



Universidade Federal do Pará
Centro de Geociências
Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

EVOLUÇÃO MINERALÓGICA E GEOQUÍMICA MULTI-ELEMENTAR DE PERFIS DE SOLOS SOBRE LATERITOS E GOSSANS NA AMAZÔNIA

TESE APRESENTADA POR

ADRIANA MARIA COIMBRA HORBE

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Ciências na
Área de GEOQUÍMICA

Data de Aprovação 31 / 07 / 1995

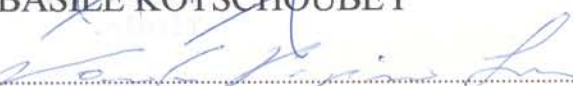
Comitê de Tese:


MARCONDES LIMA DA COSTA (Orientador)


BHASKARA RAO ADUSUMILLI


CLÁUDIO GERHEIM PORTO


BASILE KOTSCHOUBEY


VANDA PORPINO LEMOS

BELÉM

"Faço o melhor que sei, o melhor que posso,
e o faço até o final. Se ao fim tudo deu certo,
o que dizem contra mim não importa. Se o fim
resulta num erro total, dez anjos sussurrando
em meus ouvidos que eu estava certo não farão
a menor diferença." (Abraham Lincoln)

AGRADECIMENTOS

Quero expressar meus agradecimentos as várias pessoas que colaboraram para a execução desta tese, com destaque para o Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa que a orientou.

Aos Profs. Drs. Vandda Porpino Lemos, Baskara Rao Adusumilli, Claudio Gerheim Porto e Basile Kotschoubey, membros da banca examinadora.

Agradeço ao Prof. Dr. Thomas Scheller que desenvolveu o software "DIAG" com o qual foi possível fazer os gráficos e montar as figuras apresentadas.

Ao Sr. Natalino Valente, químico responsável pelo laboratório de análises químicas, pelo auxílio na parte analítica e ao Sr. Eder Silva.

Ao geólogo Hilton Túlio Costi pela revisão final do texto.

Aos colegas Elias Leão Moraes, Sandra Lia Correia de Almeida, Walmeire Costa, Dirse Clara Kern, Gloria Prieto, Rômulo Simões Angélica, Sergio Coelho, Carlos Cassini, Newton Costa e Lucindo Fernandes Filho, pelo incentivo e discussões sobre os processos lateríticos.

Aos laboratórios de microsonda eletrônica da UFBA e da UNB na pessoa do Prof. Dr. Manoel Jerônimo Cruz e José Gaspar, respectivamente.

Ao CNPq e PADCT que deu o apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Por último porém não menos relevante, a minha família, em especial ao Marco.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	I
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	V
LISTA DE TABELAS.....	IX
RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	3
 1- INTRODUÇÃO.....	 5
1.1 - PROBLEMÁTICA E OBJETIVOS.....	5
1.2 - OS PERFIS ESTUDADOS.....	9
1.2.1 - Localização.....	9
1.2.2 - Aspectos Fisiográficos.....	11
 2- MATERIAIS E MÉTODOS.....	 13
2.1 - AMOSTRAGEM.....	13
2.2 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	15
2.3 - ANÁLISES MINERALÓGICAS E MICROMORFOLÓGICAS.....	16
2.4 - CÁLCULO DE DENSIDADE.....	17
2.5 - ANÁLISES DE MICROSSONDA ELETRÔNICA.....	17
2.6 - ANÁLISES QUÍMICAS.....	18
2.7 - BALANÇO DE MASSA.....	18
2.8 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO.....	19
 3- PERFIL INTEMPÉRICO SOBRE CROSTA LATERÍTICA FERRO-ALUMINOSA MATURA - N5.....	 20
3.1 - ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	20
3.2 - CARACTERÍSTICAS MICROMORFOLÓGICAS.....	24
3.2.1 - Crosta Sã.....	24
3.2.2 - Crosta Parcialmente Intemperizada.....	25
3.2.3 - Crosta Intemperizada.....	27
3.2.4 - Solo.....	28
3.2.5 - Sequência de Alteração da Crosta Sã até os Solos	28
3.3 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA.....	32
3.3.1 - Conteúdo de Alumínio nas Goethitas.....	32
3.4 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.....	35
3.4.1 - Composição Química Geral.....	35
3.4.1.1 - Composição Química dos Componentes que Constituem a Crosta e seus Relictos.....	42
3.4.2 - Elementos-Traço.....	45
3.4.2.1 - Elementos Terras Raras (ETR).....	51
3.5 - BALANÇO DE MASSA E CONCLUSÕES.....	56
 4 - PERFIL INTEMPÉRICO SOBRE GOSSAN E CROSTA LATERÍTICA FERRO- ALUMINOSA MATURA - IGARAPÉ BAHIA.....	 61
4.1 - ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	61
4.2 - CARACTERÍSTICAS MICROMORFOLÓGICAS.....	66
4.2.1 - Crosta Parcialmente Intemperizada.....	66

4.2.2 - Crosta Intemperizada.....	68
4.2.3 - Solo.....	70
4.2.4 - Sequência de Alteração da Crosta ao Solo	70
4.3 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA.....	72
4.3.1 - Conteúdo de Alumínio nas Goethitas.....	78
4.4 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.....	81
4.4.1 - Composição Química Geral.....	81
4.4.1.1 - Composição Química dos Componentes que Constituem a Crosta e seus Relictos.....	86
4.4.2 - Elementos-Traço.....	92
4.4.2.1 - Elementos Terras Raras (ETR).....	100
4.5 - BALANÇO DE MASSA E CONCLUSÕES.....	106
5- PERFIL INTEMPÉRICO SOBRE CROSTA LATERÍTICA ALUMINOSA MATURA - CAMOAI.....	109
5.1 - ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	109
5.2 - CARACTERÍSTICAS MICROMORFOLÓGICAS.....	113
5.2.1 - Crosta Sã.....	113
5.2.2 - Crosta Parcialmente Intemperizada.....	113
5.2.3 - Crosta Intemperizada.....	113
5.2.4 - Solo.....	115
5.2.5 - Sequência de Alteração da Crosta Sã até os Solos	115
5.3 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA.....	116
5.4 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.....	119
5.4.1 - Composição Química Geral.....	119
5.4.1.1 - Composição Química dos Componentes que Constituem a Crosta e seus Relictos.....	123
5.4.2 - Elementos-Traço.....	129
5.4.2.1 - Elementos Terras Raras (ETR)	134
5.5 - BALANÇO DE MASSA E CONCLUSÕES.....	136
6- PERFIL INTEMPÉRICO SOBRE CROSTA LATERÍTICA SÍLICO-FERRUGINOSA IMATURA - OUTEIRO E MOSQUEIRO.....	142
6.1 - ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	142
6.2 - CARACTERÍSTICAS MICROMORFOLÓGICAS.....	145
6.2.1 - Crosta Sã (Perfil de Mosqueiro).....	145
6.2.2 - Crosta Parcialmente Intemperizada (Perfil de Outeiro).....	147
6.2.3 - Crosta Intemperizada (Perfil de Outeiro).....	147
6.2.4 - Solo.....	147
6.2.5 - Sequência de Alteração da Crosta Sã até os Solos.....	147
6.3 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA.....	148
6.3.1 - Conteúdo de Alumínio nas Goethitas.....	151
6.4 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.....	151
6.4.1 - Composição Química Geral.....	151
6.4.2 - Elementos-Traço.....	154
6.4.2.1 - Elementos Terras Raras (ETR).....	161
6.5 - BALANÇO DE MASSA E CONCLUSÕES.....	168
7 - PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DAS CROSTAS EM SOLOS.....	172
7.1 - ESTRUTURAÇÃO DOS PERFIS EM HORIZONTES.....	172
7.2 - TRANSFORMAÇÕES MINERALÓGICAS E QUÍMICAS.....	175

7.3 - POPULAÇÕES GEOQUÍMICAS.....	181
7.4 - CORRELAÇÃO COM A ARGILA DE BELTERRA.....	188
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	191
ANEXOS.....	205

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1:	Mapa de localização dos perfis estudados.....	10
Figura 2.1:	Tipos de materiais amostrados.....	14
Figura 3.1:	Localização da área de solos e das crostas ferro-aluminosas no platô de N5	21
Figura 3.2:	Perfil de alteração da crosta ferro-aluminosa de N522	
Figura 3.3:	Aspecto macroscópico da crosta sã do perfil 1 de N523	
Figura 3.4:	Idem foto 3.1 mas no perfil 2 de N5.....	23
Figura 3.5:	Aspecto nodular da crosta parcialmente desagregada do perfil 1.....	23
Figura 3.6:	Idem foto 3.3 mas no perfil 2 de N5.....	23
Figura 3.7:	Fragmentos da crosta intemperizada.....	23
Figura 3.8:	Aspecto micromorfológico da crosta parcialmente ...	26
Figura 3.9:	Sequência esquemática do intemperismo da crosta em direção ao solo, com base na estruturação do perfil e nos aspectos micromorfológicos de N5.....	29
Figura 3.10:	Composição mineralógica média do perfil de N5.....	31
Figura 3.11:	Correlação caolinita+hematita (K+H) versus gibbsita +goethita (GIB+GOE) nos perfis 1 e 2 de N5.....	33
Figura 3.12:	Moles % de AlOOH das goethitas ao longo do perfil 1.....	34
Figura 3.13:	Distribuição da composição química dos perfis de N5 por horizontes.....	37
Figura 3.14:	Distribuição da composição química dos perfis de N5.....	39
Figura 3.15:	Correlação Fe ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ dos perfis de N5.....	40
Figura 3.16:	Diagrama SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₄ nos perfis de N5.....	41
Figura 3.17:	Distribuição dos teores de SiO ₂ , Al ₂ O ₃ e Fe ₂ O ₃ obtidos por microsonda em um nódulo e sua auréola externa da crosta parcialmente intemperizada.....	43
Figura 3.18:	Distribuição dos elementos-traço, por horizontes, nos perfis de N5	47
Figura 3.19:	Distribuição dos elementos-traço entre os materiais dos perfis de N5.....	49
Figura 3.20:	Distribuição dos elementos-traço na crosta parcialmente intemperizada e na crosta sã.....	50
Figura 3.21:	Diagrama V-Ni-Zr dos perfis de N5.....	52
Figura 3.22:	Distribuição dos ETR por horizontes no perfil 1 de N5.....	54
Figura 3.23:	Normalização dos ETR em relação aos condritos no perfil 1 de N5.....	55
Figura 3.24:	Normalização dos ETR em relação à crosta sã (A) e da matriz argilosa em relação ao relicto (B) na crosta intemperizada do perfil 1 de N5.....	57
Figura 4.1:	Mapa de localização da área mineralizada do Igarapé Bahia com individualização dos solos amarelos e vermelhos.....	62
Figura 4.2:	Perfis de alteração da crosta ferro-aluminosa do Igarapé Bahia.....	63
Figura 4.3:	Fragmento de gossan de cor cinza.....	65
Figura 4.4:	Fragmento de metapelito lateritizado com aspecto nodular.....	65
Figura 4.5:	Aspecto nodular dos fragmentos de crosta.....	65

Figura 4.6:	Aspecto dos nódulos de gossan	67
Figura 4.7:	Aspecto dos nódulos de metapelito	67
Figura 4.8:	Relictos de gossan envolvidos pelo plasma ferruginoso marrom avermelhado.....	69
Figura 4.9:	Relictos de metapelito formados por plasma marrom- avermelhado	69
Figura 4.10:	Relictos de gossan onde se individualizam um núcleo ferruginoso com bordas porosas imersos no plasma ferruginoso avermelhado que constitui o solo.....	71
Figura 4.11:	Sequência esquemática do intemperismo da crosta em direção ao solo, no Igarapé Bahia com base na estruturação do perfil e nos seus aspectos micromorfológicos.....	72
Figura 4.12:	Composição mineralógica dos materiais que compõe o perfil 1 do Igarapé Bahia.....	75
Figura 4.13:	Composição mineralógica dos perfis 2 e 3 do Igarapé Bahia.....	76
Figura 4.14:	Correlação caolinita+hematita (K+H) e gibbsita+ goethita (GIB+GOE) nos três perfis do Igarapé Bahia.....	77
Figura 4.15:	Conteúdo de AlOOH nas goethitas dos perfis do Igarapé Bahia.....	79
Figura 4.16:	Distribuição da composição química por horizontes nos materiais do perfil 1 do Igarapé Bahia	83
Figura 4.17:	Distribuição da composição química por tipo de material ao longo do perfil 1 do Igarapé Bahia.....	84
Figura 4.18:	Distribuição da composição química por horizontes nos perfis 2 e 3 do Igarapé Bahia.....	85
Figura 4.19:	Distribuição da composição química dos perfis 2 e 3 do Igarapé Bahia.....	87
Figura 4.20:	Correlação Fe ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ nos três perfis do Igarapé Bahia.....	88
Figura 4.21:	Diagrama SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₄ dos três perfis do Igarapé Bahia.....	89
Figura 4.22:	Distribuição dos teores de SiO ₂ , Al ₂ O ₃ e Fe ₂ O ₃ obtidos por microsonda na crosta parcialmente intemperizada do perfil 2.....	91
Figura 4.23:	Distribuição dos elementos-traço nos materiais ao longo do perfil 1 do Igarapé Bahia.....	94
Figura 4.24:	Distribuição dos elementos-traço por tipo de material no perfil 1 do Igarapé Bahia.....	96
Figura 4.25:	Distribuição dos elementos-traço nos horizontes dos perfis 2 e 3 do Igarapé Bahia.....	97
Figura 4.26:	Distribuição dos elementos-traço nos perfis 2 e 3 do Igarapé Bahia.....	98
Figura 4.27:	Distribuição dos elementos-traço no cimento e nos nódulos dos relictos da crosta parcialmente intemperizada.....	99
Figura 4.28:	Diagrama V-Ni-Zr e V-Ni-B do Igarapé Bahia.....	101
Figura 4.29:	Distribuição dos ETR no perfil 3 do Igarapé Bahia	102
Figura 4.30:	Normalização dos ETR em relação aos condritos nos perfis 1 e 3 do Igarapé Bahia.....	104

