12.51
-3.32	11.53
-3.63	10.53
-3.28	11.77
-3.68	12.08
-3.30	10.18
-3.45	11.61
-3.39	11.64
-3.75	11.89

Fig. 29 — Diagramas de atividade/atividade, mostrando relações de estabilidade nos sistemas: $CaO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ e (B) $MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$

produto de alteração do basalto é a smectita magnesiana. Nos estágios mais avançados de alteração, essa smectita, em vista da lixiviação intensa, é transformada em caolinita.

A transformação da smectita em caolinita, embora seja impossível em condições termodinâmica padrões, é possível e até mesmo corriqueira nas condições não-padrões existentes na natureza. É por isso que, no poço número 4, onde as águas estão em contato com o material já altamente intemperizado, a maior parte dos cátions já foi removida em solução, o que implica ter-se formado a caolinita.

Graficamente a transformação da smectita em caolinita significa um deslocamento dos pontos na figura 29-B em sentido descendente e para o lado direito.

7.3.2.4 Sistema $HCl - H_2O - Al_2O_3 - CaO - SiO_2$ a 25°C

$$6Ca_{0.167}Al_{2.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2 + 2H^+ + 33H_2O \rightleftharpoons 7Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 8H_4SiO_4 + Ca^{++} + 22.57Kcal$$

$$\log K = 8 \log (H_4SiO_4) + \log (Ca^{++})/(H^+)^2 = -16.31$$

A sílica dissolvida e o cálcio existentes em solução favorecem a formação da smectita.

Embora nas condições termodinâmicas padrões a transformação da smectita em caolinita seja difícil, ela é favorecida pela intensa lixiviação.

As tendências observadas no estudo desse sistema são semelhantes ao do sistema anterior (caolinita - smectita-Mg) (Fig. 29A). Isso quer dizer que no início da alteração ocorre a formação preferencial da smectita e nos estágios mais avançados, forma-se a caolinita.

Em resumo, os dados apresentados indicam que no início da alteração é previsível a existência da smectita e caolinita, mas com a remoção posterior dos elementos alcalino-terrosos, acompanhado do processo de dessilificação, o argilo-mineral predominante será a caolinita.

7.4 Influência do Clima nos Processos de Alteração

De acordo com a figura 2, os perfis estão distribuídos nas três faixas climáticas ocorrentes na área. Os perfis S-2 e S-3 estão localizados em área de clima primeiro úmido(B1wA'a'), os perdis S-6, S-7 e s-8 situam-se em área de clima subúmido-úmido (C2wA'a') e o perfil S-9 está situada em área de clima subúmido-seco (C1wA'a'). As diferenças entre os três tipos climáticos citados referem-se essencialmente à umidade.

7.4.1 Influência do Clima nas Características Morfológicas e Mineralógicas dos Perfis

Comparando-se as características morfológicas e mineralógicas dos perfis estudados em função da faixa climática em que se encontram chega-se às seguintes conclusões preliminares sobre a influência da umidade no desenvolvimento dos perfis de alteração da região de Porto Franco-Grajaú:

a) As características texturais do basalto são preservadas em seus produtos de alteração por um tempo mais longo nas áreas de menor umidade.

   A preservação das características texturais do basalto nos seus produtos de alteração está intimamente relacionada à preservação da consistência do material. Em climas secos, a baixa umidade facilita a manutenção dessa consistência e a preservação das características texturais do basalto, mesmo quando seus minerais já se encontram bastante alterados.

b) A velocidade de alteração dos piroxênios e dos plagioclásios é menor nos climas mais secos. O exemplo disso é a preservação desses minerais nos produtos mais alterados do perfil S-9, coexistindo por longo tempo com fases minerais características de estágios mais avançados de alteração, como a caolinita. Em outras palavras, nos climas mais secos necessita-se de mais tempo para se atingir o equilíbrio. A causa óbvia desse fenômeno é a carência, nos climas mais secos, da água necessária à hidrólise dos piroxênios e plagioclásios.

c) A smectita preserva-se por mais tempo em áreas de clima mais seco. A razão é a mesma indicada no ítem anterior.

d) A oxidação da magnetita é mais lenta nas áreas de clima mais seco. A causa para este fenômeno reside, igualmente, na carência de água nessas áreas, fato que retarda a reação de oxidação.

e) A goethita é um produto comum de alteração de basalto em áreas dos três tipos climáticos tratados no presente trabalho, aparecendo desde as primeiras fases do intemperismo. A formação da hematita nos estágios de intemperismo descritos neste trabalho é restrita, porém apenas as áreas de clima mais seco.