Figura 4.31:	Normalização dos ETR em relação a crosta parcialmente intemperizada do perfil 3 do Igarapé Bahia.....	105
Figura 5.1:	Perfil de alteração da crosta aluminosa de Camoaí.....	110
Figura 5.2:	Aspecto macroscópico da crosta sã	111
Figura 5.3:	Fragmentos da crosta intemperizada.....	111
Figura 5.4:	Fragmentos da crosta intemperizada onde se identificam os nódulos ferruginosos e os nódulos do fácies rosado cimentados pelo fácies creme.....	111
Figura 5.5:	Plasma gibbsítico, microcristalino, leitoso da crosta sã.....	114
Figura 5.6:	Contato difuso entre o nódulo ferruginoso e o fácies creme.....	114
Figura 5.7:	Sequência esquemática do intemperismo da crosta em direção ao solo em Camoaí, com base na estruturação do perfil e nos aspectos micromorfológicos.....	116
Figura 5.8:	Composição mineralógica do perfil de Camoaí.....	118
Figura 5.9:	Correlação da gibbsita (GIB) versus caolinita + quartzo (K+Q) no perfil de Camoaí.....	120
Figura 5.10:	Distribuição da composição química por horizontes do perfil de Camoaí.....	122
Figura 5.11:	Distribuição da composição química do perfil de Camoaí.....	124
Figura 5.12:	Correlação SiO ₂ e Al ₂ O ₃ no perfil de Camoaí.....	125
Figura 5.13:	Diagrama SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃ do perfil de Camoaí.....	126
Figura 5.14:	Distribuição de SiO ₂ , Al ₂ O ₃ e Fe ₂ O ₃ obtidos por microsonda nos relictos do perfil de Camoaí.....	127
Figura 5.15:	Distribuição dos elementos-traço por horizontes no perfil de Camoaí.....	130
Figura 5.16:	Distribuição dos elementos-traço entre os materiais do perfil de Camoaí.....	132
Figura 5.17:	Distribuição dos elementos-traço nos materiais que constituem os relictos do perfil de Camoaí.....	133
Figura 5.18:	Diagramas V-Ni-Zr e V-Ni-Mn no perfil de Camoaí.....	135
Figura 5.19:	Distribuição dos ETR por horizontes no perfil de Camoaí.....	137
Figura 5.20:	Normalização dos ETR em relação ao relicto aos condritos no perfil de Camoaí.....	138
Figura 5.21:	Normalização dos ETR em relação ao relicto da crosta parcialmente intemperizada no perfil de Camoaí.....	139
Figura 6.1:	Perfis de alteração da crosta sílico-ferruginosa de Outeiro e Mosqueiro.....	143
Figura 6.2:	Fragmentos colunares da crosta porosa de Outeiro.....	144
Figura 6.3:	Aspecto da crosta sã, porosa de Mosqueiro.....	144
Figura 6.4:	Aspecto mosqueado da base do solo do perfil de Mosqueiro.....	144
Figura 6.5:	Aspecto mosqueado da porção intermediária do solo do perfil de Mosqueiro.....	144
Figura 6.6:	Crosta sã de Mosqueiro constituída por grãos de quartzo sub-arredondados e angulosos cimentados por plasma ferruginoso preto.....	147

Figura 6.7:	Relictos da crosta parcialmente intemperizada de Outeiro formados por grãos de quartzo cimentados por plasma ferruginoso preto.....	147
Figura 6.8:	Sequência esquemática do intemperismo da crosta em direção ao solo em Outeiro e Mosqueiro com base na estruturação do perfil e nos aspectos micromorfológicos.....	148
Figura 6.9:	Composição mineralógica dos perfis de Outeiro e Mosqueiro.....	150
Figura 6.10:	Correlação hematita+goethita (H+GOE) e caolinita +quartzo (K+Q) nos perfis de Outeiro e Mosqueiro.....	152
Figura 6.11:	Distribuição da composição química por horizontes dos perfis de Outeiro e Mosqueiro.....	155
Figura 6.12:	Distribuição da composição química dos perfis de Outeiro e Mosqueiro.....	156
Figura 6.13:	Diagrama SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃ dos perfis de Outeiro e Mosqueiro.....	157
Figura 6.14:	Correlação Fe ₂ O ₃ e SiO ₂ nos perfis de Outeiro e Mosqueiro.....	158
Figura 6.15:	Distribuição dos elementos-traço nos horizontes dos perfis de Outeiro e Mosqueiro.....	160
Figura 6.16:	Distribuição dos elementos-traço nos perfis de Outeiro e Mosqueiro.....	162
Figura 6.17:	Distribuição dos elementos-traço nas manchas de solo de Mosqueiro.....	163
Figura 6.18:	Diagramas V-Ni-Zr e V-Ni-B nos perfis de Outeiro e Mosqueiro.....	164
Figura 6.19:	Distribuição dos ETR por horizonte nos perfis de Outeiro e Mosqueiro.....	166
Figura 6.20:	Normalização dos ETR em relação aos condritos nos perfis de Outeiro e Mosqueiro.....	167
Figura 6.21:	Normalização dos ETR em relação aos relictos e a crosta sã nos perfis de Outeiro e Mosqueiro.....	169
Figura 7.1:	Esquema de transformação textural dos perfis de alteração estudados.....	173
Figura 7.2:	Diagramas quartzo-gibbsita-hematita+goethita, SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃ e V-Ni-Zr dos perfis estudados....	176
Figura 7.3:	Evolução esquemática mineralógico-geoquímica dos perfis estudados.....	177
Figura 7.4:	Distribuição da composição química dos solos dos perfis estudados.....	182
Figura 7.5:	Distribuição dos elementos-traço nos solos dos perfis estudados.....	183
Figura 7.6:	Diagrama SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃ com definição dos campos das crostas lateríticas e dos solos.....	184
Figura 7.7:	Representação gráfica das cargas dos fatores principais da análise fatorial modo Q.....	186
Figura 7.8:	Gráfico da análise de discriminante.....	187

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Distribuição das amostras coletadas	13
Tabela 2.2:	Procedimentos para a quantificação mineralógica.....	17
Tabela 3.1:	Composição mineralógica dos perfis de N5.....	29
Tabela 3.2:	Moles % de Al_2O_3 , fórmula mínima e teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 nas goethitas dos perfis de N5.....	35
Tabela 3.3:	Composição química dos perfis de N5.....	36
Tabela 3.4:	Composição química da crosta sã, obtida por micros- sonda eletrônica.....	42
Tabela 3.5:	Concentração dos elementos-traço nos dois perfis de N5.....	46
Tabela 3.6:	Concentração dos elementos terras raras no perfil 1 de N5.....	53
Tabela 3.7:	Balanco de massa dos perfis de N5.....	59
Tabela 4.1:	Composição mineralógica dos perfis 1, 2 e 3 do Igarapé Bahia	73
Tabela 4.2:	Moles % de Al_2O_3 , fórmula mínima e teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 nas goethitas dos perfis do Igarapé Bahia.....	78
Tabela 4.3:	Composição química dos perfis do Igarapé Bahia	81
Tabela 4.4:	Composição química dos relictos de gossan obtida por microsonda	90
Tabela 4.5:	Composição dos elementos-traço nos perfis do Igarapé Bahia	93
Tabela 4.6:	Concentração dos elementos terras raras nos perfis 1 e 3 do Igarapé Bahia.....	103
Tabela 4.7:	Balanco de massa dos perfis do Igarapé Bahia.....	107
Tabela 5.1:	Composição mineralógica do perfil de Camoá.....	117
Tabela 5.2:	Composição química do perfil de Camoá	121
Tabela 5.3:	Concentração dos elementos-traço no perfil de Camoá.....	129
Tabela 5.4:	Concentração dos elementos terras raras no perfil de Camoá	134
Tabela 5.5:	Balanco de massa do perfil de Camoá.....	140
tabela 6.1:	Composição mineralógica dos perfis de Outeiro e Mosqueiro.....	149
Tabela 6.2:	Composição química dos perfis de Outeiro e Mosqueiro	153
Tabela 6.3:	Concentração dos elementos-traço nos perfis de Outeiro e Mosqueiro	159
Tabela 6.4:	Concentração dos elementos terras raras nos perfis de Outeiro e Mosqueiro	165
Tabela 6.5:	Balanco de massa dos perfis de Outeiro e Mosqueiro.....	170

RESUMO

Para estudar a gênese dos solos desenvolvidos sobre crostas lateríticas foram selecionados cinco perfis, localizados na região de Carajás (N5 e Igarapé Bahia) e nos municípios de Paragominas (Mina de Camoá) e Belém (balneários de Outeiro e Mosqueiro), todos no Estado do Pará.

A estruturação dos cinco perfis (N5, Igarapé Bahia, Camoá, Outeiro e Mosqueiro) permitiu individualizar quatro horizontes: crosta sã, crosta parcialmente intemperizada, crosta intemperizada e solo. A crosta sã é compacta, vacuolar, constituída por óxi-hidróxidos de Fe e Al. A crosta parcialmente intemperizada compõe-se por relictos da crosta sã envolvidos por uma matriz argilosa amarelada ou avermelhada, dependendo da composição mineralógica da crosta sã. A crosta intemperizada caracteriza-se pela predominância da matriz argilosa em relação a seus relictos enquanto o solo é formado exclusivamente por material argiloso. A estruturação dos perfis mostra que a passagem da crosta sã para o solo sobreposto é gradual, havendo expansão de volume no início da fragmentação e posterior colapso do perfil, quando os relictos se transformam totalmente em um material terroso e microagregado.

Os perfis de N5 e Igarapé Bahia são derivados a partir de uma crosta ferro-aluminosa matura. Caracterizam-se pelos teores mais elevados de caolinita e hematita na crosta e seus relictos. No solo concentram-se a gibbsita, Al-goethita e anatásio com tendência a formação de um solo inicialmente bauxítico, que passa a caolínítico em direção ao topo do perfil. No Igarapé Bahia tem-se acúmulo de quartzo no solo. Quimicamente observa-se que a modificação mineralógica leva a um decréscimo nos teores de Fe_2O_3 e SiO_2 e aumento de Al_2O_3 , TiO_2 e PF. Os elementos-traço (V, Cr, Ni, B, Mo, Zr, Ga, Sc, Y, Mn, Cu e Pb, além de Au no perfil do Igarapé Bahia) e os ETR mostram concentração de B e Zr, enquanto os demais tendem a serem diluídos da crosta para o solo. O balanço isotitânico mostra que a transformação da crosta em solo se dá por lixiviação de SiO_2 e Fe_2O_3 nos dois perfis, enquanto o Al_2O_3 se enriquece no perfil de N5 e é lixiviado no perfil do Igarapé Bahia.

A formação do solo de Camoá, a partir de crosta aluminosa matura, difere dos perfis de N5 e Igarapé Bahia pela diminuição nos teores de gibbsita e aumento nos de caolinita e quartzo, enquanto os teores de hematita, goethita e anatásio, muito baixos, não tem variação significativa. Acompanhando a composição mineralógica tem-se diminuição nos teores de Al_2O_3 e aumento nos de SiO_2 , enquanto os de Fe_2O_3 e TiO_2 , muito baixos, não tem uma distribuição característica. Os elementos-traço e os ETR, com teores bem mais baixos que nos demais perfis, mostram aumento de Zr e Mn em direção ao solo e diluição dos demais elementos. Em Camoá a transformação da crosta aluminosa em solo, segundo o balanço isotitânico, dá-se pela lixiviação de Al_2O_3 e enriquecimento em SiO_2 e Fe_2O_3 .