7.4.2 Influência do Clima na Mobilidade dos Elementos

A menor disponibilidade de água traduz óbviamente num menor poder de remoção dos elementos em solução, fato que pode ser conferido com a análise das tabelas 18 - 23 e as figuras 10 - 15, nos quais a diminuição da concentração dos elementos alcalinos, alcalino-terrosos, ferro (II) e sílica à medida em que se avança em direção ao topo do perfil é mais pronunciada em clima mais úmido.

8 CONCLUSÕES

Os seis perfis de alteração de basaltos estudados estão distribuídos nas três faixas climáticas existentes na área, com diminuição gradativa na umidade em sentido de Porto-Franco para Grajaú correspondendo aos climas primeiro úmido, subúmido-úmido, e subúmido-seco.

Uma das principais características observadas nos perfis de alteração é a grande espessura do horizonte C quando comparado com os outros horizontes. Essas duas características sugerem um padrão bem definido para a evolução dos perfis de alteração dos basaltos. Iniciando-se pela exposição da rocha fresca à superfície, tem-se como primeira etapa desse processo, a desagregação da rocha e sua alteração incipiente, formando um horizonte C. O desenvolvimento de um nível superficial, rico em matéria orgânica sobre esse material desagregado, leva à caracterização de um horizonte A. A medida que a alteração se aprofunda, amplia-se a espessura do horizonte C. O horizonte B aparece, finalmente, como um resultado do processo de lixiviação, migração e reprecipitação dos elementos no perfil, somente quando o horizonte C já atingiu espessura bastante expressiva.

Pode-se estabelecer para os minerais primários do basalto a seguinte ordem decrescente de resistência ao intemperismo: augita > pigeonita >labradorita > magnetita. A smectita é o primeiro dos argilo-minerais a se formar durante o processo de alteração.A ordem decrescente de resistência dos minerais secundários é: hematita > caolinita > goethita > ilita > halloysita > smectita. Ressalta-se que a smectita, o menos resistente dos minerais secundários, é, ainda, mais resistente que qualquer dos minerais primários do basalto.

Os dados obtidos sobre a evolução morfológica dos perfis e sobre a mineralogia das amostras estudadas sugerem que o processo de alteração supergênica dos basaltos da região de Porto Franco-Grajaú desenvolve-se em três estágios principais. O primeiro estágio (estágio inicial) consiste na ruptura e desagregação das estruturas cristalinas dos minerais primários, com a gradativa perda de consistência das amostras e formação dos primeiros argilo-minerais, principalmente halloysita e smectita . Nesse estágio o solo tem cor verde a amarela e os minerais primá

rios ainda predominam sobre os secundários. O segundo estágio (estágio Pré-caolinítico) é caracterizado pelo extensivo desenvolvimento de smectita e halloysita. Os minerais primários são raros ou inexistentes, a caolinita, a goethita e a hematita podem ocorrer como constituintes subordinados. O solo tem cor amarela a marron. No terceiro estágio (estágio caolinítico) o solo adquire coloração vermelha escura; os argilo-minerais que ocorrem são a caolinita e, em menor escala, a halloysita. A smectita é rara, os minerais primários já desapareceram completamente, goethita e/ou hematita são abundantes.

É importante notar que as transformações minerais entre os vários estágios citados são graduais.

Quando o processo de alteração está se iniciando, a lixiviação, embora muito intensa, ainda não é suficiente para a remoção completa da sílica e dos cátions, principalmente dos metais alcalino-terrosos. Assim sendo, o ambiente torna-se alcalino, propício à formação da smectita, observando-se também nestas condições a formação da halloysita, sendo que a smectita é o argilo-mineral predominante ao longo de vários metros do perfil em áreas de clima subúmido-seco.

Na etapa de alteração em que se atinge um ambiente de natureza ácida, a smectita desaparece completamente, sendo a caolinita o argilo-mineral predominante.