Nos perfis de Outeiro e Mosqueiro, derivados de crostas lateríticas sílico-ferruginosas imaturas, a formação do solo se dá com diminuição nos teores de hematita+goethita, de modo que no

solo predominam quartzo e caolinita. Consequentemente tem-se decréscimo nos teores de Fe_2O_3 e aumento nos de SiO_2 e Al_2O_3 . A distribuição dos elementos-traço mostra, assim como em N5 e Igarapé Bahia, concentração de Zr e diluição dos demais. Com base no balanço isotópico a transformação da crosta dos perfis de Outeiro e Mosqueiro se dá pela lixiviação de Fe_2O_3 , enquanto o SiO_2 e o Al_2O_3 se enriquecem no perfil de Outeiro e são lixiviados no de Mosqueiro. Com base na estruturação dos perfis, na mineralogia e geoquímica, foi possível caracterizar um acentuado processo de desferrificação das crostas ferro-aluminosas e sílico-ferruginosas e de desaluminização das aluminosas, levando a geração de solos. Nos perfis derivados das crostas ferro-aluminosas e sílico-ferruginosas tem-se a substituição da hematita por Al-goethita, uma fase intermediária onde predomina gibbsita nos perfis ferro-aluminosos e, finalmente, caolinita no topo dos dois perfis. Em todos os perfis observou-se acúmulo em quartzo. O enriquecimento em quartzo e o provável aporte externo de SiO_2 , via decomposição de material vegetal, levou a neoformação da caolinita a partir da gibbsita nos perfis de N5, Igarapé Bahia e Camoá. Nos perfis de Outeiro e Mosqueiro a presença de caolinita no solo deve-se ao seu enriquecimento relativo a partir da crosta.

Como consequência da transformação mineralógica houve a lixiviação de ferro nos perfis de N5, Igarapé Bahia, Outeiro e Mosqueiro e de alumínio no de Camoá, além de V, Cr, Ni, Mo, Ga, Sc, Cu, Pb e ETR, forte enriquecimento em Zr e em parte de B e Mn em todos os perfis.

As transformações que levaram à quebra no equilíbrio das crostas, a sua desagregação e cominuição, formando relictos e uma nova fase mineral argilosa, são consequências da ação da matéria orgânica, que torna o ambiente mais ácido e menos oxidante, em um processo similar ao da formação de perfis intempéricos em ambiente tropical úmido. As diferenças mineralógicas e geoquímicas observadas entre os perfis são consequência das variações composicionais das crostas que, em parte, refletem também o seu grau de maturidade.

As características mineralógicas e geoquímicas dos solos nos perfis estudados permitem que eles sejam correlacionados a Argila de Belterra, podendo-se portanto admitir que a Argila de Belterra tem origem autóctone em relação as crostas lateríticas subjacentes.

ABSTRACT

With the aim of studying the genesis of soils developed on lateritic crusts, five profiles located in the region of Carajás (N5 and Igarapé Bahia prospects) as well as in Paragominas (Camoá Mine) and Belém (Mosqueiro and Outeiro Beaches) municipalities - all them located in Pará State, Brazil - have been selected.

Based on the structures described in the profiles (N5, Igarapé Bahia, Camoá, Outeiro and Mosqueiro), it has been possible to distinguish four different horizons: fresh crust, partially-weathered crust, weathered crust and soil. The fresh crust is compact, vacuolar and composed of iron and aluminium oxyhydroxides. The partially-weathered crust is made up of fresh-crust relicts enclosed in yellowish or reddish clayey matrix, depending on the mineralogical composition of the fresh crust. The weathered crust is characterized by dominance of clayey matrix in relation to relicts, while the soil is composed exclusively of clayey material. The structures of the profiles show that the change from fresh crust to the overlying soil is gradual with volume expansion at the beginning of the fragmentation process. This expansion is followed by the collapse of the profile as the relicts are entirely transformed into an earthy micro-aggregated material.

The profiles of N5 and Igarapé Bahia prospects have been derived from a mature iron-aluminous crust, being characterized by the highest contents of kaolinite and hematite either in the crust or in the relicts. Gibbsite, Al-goethite, anatase and quartz are concentrated in the soil, which tends to be initially bauxitic, at the base of the profile, and to become kaolinite-rich toward the top. The mineralogical changes led to chemical modifications such as decrease in Fe_2O_3 and SiO_2 and increase in Al_2O_3 , TiO_2 and PF. The trace elements (V, Cr, Ni, B, Mo, Zr, Ga, Sc, Y, Mn, Cu and Pb besides Au in the profile of Igarapé Bahia) and REE's exhibit concentrations of B and Zr whereas the remaining ones tend to be progressively diluted from the crust toward the soil. The TiO_2 -mass balance shows that the transformation of the crust into soil took place by means of leaching of SiO_2 and Fe_2O_3 in two profiles above mentioned, while Al_2O_3 underwent enrichment in the profile of N5 and leaching in the profile of Igarapé Bahia.

The soil formation from a mature aluminous crust in Camoá differs from those described in the profile of Igarapé Bahia and of N5 in that it shows a decrease in gibbsite contents and an increase in kaolinite and quartz, whereas the very low contents of hematite, goethite, and anatase do not present a characteristic distribution. The trace elements and the REE's, with contents much lower than those observed in the others profiles, show an increase in Zr and Mn toward the soil horizon and a dilution of the remaining ones. In the Camoá, the transformation of the aluminous crust into soil, based on the TiO_2 -mass balance, took place through leaching of Al_2O_3 and enrichment in SiO_2 and Fe_2O_3 .

In the profiles of Outeiro and Mosqueiro, derived from

immature silicoferruginous lateritic crust the soil formation occurred by means of decreasing in hematite+goethite so that, in the resulting soil, quartz and kaolinite predominate. In consequence of this, a decrease in the Fe_2O_3 contents and an increase in SiO_2 and Al_2O_3 have been observed in those profiles. The trace elements distribution presents, as in Igarapé Bahia, concentration of Zr and dilution of the remaining ones. Based on TiO_2 -mass balance, it could be noticed that the transformation of the crust in the profiles of Mosqueiro and Outeiro took place through leaching of Fe_2O_3 , whereas SiO_2 and Al_2O_3 underwent enrichment in the profile of Outeiro and Leaching in the one of Mosqueiro.

On the basis of structures, mineralogical composition and geochemical data of the profiles, it has been possible to characterize an accentuated process of Fe loss in the iron-aluminous and in the silicoferruginous crust as well as Al removal in the aluminous ones what led to soil generation. In the profiles derived from the iron-aluminous and the silicoferruginous crust, it has been observed substitution of hematite by Al-goethite, an intermediated segment - where there is predominance of gibbsite in the iron-aluminous profiles - and presence of kaolinite at the top of both profiles. In every profiles, it has been reported quartz accumulation. The enrichment in quartz and the SiO_2 - being the latter likely come from external sources via vegetable-material decay - caused the neoformation of kaolinite from gibbsite in the profiles of N5, Igarapé Bahia, and Camoai. In the profiles of Mosqueiro and Outeiro the kaolinite presence in the soil is a consequence of its relative enrichment in the relation to the crust from which it has been derived.

As a consequence of the mineralogical transformation, Fe has been leached from the profiles of N5, Igarapé Bahia, Mosqueiro, and Outeiro and Al from those of the Camoai, as well as V, Cr, Mo, Ga, Sc, Cu, Pb and REE's. On the other hand, a strong enrichment in Zr and, in part, in B and Mn has been reported in every studied profiles.

The transformations that caused the break down of the balance of the crusts, their dismantlement and comminution, forming relicts and a new clayey mineral phase, are consequence of organic matter influence which turns the environments conditions more acid and less oxidizing, in a process similar to that of weathering-profiles formation in humid tropical environments. The mineral and chemical difference observed between the profiles are consequence of compositional variation of the crusts which, in part, also reflect the degree of maturity of theirs.

The mineralogical and geochemical characteristics of the soils in the investigated profiles allow us to correlate them to the Belterra Clay and, in consequence of this, to admit that Belterra Clay had an autochthonous origin in relation to the underlying lateritic crusts.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - PROBLEMÁTICA E OBJETIVOS

Os lateritos e solos lateríticos cobrem 1/3 das áreas continentais emersas do globo (NAHON et al. 1989), concentrando-se fundamentalmente na zona intertropical (BARDOSSY, 1983).

Nessa zona, especialmente na África e Amazônia, a porção superior dos perfis lateríticos é formada por um material argilo-arenoso amarelo, amarelo-avermelhado ou vermelho, homogêneo, representando acumulação residual de Si, Al, Fe e Ti na forma de óxi-hidróxidos e silicatos formando solos pobres. Apresenta aspecto terroso, friável, sem estruturação visível, a não ser poros e fissuras interconectados, podendo alcançar até 20m de espessura (SUGDEN, 1984 e BARDOSSY & ALEVA, 1990).

Esse material, também chamado de Argila de Belterra (SOMBROECK, 1966), latossolos, solos lateríticos, ferralíticos ou oxissolos, tem sido motivo de estudo de vários pesquisadores.

Para SOMBROECK (1966), a Argila de Belterra teria origem sedimentar a partir da deposição de material andino, com idade terciária, em um lago de extensão amazônica. GRUBB (1979), KOTSCHOUBEY & TRUCKENBRODT (1981), HIERONYMUS et al. (1989) e TRUCKENBRODT et al. (1991) também compartilham a hipótese sedimentar, portanto alóctone, apesar da ausência de estruturas sedimentares.

DENNEN & NORTON (1977), ALEVA (1981) e KRONBERG et al. (1982) discutem a possibilidade do material argiloso ser originado por intensa lixiviação da porção superior da Formação Barreiras.

WOLF & SILVA (1973), LEPRUN (1979), BOULANGÉ & CARVALHO (1989); LUCAS et al. (1989), NAHON et al. (1989); BARDOSSY & ALEVA (1990), COSTA (1991a) e HORBE (1991) defendem a origem autóctone desse material, ou seja, ele seria produto de alteração intempérica de crostas lateríticas. Neste caso o material argiloso passa a formar solos.

TRUCKENBRODT & KOTSCHOUBEY (1981) denominam de Argila de Belterra apenas o material argiloso desenvolvido sobre perfis lateríticos com horizonte bauxítico. O material de origem sedimentar foi posteriormente transformado em latossolo (KOTSCHOUBEY & TRUCKENBRODT, 1994). Escorregamento e fluxo de lama em direção às regiões mais rebaixadas, a grandes distâncias, seriam os principais agentes da deposição dessa argila. HIERONYMUS et al. (1989) também sugerem origem alóctone para material semelhante que ocorre no topo da Serra de Trucará, baseado no arredondamento dos cristais de minerais pesados.

A origem autóctone do solo sugere que ele resulte da ressilicificação da crosta laterítica ferruginosa ou aluminosa sotoposta (DIVAKARARAO & MURALIDHAR, 1989; LUCAS et al, 1989 e BOULANGÉ & CARVALHO, 1989), em condições climáticas mais úmidas que as existentes quando da formação da crosta e similares às que ocorrem atualmente na Amazônia. Esse processo desestabiliza a crosta laterítica e permite a dissolução da gibbsita e formação de caolinita com a entrada de sílica (BUTTY & CHAPALLAZ, 1984 e COSTA, 1991a). Para MELFI & LEVI (1971) a ressilicificação da gibbsita é resultado de um intenso intemperismo. Simultaneamente ocorre desferruginização da crosta, transformando hematita em

Al-goethita (TARDY, 1993). Esse fenômeno está acontecendo atualmente na região amazônica e deve ter ocorrido ciclicamente no seu passado, desde o Terciário Médio, sendo o possível responsável pela formação dos extensos solos argilosos sobre platôs e em superfícies rebaixadas (COSTA, 1991a). A origem autóctone inclui, obviamente, movimento de massa a pequenas distâncias, principalmente ao longo das encostas, associado ao truncamento dos perfis por processos geomorfológicos de aplainamento.

Para NAHON et al. (1989) o solo é resultante da cominuição da crosta a partir das bordas dos platôs, sem modificação de seu arcabouço, assentando-se discordantemente sobre ela. A discordância é resultado de mudanças nas condições pedoclimáticas, gerando nova unidade com características químicas e físicas distintas (FRITSCH et al. 1986).

A vasta extensão areal desse solo (TRUCKENBRODT & KOTSCHOUBEY, 1981 e CHAUVEL et al. 1983), que se estende por quase toda a Amazônia, torna difícil supor zonas topograficamente mais elevadas com volume de material suficiente para gerar tal deposição. Para SUGDEN (1984) a total ausência de estratificação e sua textura porosa são incompatíveis com o processo mecânico de deposição.

Material semelhante é descrito por THOMAS (1974) na Nigéria e Zaire, associado à florestas tropicais e à crostas lateríticas ferruginosas desenvolvidas nas zonas de savanas e nos limites savana-floresta, caracterizando a associação desse material com o clima tropical chuvoso atual. O autor também sugere a origem autóctone para esse material.

A relação autóctone entre o solo e a crosta laterítica também é defendida por LEPRUN (1979), BEAUVAIS & TARDY (1993), BITTON & VOLKOFF (1993) e TARDY (1993) na África Central. Para esses autores o desmantelamento da porção superior da crosta laterítica ocorre tanto em climas mais secos, com cobertura de savana, como em climas úmidos com floresta tropical, associado à decomposição da matéria orgânica e à ação das raízes. Esse processo de retrabalhamento das crostas lateríticas leva à lixiviação do ferro, à perda da coesão do material e substituição da crosta por solo, com uma etapa intermediária de individualização de nódulos.

LECOMTE (1988) e LECOMTE & COLIN (1989) também observaram a existência de extensas coberturas argilosas no Gabão, de composição mineralógica semelhante aos solos amarelos da Amazônia e correlacionáveis aos perfis imaturos de COSTA (1991a). Segundo estes autores tais solos se desenvolveram a partir do intemperismo químico "in situ" da linha de pedras sotoposta, formada por fragmentos de crostas lateríticas.

FREYSSINET et al. (1990), FREYSSINET (1991) e ROQUIN et al. (1991) afirmam que os termitas seriam os responsáveis pela formação do solo sobre lateritos no oeste da África, auxiliando inclusive na dispersão do ouro.

Com base no exposto nota-se que o estudo de correlação deste material com a crosta laterítica subjacente ainda está a nível geral e não conclusivo e que trabalhos complementares, baseados em dados micromorfológicos, mineralógicos, químicos gerais e de detalhe, são necessários para a melhor definição dos processos

geoquímicos que levaram a sua formação.

O presente trabalho tem como objetivo determinar a relação geoquímica existente entre a crosta laterítica e gossânica e o solo sobreposto, com base na composição mineralógica e química, a nível de óxidos maiores, elementos-traço incluindo os terras raras. Dar-se-á ênfase tanto à amostra total como às diferentes fases que a compõem. Para este fim foram amostrados perfis de solos com evolução distinta (maturo e imaturo) desenvolvidos em várias áreas da Amazônia, visando obter-se a maior representatividade em relação aos processos de formação de solos sobre lateritos em regiões tropicais.

1.2 - OS PERFIS ESTUDADOS

1.2.1 - Localização

Para a realização do presente trabalho foram selecionados cinco perfis localizados em três áreas da Amazônia Oriental, a saber: N5, Igarapé Bahia, Camoáí, Outeiro e Mosqueiro (Figura 1.1).

Os perfis de N5 e Igarapé Bahia estão na região de Carajás, no sul do Estado do Pará, 150 km a sudoeste de Marabá, em áreas pertencentes a Companhia Vale do Rio Doce. Os perfis de N5 localizam-se ao longo da estrada de acesso ao núcleo urbano de Carajás, o do Igarapé Bahia na mina de ouro homônima. Em Paragominas, a NE do Pará, está situada a área de Camoáí. A região destaca-se economicamente pelas suas reservas de bauxita exploradas pela Companhia Brasileira de Bauxita, na mina de Camoáí, localizada a 80 km a sul da sede do município. O perfil

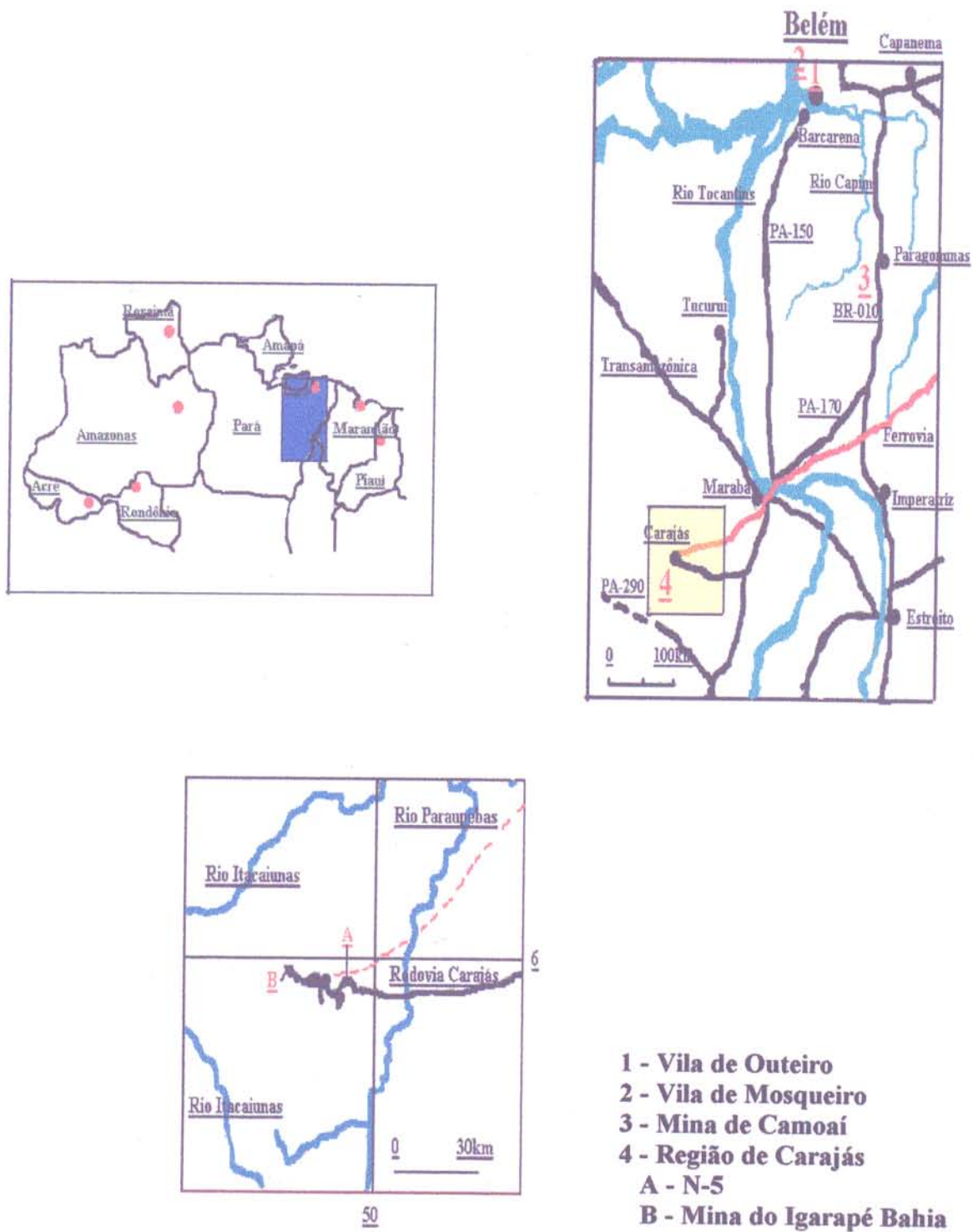


Figura 1.1: Mapa de localização dos perfis estudados

estudado situa-se na sua frente de lavra.

Na área de Outeiro e Mosqueiro, ilhas situadas no município de Belém, Estado do Pará, há excelentes exposições de perfis lateríticos imaturos em falésias. O perfil amostrado de Outeiro localiza-se entre as praias do Amor e Brasília e o de Mosqueiro na Baía do Sol.

1.2.2 - Aspectos Fisiográficos

Nos cinco perfis selecionados o solo é recoberto por floresta tropical e o clima é quente e úmido com duas estações contrastantes, uma mais seca, de junho a novembro, e a outra mais úmida no restante do ano.

A região de Carajás, com um índice pluviométrico de 1600mm/ano, apresenta a floresta entremeada por clareiras cobertas por vegetação do tipo savana. Essas clareiras se desenvolveram sobre as crostas lateríticas ferruginosas no alto dos platôs. O relevo se caracteriza por elevações em forma de platôs, com escarpas abruptas e vales encaixados, formando estruturas contínuas, denominadas de serras, com altitudes entre 600 e 800m.

O relevo da região de Paragominas é marcado por superfícies tabulares, rebaixadas, com vales pouco encaixados formando colinas e raros inselbergs. As altitudes variam entre 50 e 180m, sendo o índice pluviométrico de 2000mm/ano

Os perfis de Outeiro e Mosqueiro estão na linha da costa, formando falésias, com a base de seus perfis (rocha-mãe) sendo atingidas pela maré. O topo do perfil de Outeiro está entre 12 e 15m de altura, enquanto o de Mosqueiro, entre 4 e 6m em relação a

linha da praia. O índice pluviométrico é de 2700mm/ano.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - AMOSTRAGEM

O trabalho de campo consistiu na descrição detalhada e na coleta de amostras nos cinco perfis selecionados, num total de 42 amostras (Tabela 2.1). A amostragem, que foi pontual, visou obter material que caracterizasse os processos de intemperismo atual e subatual sobre as crostas lateríticas dos perfis selecionados. Para tanto foram tomadas amostras que representassem esses processos desde a crosta sã, onde o intemperismo ainda não atuou ou está a nível incipiente, até o solo.

Tabela 2.1: Distribuição das amostras coletadas segundo os perfis e respectivos horizontes

PERFIS	CROSTA SÃ	CROSTA PARCIALMENTE INTENPERIZADA	CROSTA INTENPERIZADA	SOLO	TOTAL DE AMOSTRAS
N5	2	2	2	3	9
Bahia		5	5	4	14
Campoáí	1	1	1	2	5
Outeiro		1	1	5	7
Mosqueiro	1			6	7

Os materiais amostrados são heterogêneos, geralmente formados por matriz argilosa e uma porção mais compacta e grosseira denominada de relicto (Figura 2.1). Nos cinco perfis estudados foram identificados os seguintes tipos de matrizes:

a- areno-argilosa avermelhada

b- argilosa avermelhada

c- argilosa amarelada

d- areno-argilosa amarelada

e os seguintes tipos de relictos:

- a- de crosta ferro-aluminosa
- b- de crosta aluminosa
- c- de crosta sílico-aluminosa
- d- de gossan
- e- de metapelito

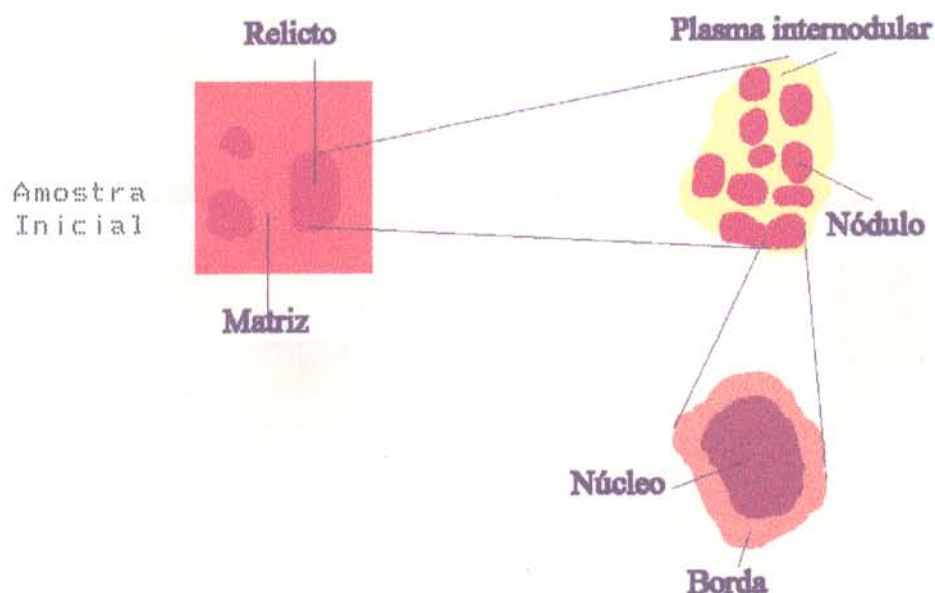


Figura 2.1: Tipos de materiais amostrados

O relicto, por sua vez, pode ser homogêneo ou com estrutura nodular. Quando nodular, é formado por uma porção subesférica, aqui denominada de nódulo, e por um plasma internodular que agrega esses nódulos (Figura 2.1). Foram identificados os seguintes tipos de nódulos:

- a- de crosta ferro-aluminosa
- b- de crosta aluminosa
- c- de gossan
- d- de metapelito

e os seguintes tipos de plasma internodular:

- a- gibbsítico ferruginoso
- b- gibbsítico porcelanado

Cada nódulo é formado ainda por uma zona interna e mais compacta, denominada de núcleo, e uma zona externa, porosa, constituindo a borda do nódulo (Figura 2.1).