Nos diferentes perfis nota-se um gradual e constante incremento em sentido do topo dos teores dos elementos alumínio, ferro (III) e titânio e, em determinados pontos do perfil do maganês e do fósforo, enquanto que a concentração de alguns constituintes é reduzido em direção ao topo dos perfis. Isto ocorre rapidamente com os elementos alcalinos, alcalino-terrosos e ferro (II), mais lentamente para a sílica, sendo que, o processo de lixiviação é mais intensa nas proximidades da rocha fresca.

O magnésio, quando comparado com o cálcio, é lixiviado com menor intensidade, o que significa ser este o principal elemento alcalino-terroso que forma parte da estrutura dos argilo-minerais trifórmicos. Similar comportamento é observado entre o potássio e o sódio, sendo que o primeiro é retido preferencialmente na zona intempérica.

Os elementos traços tem sua distribuição geralmente relacionada à dos elementos maiores. De um modo geral aumentam na sua concentração os elementos: Co, Ni, Zn, V, Cu e Zr; de uma maneira geral diminuem de teores da base para o topo do perfil os elementos Rb, Y, Nb e Sr, enquanto que os elementos que apresentam uma distribuição irregular são o Cr e o Ba.

A leve tendência do alumínio e aumentar seu conteúdo em direção à superfície, significa que este elemento foi pouco transportado em solução, fato que também é confirmado nos resultados das análises químicas para as diferentes amostras de água. O ambiente de intemperismo, no qual se encontra o basalto é altamente oxidante, quanto maior é a sua umidade, originando um considerável acréscimo de Fe (III) em direção à superfície, enquanto que o Fe (II) sofre substancial perda no mesmo sentido . Este padrão reflete principalmente a transformação de Fe (II) em Fe (III), e não a lixiviação do elemento para fora do perfil, já que as concentrações em ferro nas águas subterrâneas analisadas são muito pequenas (inferiores a 1 ppm).

O fato de que a razão CaO:MgO diminui em direção à superfície em todos os perfis pré-caoliníticos, e por outro lado a distribuição de Ca^{++} e Mg^{++} nas águas analisadas na relação de concentração 2:1, confirma a retenção do magnésio nos argilo-minerais, em quanto que o Ca^{++} é removido com maior facilidade.

O valor de perda ao fogo aumenta no sentido da superfície em todos os perfis de alteração indicando que novos componentes (H_2O, CO_2, OH^- etc) notadamente atmosféricos, são incorporados na estrutura dos novos minerais formados.

O diagrama triangular RO, Al_2O_3, SiO_2, mostra que nas etapas iniciais do intemperismo existe uma nítida tendência para a formação da smectita, com transformação em caolinita à medida que o intemperismo progride.

Em diagrama similar, mas tomando-se em consideração as concentrações de Al_2O_3, Fe_2O_3 (total) e TiO_2, verifica-se que os pontos correspondentes agrupam-se em uma área muito estreita do diagrama, com uma dispersão mínima. Esse fato é conseqüência da retenção substancial dos três óxidos no perfil, indicando que, embora seus teores possam variar individualmente, as relações desses teores entre si permanece constante em todos os estágios do

intemperismo registrados na área de estudo.

O valor médio da somatória destes três óxidos na rocha fresca é 26% e, na etapa em que desaparece completamente a smectita, o valor médio corresponde a 44%; acima deste valor, o argilo-mineral predominante é a caolinita.

Durante o intemperismo ocorre um forte processo de dessilificação sem apresentar no entanto tendência de concentração preferencial de Al_2O_3 ou de Fe_2O_3, que indique a predisposição para a formação de uma bauxita ou de uma laterita ferruginosa na área. Os conteúdos relativamente altos de SiO_2 nas águas da região confirma a extensa dessilificação que ocorre na área. O pH destas águas indicam que as mesmas são ligeiramente alcalinas, isto devido ao elevado teor em elementos alcalinos e alcalino-terrosos, o que reflete um intenso processo de lixiviação.

Nos diagramas de atividade/atividade dos sistemas $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ e $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$, a atividade alta da sílica dissolvida elimina a possibilidade de formação da gibbsita, porém é também insuficiente para a formação da smectita -Na (K). Por outro lado, nas condições de lixiviação intensa, com valores de pH compreendidas entre neutro e ligeiramente alcalino, a quantidade de Na^+ ou de K^+, é insuficiente para a formação da smectita-Na (K), o que implica a formação da caolinita segundo os sistemas considerados. Assim sendo, os valores da atividade do sódio e do potássio para todas as amostras de água, locadas nos diagramas bidimensionais, situam-se todas elas no campo de estabilidade da caolinita.