Cada tipo de material identificados na figura 2.1 foi amostrado separadamente.

2.2 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após a coleta, as amostras foram secas ao sol, descritas e divididas em fração mais grosseira ($>2\text{mm}$), compreendendo os relictos, e em fração fina ($<2\text{mm}$), compreendendo as matrizes argilosas e os solos. Os relictos foram separados manualmente e lavados; as matrizes argilosas e os solos foram quarteados. Relictos, matrizes e solos foram, posteriormente, pulverizados separadamente em um moinho e quarteados novamente. Os diferentes materiais que formam os relictos (nódulos e plasma internodular) foram pulverizados em gral de ágata, gerando mais 14 amostras.

Deve-se ressaltar que somente no perfil de N5 foi obtida amostra total, isto é, relictos e matriz argilosa da crosta intemperizada formando uma única amostra, posteriormente analisados individualmente. Nos demais perfis não foi obtida uma amostra total, sendo analisados separadamente os relictos e as matrizes argilosas. A metodologia foi modificada em função da granulometria muito grossa dos relictos, o que faria com que as análises químicas fossem pouco representativas do conjunto e não caracterizassem a transição entre as crostas e os solos, o que é o objetivo deste trabalho.

2.3 - ANÁLISES MINERALÓGICAS E MICROMORFOLÓGICAS

Os minerais foram identificados inicialmente por difração de raio-x (DRX), enquanto ao microscópio petrográfico, através de lâminas delgadas, foram definidos os aspectos micromorfológicos.

As análises de difração de raio-x foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Geoquímica e Petrologia, do Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará, com auxílio de difratômetro de difração de raios-x Phillips, modelo PW 1729, com tubo de cobre. As condições do aparelho foram 2×28 cm/min e 4×10 c/seg, 45 kv, 40 mA e intervalo de 4° a 60° .

Para o cálculo do teor de Al_2O_3 na goethita foi utilizado o método de SCHULZE (1984), adaptado para as amostras estudadas (HORBE & COSTA, 1994). Para tanto foi adicionado calcita nas amostras, como padrão interno e modificadas as condições do espectrômetro de difração de raio-x para $1 \times 28/4$ cm/min e 2×10 c/seg no intervalo de 36° a $38^\circ 2\theta$.

Com base nos resultados da difração de raio-x, nas análises químicas e na fórmula mínima de cada mineral, calculou-se a composição mineralógica de cada amostra, segundo os procedimentos indicados na tabela 2.2.

Essa metodologia de cálculo mostrou-se eficiente para os materiais com elevado teor de Fe_2O_3 ($>15\%$). Para os demais, com teores inferiores a esse valor, não foi possível individualizar a goethita da hematita, sugerindo teores muito baixos de goethita e/ou hematita.

Tabela 2.2: Procedimentos para a quantificação mineralógica

MINERAL CALCULADO	PROCEDIMENTO MATEMÁTICO
QUARTZO (Q)	$Q = Z$ estimada pela DRX
CAOLINITA (K)	$K = (SiO_2(T-Q) \times 100) / 46,55$ $K(Al_2O_3) = (K \times 39,5) / 100$ $K(PF) = (K \times 13,95) / 100$
GIBBSITA (Gib)	$Gib = ((Al_2O_3(T) - K(Al_2O_3) \times 100) / 65,3$ $GIB(PF) = (Gib \times 34,64) / 100$
GOETHITA (Goe)	$Goe = ((PF(T) - K(PF) - Gib(PF)) \times 100) / 10,13$ $Goe(Fe_2O_3) = (Goe \times 89,87) / 100$
HEMATITA (Hem)	$Hem = Fe_2O_3(T) - Goe(Fe_2O_3)$
ANATÁSIO (Ana)	$Ana = TiO_2$
Σ dos minerais	100%

A(óxido) = cálculo do teor do óxido no mineral A

óxido(T) = Z total do óxido na amostra

PF = perda ao fogo

2.4 - CÁLCULO DE DENSIDADE

Devido a total desagregação da maioria das amostras coletadas optou-se pela utilização do material pulverizado, obtendo-se a densidade dos grãos através de picnômetro de 10ml.

2.5 - ANÁLISES DE MICROSSONDA ELETRÔNICA

Foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica da Universidade de Brasília, pela autora e pelo orientador desta tese e pela autora e o Professor Dr. Manoel Jerônimo da Cruz, no Laboratório de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal da Bahia. Foram utilizadas amostras previamente impregnadas em resina para dar consistência ao material. As amostras foram metalizadas com carbono, evitando a dispersão aleatória dos elétrons e melhor direcionamento do feixe eletrônico no interior do canhão à alto vácuo da microsonda.

Utilizou-se a microsonda SX 50 Cameca nas seguintes condições físicas: 15kV de tensão, corrente de 10 a 30 nA e tempo de contagem de 5 a 20s, dependendo do elemento analisado. Foi utilizado o método WDS e empregadas as correções ZAF, com aplicações dos diversos programas do equipamento.

2.6 ANÁLISES QUÍMICAS

Nos laboratórios do Departamento de Geoquímica e Petrologia, do Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará, foram analisados os elementos maiores, apresentados na forma de óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , TiO_2) e PF.

Os métodos utilizados foram os seguintes: gravimetria para SiO_2 e perda ao fogo; EDTA para Al_2O_3 ; volumetria para Al_2O_3 (complexação com EDTA) e FeO (óxi-redução); colorimetria para Fe_2O_3 e TiO_2 . As amostras foram abertas por fusão com tetraborato de lítio. Os resultados de Fe_2O_3 incluem o FeO sendo representado como $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ (T=ferro total).

Os elementos-traço (Cr, Ga, Mo, Ni, V, Pb, Sc, Zr, Y, B, Mn e Cu) foram analisados por espectrografia ótica de emissão e o Au por fyre-assay nos laboratórios da GEOSOL por . O Ni, Pb, Mn e Cu, com teores abaixo de limite de detecção da espectrografia ótica, foram analisados por absorção atômica. Os elementos terras raras (ETR) foram obtidos por espectrometria de plasma (ICP), também na Geosol.

2.7 - BALANÇO DE MASSA

Os cálculos do balanço de massa foram utilizados para

quantificar o grau de lixiviação e enriquecimento dos elementos durante o processo de formação do solo. Foi considerada a crosta laterítica sã como a rocha-mãe do perfil e o TiO_2 como elemento imóvel. Foi utilizada a metodologia de BRIMHALL et al. (1991). Os valores $-1,0$ significam que 100% da massa do elemento foi lixiviada durante o intemperismo; $0,00$ indica que o elemento é imóvel e os valores positivos mostram enriquecimento na massa do elemento (anexo).

2.8 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Foi utilizado o software "GEOQUANT" para a análise fatorial modo Q com rotação varimax, com os dados ajustados para intervalos de 0 a 1, e para a análise de discriminante. Para essas análises foram considerados os teores dos minerais, dos óxidos maiores e dos elemento-traço. O Au e os ETR não foram utilizados, pois os resultados são parciais. Para os teores abaixo do limite de detecção utilizou-se a metade desse valor.

Na análise fatorial foi utilizado o modo Q que forneceu, com base na carga dos fatores e estes em correlação com as variáveis ($r > 0,5$), três fatores como sendo os principais e que representam 84,74% da variância total.

3 - PERFIL INTEMPÉRICO SOBRE CROSTA LATERÍTICA FERRO-ALUMINOSA MATURA - N5

3.1 - ASPECTOS GEOLÓGICOS

O platô de N5 compreende uma área aproximada de 20km². Na sua porção leste aflora a crosta ferro-aluminosa e a oeste um solo areno-argiloso avermelhado friável (Figura 3.1). Quando a crosta está exposta predomina a vegetação do tipo savana, e sobre o solo, a floresta tropical.

Para o estudo da relação crosta/solo foram amostrados 2 perfis localizados no topo do platô, na porção onde predomina o solo. A espessura média dos perfis é de dois metros, sendo ambos formados pelos seguintes horizontes (Figura 3.2): crosta ferro-aluminosa, crosta parcial a totalmente desagregada e solo.

A crosta ferro-aluminosa é homogênea, formada por um material marrom-avermelhado constituído por óxi-hidróxidos de Fe e Al onde se individualizam, parcialmente, feições nodulares (Figuras 3.3 e 3.4). Observa-se ainda vacúolos de formas irregulares preenchidos por um material argiloso de cor ocre-avermelhado, formado por hidróxidos de Fe e Al.

Sobreposto à crosta ferro-aluminosa homogênea, em contato gradacional, ocorre um material de cor similar a do anterior, porém com desenvolvimento de pronunciadas feições nodulares e mesmo pisolíticas (Figuras 3.5 e 3.6), denominado de crosta parcialmente desagregada. Os nódulos e/ou pisólitos, com diâmetro variando entre 0,2 a 1,5cm, apresentam as mesmas características da crosta sã, enquanto o material envolvente, denominado de plasma internodular, tem cor ocre e é ainda compacto. Essa

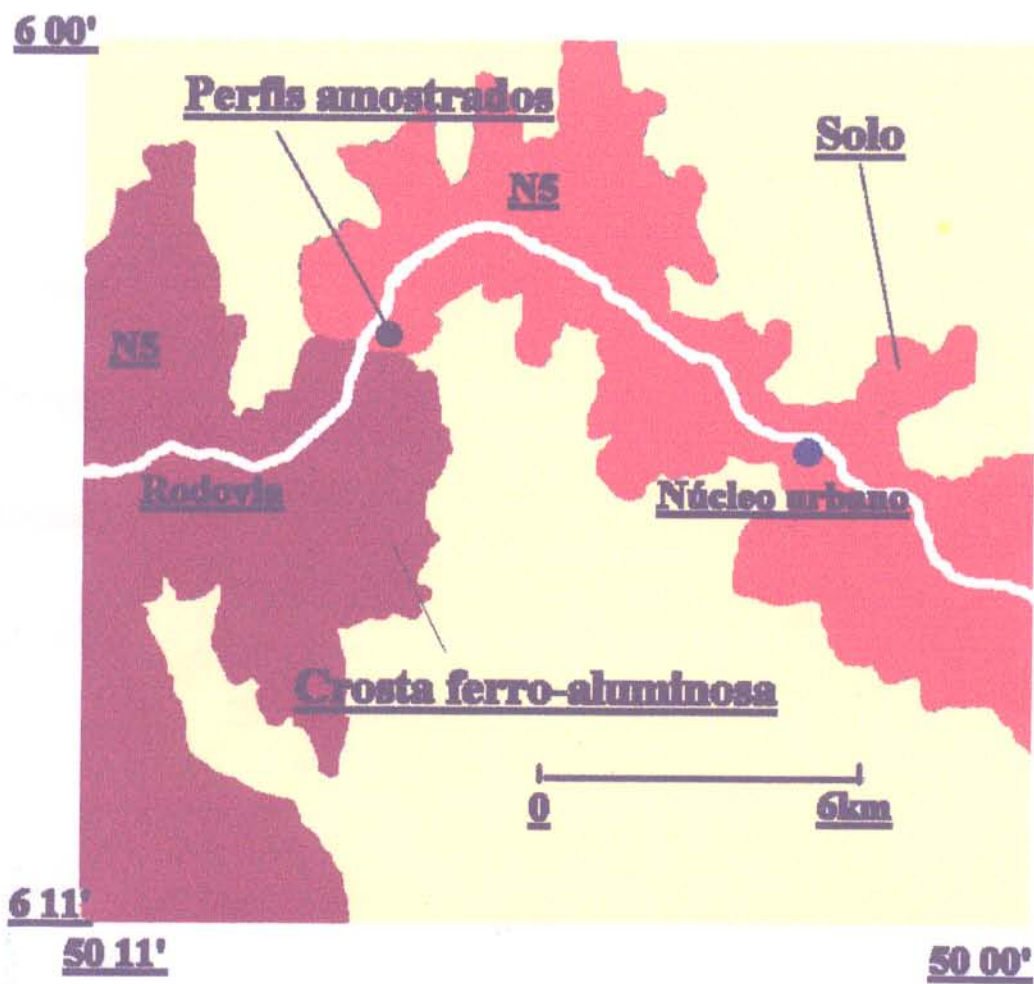
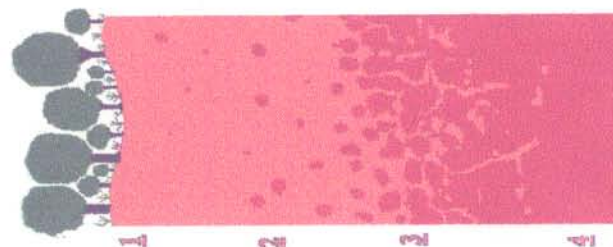


Figura 3.1: Localização da área de solos e das crostas ferro-aluminosas no platô de N5



Material areno-argiloso avermelhado, friável, composto por gibbsita, caolinita, goethita e hematita e raros fragmentos milimétricos da crosta (Solo)

Material totalmente desagregado onde se individualizam raros fragmentos ferruginosos envolvidos por uma matriz argilosa (Crosta intemperizada)

Material parcialmente desagregado com fragmentos ferruginosos envolvidos por uma matriz areno-argilosa avermelhada (Crosta parcialmente intemperizada)

Material ferruginoso compacto, avermelhado, maciço a vacuolar (Crosta sã)

Figura 3.2: Perfil de alteração da crosta ferro-aluminosa de N5



Figura 3.3: Aspecto macroscópico da crosta sã do perfil 1 de N5 onde se identificam o material ferro-aluminoso marrom-avermelhado com incipiente textura nodular e o material argiloso ocre-avermelhado preenchendo os vacúolos.