Nos sistemas $CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ e $MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ quando as concentrações de Ca^{++} e do Mg^{++} são plotados nos diagramas de atividade/atividade correspondentes, a maior parte das amostras situa-se no campo de estabilidade da smectita-Ca ou de smectita-Mg respectivamente. Sendo que estes elementos se encontram presentes no basalto em quantidades consideráveis conclui-se que o primeiro argilo-mineral formado é a smectita-Ca e/ou a smectita-Mg, principalmente este último, segundo as considerações anterioremente assinaladas. Uma diluição destas águas (épocas de chuvas) desloca levemente os pontos em sentido do campo de estabilidade de caolinita.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, G.A. - 1969 - Bacia do Maranhão, Geologia e Possibilidade de Petróleo. Relatório interno, Belém, PETROBRÁS-RENOR. 55 p.

BISCAYE, P. E. - 1965 - Mineralogy and Sedimentation of Recent Deep-Sea Clays in the Atlantic Ocean and Adjacent Seas and Oceans. Geol.Soc.Am.Bull. 76: 803-832.

BITTENCOURT, L.A.V. - 1980 - Aspectos Hidrogeoquímicos da Alteração Intempérica de Basaltos da Bacia do Paraná: Bacia Hidrográfica de Jacutinga (PR). Rev.Bras.Geoc. 10:202-212.

BONIFAS, M. - 1959 - Contribution a L'Estude Geochemique de L' Alteration Lateritique. Memories du Service de la Carte Geologique d'Alsace et Lorraine, N. 17. 159p.

BRASIL - Conselho Interministerial do Programa Grande Carajás - 1981 - Programa Grande Carajás; Aspectos Físicos, Demográficos e Fundiários. Rio de Janeiro, N.P.

BRASIL - Departamento Nacional de Produção Mineral - 1973 - Projeto RADAM BRASIL; Folhas SB.23 Terezina. Rio de Janeiro. V. 2,33p.

BRINDLEY, G.W. - 1972 - Kaolin, Serpentine and Kindred Minerals In: The X-Ray Identification and Crystal Structures of Clay Minerals. London, Mineralogical Society (Clay Minerals Group), 544 p.

BRINDLEY, G.W. - 1981 - X-Ray Identification (With Auxiliary Techniques) of Clay Minerals. In: Lonstappe, F.J. Ed. Clay and the Resource Geologist. Calcary, Mineralogical Association of Canada, p. 23-38.

CHESWORTH, W.; DEJOU, J.; LARROCHE, P. - 1981 - The Weathering of Basalt and Relative Movilies of the major Elements at Belbex, France. Geochim. Cosmochim. Acta. 45: 1235-1244.

DAMOUS, N.R.L. - 1981 - Distribuição dos Elementos Si, Al, Fe , Ca, Mg, Ti, Cu, K e Na em Solos Desenvolvidos na Região do Granito Central da Serra dos Carajás - Sul do Estado do Pará. Tese de Mestrado em Geoquímica. Belém, UFPa/NCGG. 55p.

DAMOUS, N.R.L.; GOULART, A.T. - 1983 - Comportamento do Si, Al e Fe durante o Intemperismo Laterítico de Rochas Graníticas na Amazônia. Rev.Bras.Geoc. 13(2): 127-134.

DENNEN, W. H.; ANDERSON, P.J. - 1962 - Chemical Changes in Insi-

pient Rock Weathering. Geol.Soc.Am.Bull. 73:375-384.

FORMOSO, M.L.L.; PINTAUDE, D.A. - 1978 - Estudo da Alteração do Anortosito de Capivarita, Rio Pardo, RS. Rev.Bras.Geoc. 8: 180-205.

GARRELS, R.M.; CHRIST, C.L. - 1965 - Mineral, Solution and Equilibria. New York, Harper and Ram. 450 p.

GOLDICH, S.S.; - 1938 - A Study in Rock-Weathering. Jour.Geol . 46:17-58.

GOLDSCHMIDT, V.M. - 1954 - Geochemistry. London, Oxford Univ. Press. 730p.

GOULART, A.T. - 1980 - Intemperismo Químico de Rochas Graníticas na Zona Bragantina, Nordeste do Pará. Tese de Mestrado em Geoquímica. Belém, UFPa/NCGG. 47p.