Figura 3.4: Idem foto 3.1 mas no perfil 2 de N5.



Figura 3.5 Aspecto nodular da crosta parcialmente desagregada do perfil 1 onde se identificam os nódulos ferruginosos envolvidos pelo cimento ocre.



Figura 3.7: Fragmentos da crosta intemperizada.



Figura 3.6: Idem foto 3.3 mas no perfil 2 de N5 com destaque para o córtex goethítico.

crosta corresponde a couraça pisolítica descrita por BOULAGÉ (1984).

Em direção ao topo do perfil a crosta parcialmente desagregada transforma-se em material totalmente inconsolidado, que é constituído por fragmentos correspondentes à crosta ferro-aluminosa sã (Figura 3.7), envolvidos por um material terroso de cor avermelhada, formando a crosta desagregada.

O solo é microagregado e os fragmentos da crosta subjacente são raros e de granulometria fina.

As características descritas acima mostram que o perfil é marcado pela desagregação contínua da crosta, indicada pelo decréscimo no tamanho dos fragmentos e aumento na proporção da matriz areno-argilosa em direção ao topo do perfil, até o domínio completo do material areno-argiloso que corresponde ao processo de intemperismo de rochas primárias. Essas transformações permitiram identificar os horizontes que indicam o intemperismo da crosta: crosta sã, crosta parcialmente intemperizada, crosta intemperizada e solo (Figura 3.2), na qual a crosta sã corresponde à rocha-mãe, o solo é o resultado final de seu intemperismo e os fragmentos correspondem a relictos da mesma.

3.2 - CARACTERÍSTICAS MICROMORFOLÓGICAS

3.2.1 - Crosta Sã

Caracteriza-se por uma incipiente individualização de nódulos, geralmente homogêneos e coalescentes, formados por um plasma ferruginoso vermelho-escuro, quase preto. Localmente, preenchendo poros, fissuras e fraturas ocorrem dois tipos de

materiais ("a" e "b", Figura 3.9):

a - cripto a microcristalino, localmente manchado por óxido de ferro, adquirindo então a cor avermelhada. A gibbsita é o mineral responsável pela textura microcristalina. A porção criptocristalina é formada por Al-goethita, caolinita e hematita. Macroscopicamente o conjunto apresenta uma cor ocre.

b - o segundo material se desenvolve em fraturas, fissuras e poros de dissolução do plasma "a". Esse material é formado por glóbulos de plasma ferruginoso, homogêneo, de coloração marrom, envolvidos por um material ocre. Esses glóbulos correspondem aos nódulos argilomorfos descritos por DIDIER et al. (1985) e NAHON (1991) na matriz argilosa gerada pela desagregação de crostas lateríticas. O conjunto é constituído por gibbsita, caolinita e Al-goethita de baixa cristalinidade. A coloração marrom é devida provavelmente à presença de goethita. A presença de caolinita tanto no plasma "a" como no "b" sugere duas fases de formação para esse mineral: a primeira herdada, do processo de formação da crosta e outra, mais recente, associada ao fissuramento e fraturamento da crosta e remobilização do ferro pelo intemperismo.

3.2.2 - Crosta Parcialmente Intemperizada

É formada por nódulos ferruginosos com até 1 cm de diâmetro, cimentados por um plasma gibbsítico.

Os nódulos, ao contrário do que ocorre na crosta sã, estão bem individualizados, sendo constituídos por uma zona interna, ou núcleo, marrom-avermelhada a preta, ferruginosa, vacuolar. Os vacúolos são preenchidos por gibbsita e quartzo (Figura 3.8). A

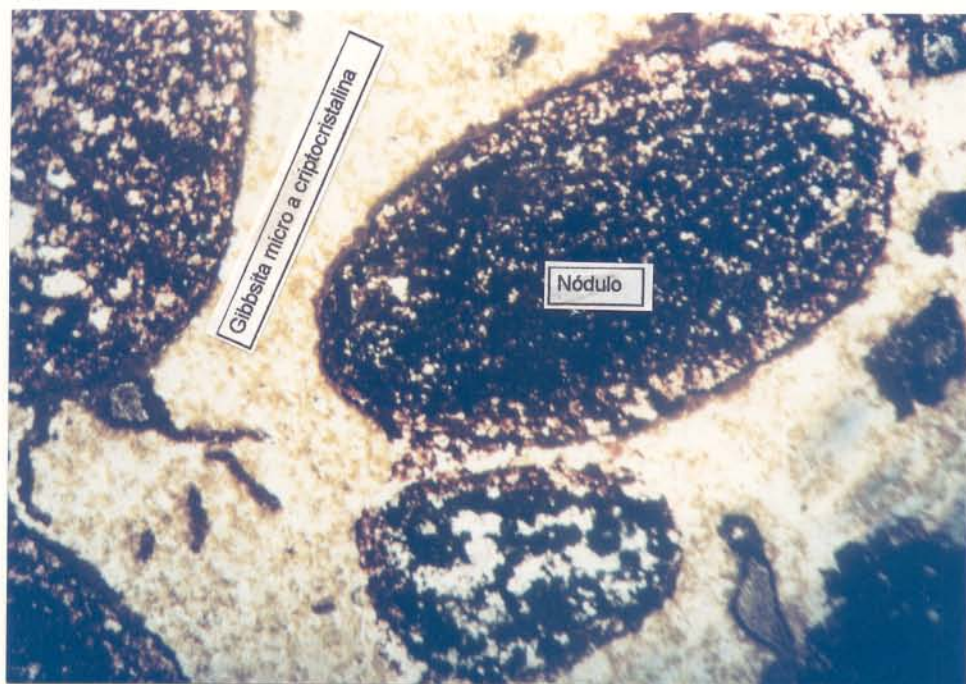


Figura 3.8: Aspecto micromorfológico da crosta parcialmente intemperizada onde se identificam os nódulos ferruginosos com borda desferrificada, envolvidos por gibbsita micro a criptocristalina ($\text{icm}=0,7\text{mm}$).

parte externa ou borda do nódulo tem coloração ocre-avermelhada, as vezes descontínua, indicando processo de dissolução resultante da desagregação da zona interna mais escura. A estruturação dos nódulos, também visível macroscopicamente, é segundo BOULANGÉ (1984), indicativo de processos de desferrificação devido a circulação de soluções aquosas. Assim, a borda do nódulo é produto de alteração do núcleo do nódulo pré-existente que, segundo NAHON et al. (1979), DIDIER et al. (1985) e NAHON (1991), leva a desagregação de nódulos ferruginosos nos topos de crostas ferruginosas formando os pisólitos de degradação, segundo TARDY, 1993.

Envolvendo os nódulos tem-se um material formado por material amarelado, gibbsítico, predominantemente microcristalino a cristalino (Figura 3.6) constituindo o plasma internodular. Raramente é criptocristalino e, a exemplo da crosta sã, também fortemente manchado por óxido de ferro, adquirindo cor avermelhada (Figura 3.9). Localmente ocorre um plasma marrom, similar ao tipo "b" descrito na crosta sã.

3.2.3 - Crosta Intemperizada

É formada por relictos nodulares da crosta sã, com até 5cm de diâmetro, estando completamente desagregados (Figura 3.7) e imersos em uma matriz terrosa. Esses relictos, da mesma forma que os nódulos da crosta parcialmente intemperizada, são formados por um núcleo marrom avermelhado a opaco com uma zona externa avermelhada, microporosa, cujos poros estão preenchidos por gibbsita microcristalina. A matriz terrosa, que tem cor avermelhada, é constituída por gibbsita, caolinita, Al-goethita e

hematita. O quartzo, não encontrado na crosta sã e na crosta parcialmente intemperizada, é observado em grãos subédricos, com até 1cm de diâmetro.

3.2.4 - Solo

Os solos são formados por um material terroso de cor avermelhada, homogêneo, criptocristalino, microagregado, com relictos dispersos da crosta sã, com diâmetros menores do que 5mm. O material terroso é constituído por gibbsita, caolinita, Al-goethita e hematita.

3.2.5 - Sequência de Alteração da Crosta Sã até os Solos

A estruturação dos horizontes do perfil da figura 3.2 (crosta sã, crosta parcialmente intemperizada, crosta intemperizada e solo) e a individualização de relictos por cominuição da crosta sã nos horizontes superiores, representam um processo gradual de alteração intempérica gerando solos terrosos (Figura 3.9). Esse processo é similar ao observado por LEPRUN (1979), NAHON et al. (1979), NAHON (1991), BEAUVAIS & COLIN (1993) e TARDY (1993) na África, na pedogênese e desagregação de crostas ferruginosas e na alteração esferoidal, produzida por intemperismo de rochas primárias (BOULET et al. 1977; NAHON, 1991 e MELFI & FLICOTEAUX, 1993).

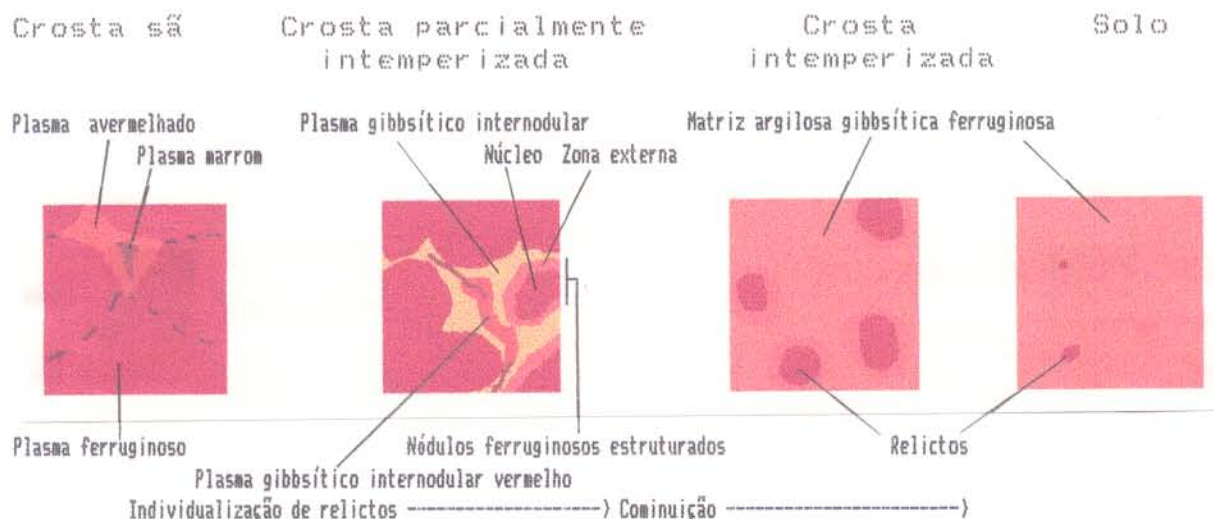


Figura 3.9: Sequência esquemática do intemperismo da crosta em direção ao solo, com base na estruturação do perfil e nos aspectos micromorfológicos de N5.

3.3 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

Mineralogicamente os dois perfis de N5 são formados por caolinita, gibbsita, goethita, hematita, anatásio e quartzo, em proporções variáveis ao longo do perfil (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Composição mineralógica dos perfis de N5 (% em peso)

HORIZONTES	Quartzo		Caolinita		Gibbsita		Goethita		Hematita		Anatásio	
PERFIS	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
SOLO				30		30		31		4		4
SOLO			3	27	57	35	32	31	3	4	4	4
CROSTA INTEMPERIZADA	17		13		27		24		16		2	
Matriz areno-argilosa	20	10	19	7	33	46	18	25	8	7	2	4
Relicto			34	30	11	5	6	35	47	27	1	2
CROSTA PARCIALMENTE INTEMPERIZADA			32	34	26	2	15	45	23	14	2	4
CROSTA Sã			43	35	2	41	22	36	30	24	2	4

1 - Perfil 1 2 - Perfil 2

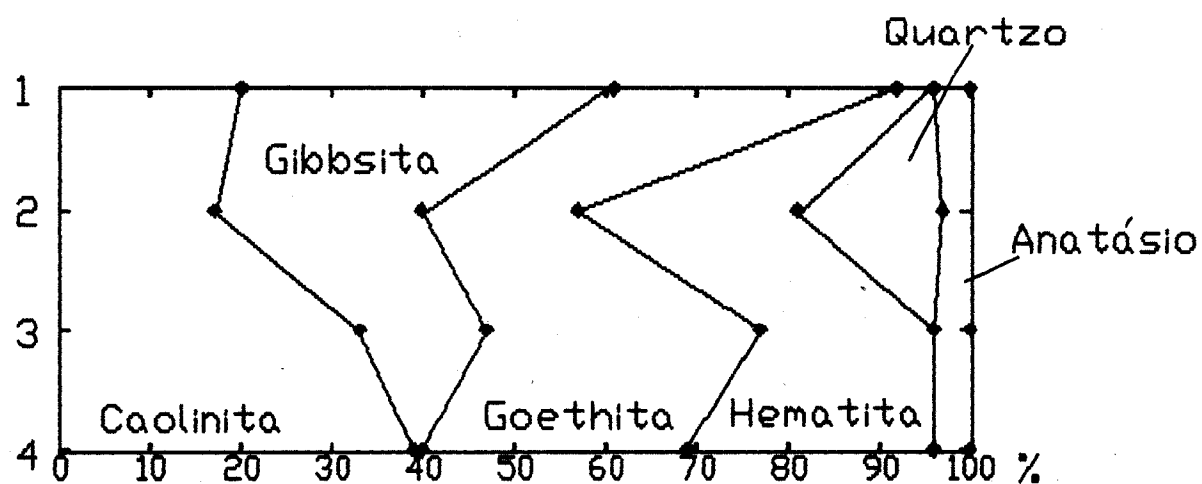
A composição mineralógica do perfil, da crosta sã ao solo,

caracteriza-se pela diminuição dos altos teores de caolinita (média 40% para 21%) e de hematita (de 33% para 4%), com o correspondente aumento dos teores de gibbsita (de 1% para 42%). Os teores de goethita praticamente não variam (Figura 3.10) e os de anatásio variam de 2% para 4%. Essa distribuição mineralógica é compatível com a geralmente observada em perfis de intemperismo tropical.

Comparando-se, em um mesmo horizonte, a composição mineralógica dos dois perfis de N5, verifica-se que as variações nos teores estão relacionadas à variação na composição da crosta sã e espessura do horizonte de solo de cada perfil (Tabela 3.1). Enquanto no perfil 1 o solo é pouco desenvolvido (alguns centímetros), no perfil 2 ele é mais espesso (1,0m), o que sugere que há um aumento no teor de caolinita a medida que o solo torna-se mais espesso. O aumento no teor de caolinita, acompanhado de goethita, corresponde, segundo NAHON et al. (1979) e NAHON (1991), ao processo de desagregação da crosta subjacente.

A diferenciação mineralógica ao longo do perfil 1 levou à formação de um horizonte de solo com composição mineralógica equivalente a da bauxita. Esses solos equivalem às bauxitas descritas por ASSAD & BEISIEGEL (1978), LEMOS (1982) e KOTSCHOUBEY & LEMOS (1985) no platô de N5. No perfil 2 os teores de caolinita e gibbsita se equivalem (Tabela 3.1), e o solo é do tipo bauxítico argiloso.

Comparando-se a distribuição mineralógica entre o relicto e a matriz argilosa na crosta intemperizada dos dois perfis, nota-se que a composição dos relictos é similar a da crosta sã,



1 - Solo

2 - Crosta Intemperizada

3 - Crosta Parcialmente Intemperizada

4 - Crosta Sã

Figura 3.10: Composição mineralógica média dos perfis de N5

enquanto a composição da matriz argilosa é similar a dos solos (Tabela 3.1).

A correlação negativa entre o conteúdo de caolinita+hematita com o de gibbsita+Al-goethita (Figura 3.11), indica que o aumento de gibbsita+goethita, da base para o topo do perfil, se dá com a diminuição linear e contínua da caolinita+hematita, caracterizando a transformação mineralógica entre a crosta e o solo de N5. A distribuição desses minerais determina uma sequência de transformação similar à observada na degradação de crostas ferruginosas por TARDY & NAHON (1985), BITTON & VOLKOFF (1993), TARDY (1993) e BEAUVAIS & TARDY (1993) na África, como resultado da ação do intemperismo tropical. Segundo LUCAS (1988) a substituição da gibbsita por caolinita estaria ligada ao processo de podzolização da parte superior do solo.

3.3.1 - Conteúdo de Alumínio nas Goethitas

Os moles % de $AlOOH$ nas goethitas do perfil 1 (Tabela 3.2) mostram que o grau de substituição do Fe por Al varia de 14 a 34 moles % de $AlOOH$, aumentando continuamente, da crosta até o solo (Figura 3.12).

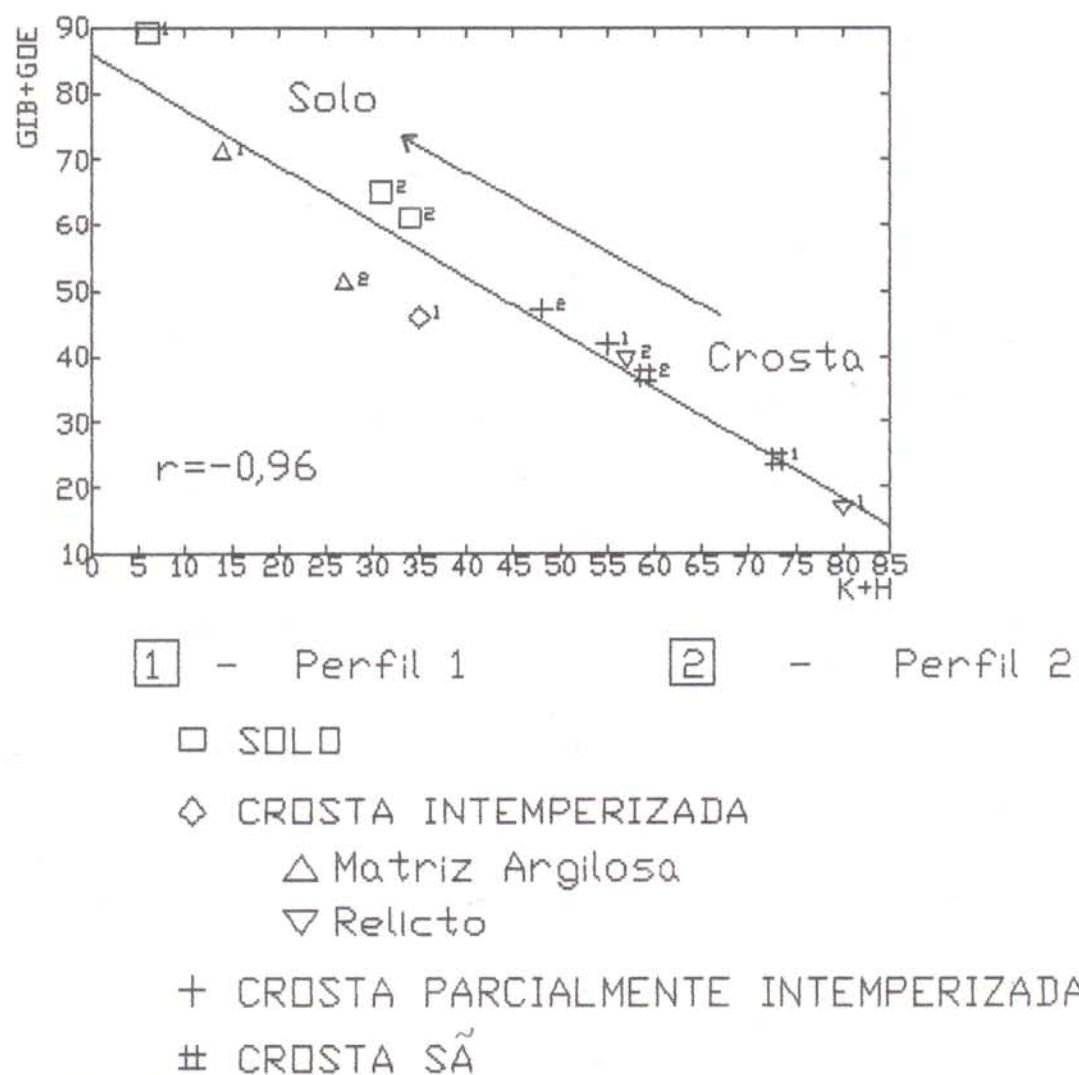
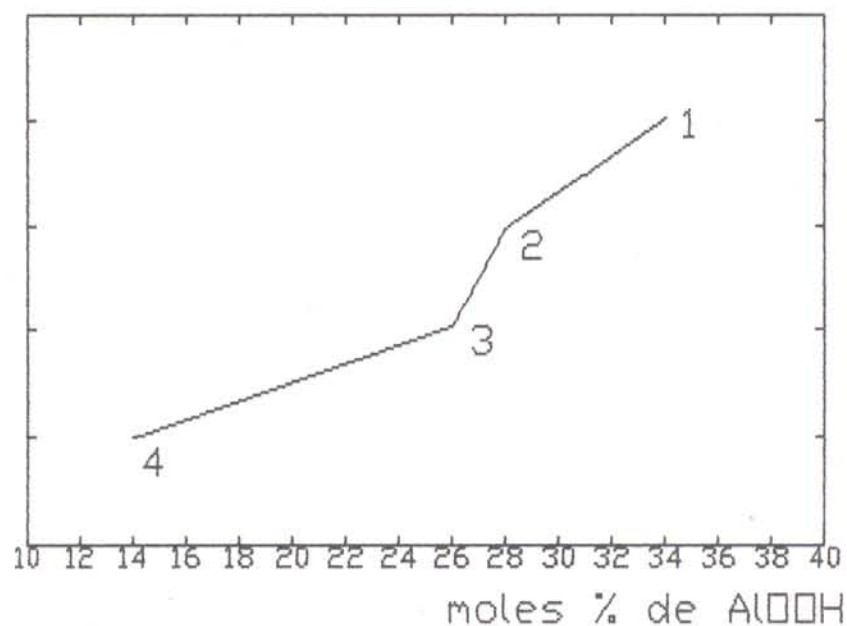


Figura 3.11: Correlação caolinita+hematita (K+H) versus gibbsita+goethita (GIB+GOE) nos perfis 1 e 2 de N5



- 1 Solo
- 2 Crosta Intemperizada
- 3 Crosta Parcialmente Intemperizada
- 4 Crosta Sã

Figura 3.12: Moles % de AlOOH das goethitas ao longo do perfil 1

Tabela 3.2: Moles % de $AlOOH$, fórmula mínima e teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 (% em peso) nas goethitas dos perfis de N5

HORIZONTE	moles % de Al na goethita		Fórmula mínima		Al ₂ O ₃		Fe ₂ O ₃	
PERFIS	1	2	1	2	1	2	1	2
SOLO		*						
SOLO	34	*	$(Fe_{0.66}Al_{0.34})OOH$		29		59	
CROSTA INTENPERIZADA	28		$(Fe_{0.72}Al_{0.28})OOH$		23		65	
Matriz areno-argilosa	*	*						
Relicto	*	16		$(Fe_{0.86}Al_{0.14})OOH$	14		75	
CROSTA PARCIALMENTE INTENPERIZADA	26	12	$(Fe_{0.74}Al_{0.26})OOH$	$(Fe_{0.88}Al_{0.12})OOH$	22	10	66	79
CROSTA Sã	14	19	$(Fe_{0.86}Al_{0.14})OOH$	$(Fe_{0.81}Al_{0.19})OOH$	12	17	77	72

1 - Perfil 1 2 - Perfil 2 * - reflexão (111) mal definida

No perfil 2 a quantificação foi parcial, pois a reflexão (111) da goethita no solo e na matriz argilosa apresenta-se mal definida. A semelhança no conteúdo de alumínio das goethitas do relictos, da crosta intemperizada e dos horizontes subjacentes (Tabela 3.2) mostra que elas podem derivar da mesma crosta sã.