GUIMARÃES, G. de A.; BASTOS, J.B.; LOPES, E. de C. - 1970 - Métodos de Análise Física, Química e Instrumental de Solos. Belém, IPEAN, V. 1, No 1. (Série: Química de Solos).

HELGESON, H.C. - 1969 a - Thermodinamics of Hidrotermal Systems at Elevated Temperatures and Pressures. Am. J.Sci. 267:729 - 804.

HELGESON, H.C. - 1969 b - Hanbook of Theoretical Activity Diagrams Depicting Chemical Equilibria in Geologic Systems Involving an Aqueous Phase at one atm and 0 tO 300 C. California , Freeman, Cooper. 253p.

KRAUSKOPF, K.B. - 1967 - Introduction to Geochemistry. New York, McGraw-Hill. 721p.

LEVI, F.; MELFI, A.J. - 1972 - Geochemical and Mineralogical Study of the Fisrt Stages of Weathering of basic and related rocks. Part 2 - Geochemical Study. Rev.Bras.Geoc. 2(1):1-7.

LEVINSON, A.A. - 1974 - Introduction to Exploration Geochemistry. Calcary, Applied Publishing. 614 p.

LOUGHNHAN, F.C. - 1969 - Chemical Weathering of Silicate Minerals. New York, Elsevier Pub. 154p.

MASON, B. - 1952 - Principles of Geochemistry. New York, Wiley . 310p.

MAXWELL, J.A. - 1968 - Rocks and Mineral Analysis. New York, Intercience Pub. 584p.

MELFI, A.J.; LEVI, F. - 1971 - Geochemical Study of the First Stages of Weathering of Basic and Related Rocks. Part 1 - Mineralogical Study - Rev.Bras.Geoc. 1(1): 22-28.

MESNER, J.C.; WOOLDRIDGE, L.C.P. - 1969 - Maranhão Paleozoic Basin and Cretaceous Coastal Basins, North Brazil: Bull.Am.Assoc. Petr.Geol. 43(9):1475-1512.

MONIS, A.C.; NASCIMENTO, A.C.; PAIVA NETTO, J.R. - 1973 - Mobilidade dos Constituintes de Rochas Básicas de São Paulo Durante o Intemperismo. Rev.Bras.Geoc. 3(3):201-213.

NORTON, A.A. - 1973 - Laterite and Bauxite Formation. Econ.Geol. 68:353-361.

OLIVEIRA, N.P. - 1977 - Fosfatos da Região de Santa Luzia (Nordeste do Estado do Pará). Tese de Mestrado em Geoquímica. Belém, UFPa/NCGG. 74 p.

OLIVEIRA, N.P.; SCHWAB, R.G. - 1980 - Um Exemplo da Influência do Fósforo sobre o Desenvolvimento de Perfis Lateríticos. In: Anais do XXXI Cong.Bras.Geol., Camboriú, Santa Catarina, V.1 , p. 184-192.

OLIVEIRA, S.M.B. de; TRESCASES, J.J. - 1980 - Geoquímica de Alteração Supergena das Rochas Ultramáficas de Santa Fé (Goiás , Brasil). Rev.Bras.Geoc. 10:243-257.

RANKAMA, K,; SAHAMA, T.G. - 1950 - Geochemistry. Chicago, University of Chicago. 912 p.

ROSLER, H.J.; LANGE, H. - 1972 - Geochemical Tables. Amsterdam , Elsevier Publishing. 468p.

SIAL, A.N. - 1975 - Petrologia e Química Mineral dos Basaltos Mesozóicos de Porto Franco e Grajaú, Maranhão. In: Atas do VII Simp.Geol., Fortaleza, p. 223-241.

SIGHNOLFI, G.P.; AZEVEDO, L.S.P; LINHARES, P.S.; MONIS, A.C. - 1973 - Mineralogical and Chemical Variations Induced by Tropical Weathering of Granulitic Rocks from the Brasiliam Basement. Rev.Bras.Geoc. 3(2):71-83.

STANDARD METHODS - 1575 - For Examination of Water and Waster . Washington, Am. Public. Health Ass. 1193. p.

WARSHAW, C.M.; ROY, R. - 1961 - Classification and Scheme for the Identification of Layer Silicates. Geol.Soc.Am.Bull. 72 (10): 1455-1492.

ANEXO 1 - Matriz de correlacão entre os elementos maiores e traços (número de amostras N=49)

SiO2	1.00																					
Al2O3	-0.12	1.00																				
Fe2O3	-0.85	0.18	1.00																			
FeO	9.51	-0.11	-0.79	-1.00																		
MgO	0.86	-0.24	-0.90	0.58	1.00																	
CaO	0.62	-0.14	-0.88	0.91	0.79	1.00																
Na2O	0.59	-0.17	-0.79	0.63	0.81	0.86	1.00															
K2O	0.71	-0.19	-0.64	0.19	0.75	0.39	0.54	1.00														
TiO2	-0.68	0.18	-0.82	-0.45	-0.77	-0.63	-0.65	0.63	1.00													
P2O5	-0.49	-0.03	0.25	-0.01	-0.36	-0.00	0.05	-0.40	0.27	1.00												
MnO2	-0.57	0.06	0.41	-0.17	-0.44	-0.22	-0.25	-0.30	0.47	0.52	1.00											
Rb	0.32	-0.19	-0.25	-0.03	0.24	-0.01	0.04	0.60	-0.20	-0.29	-0.12	1.00										
Y	-0.41	-0.04	0-32	-0.26	-0.41	-0.29	-0.26	-0.30	0.26	0.62	0.38	0.18	1.00									
Nb	-0.65	0.02	0.39	0.11	-0.53	-0.05	-0.14	-0.58	0.59	0.73	0.60	-0.25	0.47	1.00								
CO	-0.76	0.01	0.58	-0.36	-0.64	-0.42	-0.33	-0.48	0.44	0.70	0.69	-0.19	0.65	0.68	1.00							
Ni	-0.69	0.03	0.52	-0.43	-0.54	-0.46	-0.36	-0.31	0.27	0.52	0.49	0.08	0.73	0.46	0.85	1.00						
Zn	-0.33	-0.03	0.26	-0.23	-0.32	-0.26	-0.26	0.21	0.19	0.45	0.29	0.22	0.91	0.37	0.48	0.67	1.00					
V	-0.01	0.22	0.07	0.11	-0.18	-0.01	-0.23	-0.18	0.17	-0.30	-0.12	-0.04	-0.34	-0.02	-0.37	-0.37	-0.26	1.00				
Cu	-0.67	-0.02	0.51	-0.35	-0.54	-0.38	-0.30	-0.40	0.38	0.69	0.54	0.03	0.88	0.62	0.85	0.89	0.78	-0.45	1.00			
Zr	-0.76	0.09	0.74	-0.34	-0.75	-0.49	-0.48	-0.62	0.84	0.50	0.52	-0.23	0.31	0.79	0.66	0.46	0.19	0.01	0.56	1.00		
Cr	0.48	-0.09	-0.29	-0.13	0.51	0.06	0.23	0.60	0.36	-0.43	-0.18	0.21	-0.34	-0.66	-0.38	-0.24	-0.24	-0.36	-0.32	-0.45	1.00	
Sr	0.64	-0.14	-0.74	0.58	0.82	0.78	0.74	0.50	0.59	-0.20	-0.24	0.08	0.34	-0.27	-0.53	-0.50	-0.28	0.06	-0.48	-0.59	0.23	1.00
Ba	0.00	0.01	0.20	-0.24	-0.05	-0.27	-0.30	0.26	-0-06	-0.33	-0.01	-0.55	0.14	-0.27	-0.07	0.12	0.16	0.17	-0.03	-0.25	0.05	-0.02	1.00
	SiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	MnO2	Rb	Y	Nb	Co	Ni	Zn	V	Cu	Zr	Cr	Sr	Ba

Correlação positiva (em ordem decrescente) entre os óxidos e os elementos

SiO2	TiO2	CaO	Sr	NaO2	Sr	Rb	Zr	Nb	Co	Zn	Zr	Ni	Cu	Cu
K2O	Zr	Na2O	NaO2	Sr	K2O	Cr	Nb	Co	Nb	Cu	Co	Cu	Zn	
Sr	Co	MgO	CaO			Sr	MnO2	Cu	Cu	Ni	Cu	Zr	Zr	
CaO	Ni	Sr	K2O					Y	Zr	Co	Ni	Zn		
Na2O	Cu		Cu					MnO2	Ni	Nb	Zr			
FeO	MnO2							Ni	Y	Zr				
Cr							Zr							
								Zn						