A formação de goethitas cada vez mais aluminosas indica, segundo SCHWERTMANN (1983), processos pedogenéticos. Indica ainda um ambiente rico em Al, ácido e lixiviante (TARDY & ROQUIN, 1992 e FRITZPATRICK & SCHWERTMANN, 1982) em direção ao topo do perfil. Os teores crescentes em moles % de $AlOOH$ coincidem com aqueles obtidos por NAHON et al. (1979) na Côte-D'Ivoire e Senegal e por LUCAS (1988) em perfis similares em Manaus, aproximando-se do valor máximo de 33 moles % de $AlOOH$ obtido em goethitas por BARDOSSY (1982) e TARDY & NAHON (1985) e TARDY (1993), em horizontes saprolíticos e argilosos de perfis lateríticos com elevado teor de alumínio.

3.4 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

3.4.1 - Composição Química Geral

Os perfis de N5 são constituídos basicamente por SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, que são responsáveis, juntamente com a perda ao fogo, por mais de 95% da sua composição química total (Tabela 3.3).

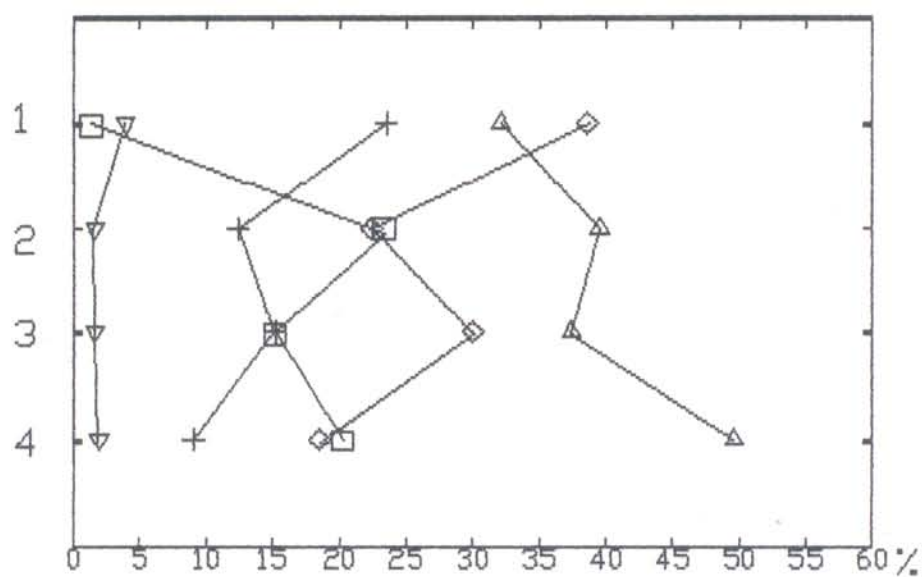
Tabela 3.3: Composição química dos perfis de N5 (% em peso)

HORIZONTE	SiO ₂		Al ₂ O ₃		Fe ₂ O ₃		FeO		TiO ₂		PF		TOTAL	
PERFIS	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
SOLO		14,12		31,00		28,16		0,21		3,55		21,78		99,41
SOLO	1,30	12,70	38,60	33,70	32,10	30,82	0,29	0,21	3,90	2,73	23,51	19,03	99,41	98,98
CROSTA INTemperizada*	23,30		22,40		39,50		0,70		1,60		12,42			99,92
Matriz areno-argilosa	23,83	13,23	29,28	33,76	24,87	29,63	0,78	0,35	2,08	4,08	18,25	19,94	98,31	100,64
Relicto	15,88	13,88	20,92	15,02	52,31	58,44	0,27	0,07	1,17	2,43	9,38	9,38	99,66	99,15
CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada	15,10	15,88	30,00	14,66	37,40	54,58	0,29	0,07	1,60	3,85	15,22	10,00	99,32	98,97
CROSTA Sã	20,20	16,25	18,50	14,15	49,60	56,49	0,36	0,07	1,90	3,66	9,03	8,69	99,23	99,24

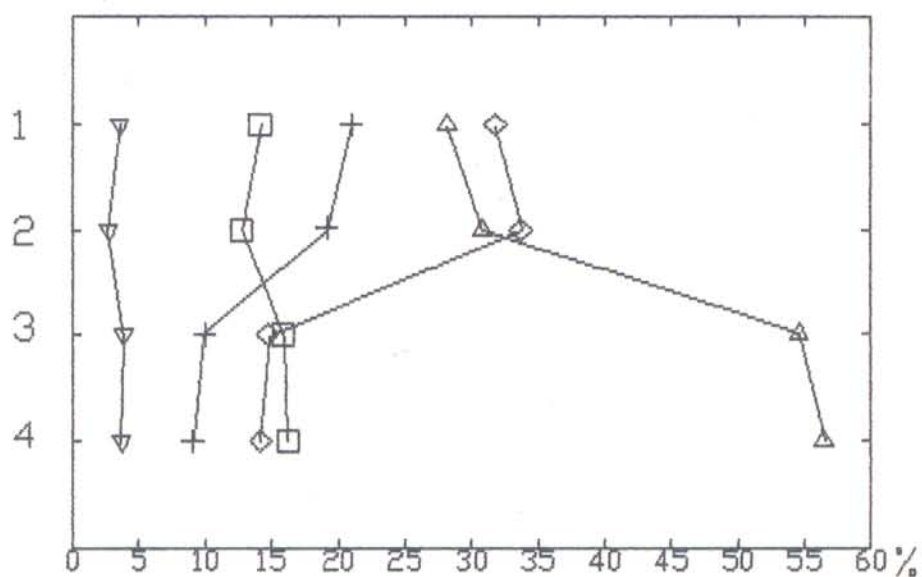
1 - Perfil 1 2 - Perfil 2 * - rocha total, T - teor total

Os teores de Fe₂O₃ são mais elevados na crosta sã (49% a 56%) e decrescem para o solo, acompanhando a distribuição da hematita. O Al₂O₃, TiO₂ e PF, que representam a gibbsita e o anatásio, apresentam teores mais elevados no solo, enquanto os de SiO₂, presentes como caolinita e quartzo, tem os teores mais baixos no solo do perfil 1 (1,3%) e não sofrem variação significativa ao longo do perfil 2 (16% a 13%) (Figura 3.13). Os relictos da crosta intemperizada tem composição química equivalente à da crosta sã, o que ao, lado dos seus aspectos texturais e mineralógicos, comprovam serem eles restos desta crosta. É marcante o contraste entre a composição química do relictos e da matriz areno-argilosa envolvente (Tabela 3.3), tanto

PERFIL 1



PERFIL 2



- 1 - Solo 2 - Crosta Intemperizada
 3 - Crosta Parcialmente Intemperizada
 4 - Crosta Sã

$\square$ SiO₂ $\diamond$ Al₂O₃ $\triangle$ Fe₂O₃ ∇ TiO₂ + PF

Figura 3.13: Distribuição da composição química dos perfis de N5 por horizontes

para Fe_2O_3 como para SiO_2 , Al_2O_3 e TiO_2 . Por sua vez a composição química da matriz é comparável com a dos solos, os quais são mais pobres em Fe_2O_3 e mais ricos em SiO_2 , Al_2O_3 e TiO_2 . Desse modo a matriz argilosa é, além de mineralógica, também quimicamente similar ao solo.

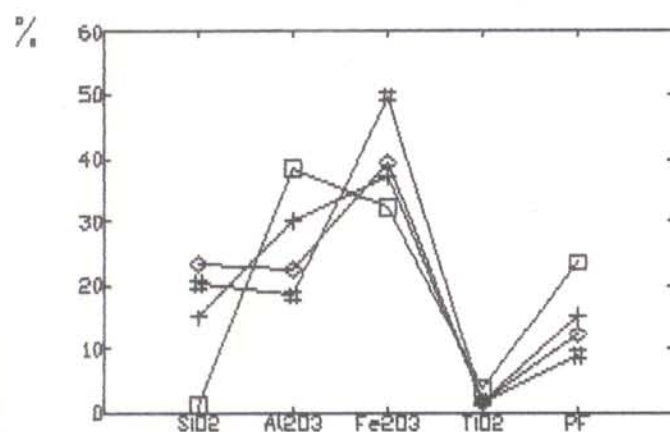
As semelhanças químicas observadas entre crosta sã, e relictos e matriz areno-argilosa e solo é claramente evidenciada na figura 3.14 pelo paralelismo das curvas de distribuição. Contudo, quando comparado esses dois grupos, eles divergem entre si mostrando que a transformação das crostas para o solo se dá com modificação química, acentuada diminuição no teor de Fe_2O_3 e acúmulo de Al_2O_3 e TiO_2 .

A relação inversa entre Fe_2O_3 e Al_2O_3 obedece uma função linear (Figura 3.15). Nessa figura mais uma vez torna-se evidente as semelhanças entre a crosta e os relictos dessa e a matriz areno-argilosa e solo.

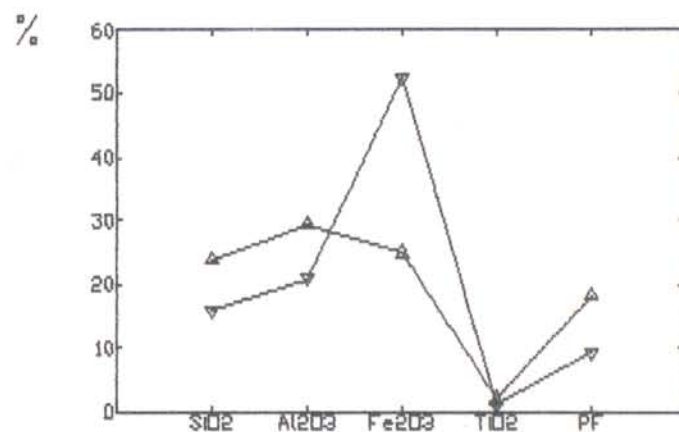
No diagrama SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 (Figura 3.16) pode-se observar novamente que a crosta sã e seus relictos constituem um campo composicional, enquanto que a composição da crosta parcialmente intemperizada e da crosta intemperizada formam o campo intermediário entre a crosta sã e os solos. Nas crostas alteradas a composição do solo e da matriz areno-argilosa converge gradualmente para o membro Al_2O_3 , ou seja, o intemperismo se dá com perda de Fe_2O_3 e SiO_2 , sendo portanto inverso ao processo de formação de crostas ferruginosas (NAHON et al. 1979; NAHON, 1991 e BEAUVAIS & COLIN, 1993). Essa relação geral entre SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 é típica em perfis de alteração intempérica de rochas básicas, conforme descrito por MELFI & LEVI (1971), e na

PERFIL 1

Perfil completo

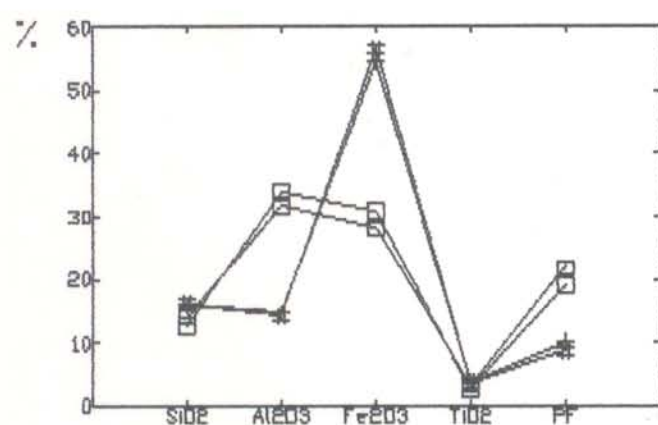


Crosta intemperizada

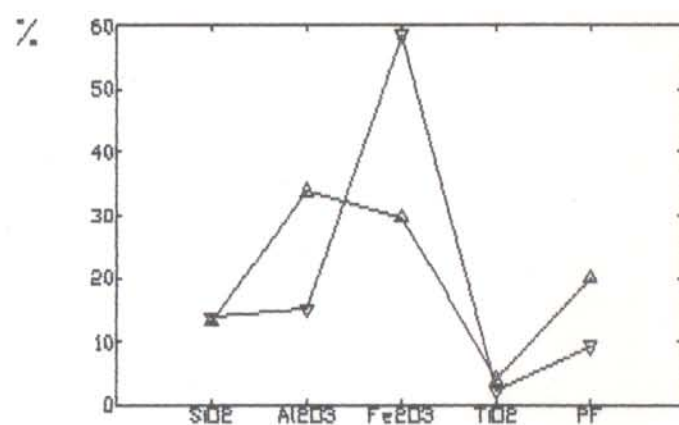


PERFIL 2

Perfil completo



Crosta intemperizada



- $\square$ SOLD
- $\diamond$ CROSTA INTEMPERIZADA
 - $\triangle$ Matriz Argilosa
 - ∇ Relicto
- $+$ CROSTA PARCIALMENTE INTEMPERIZADA
- $\#$ CROSTA SÃ

Figura 3.14: Distribuição da composição química dos perfis de N5

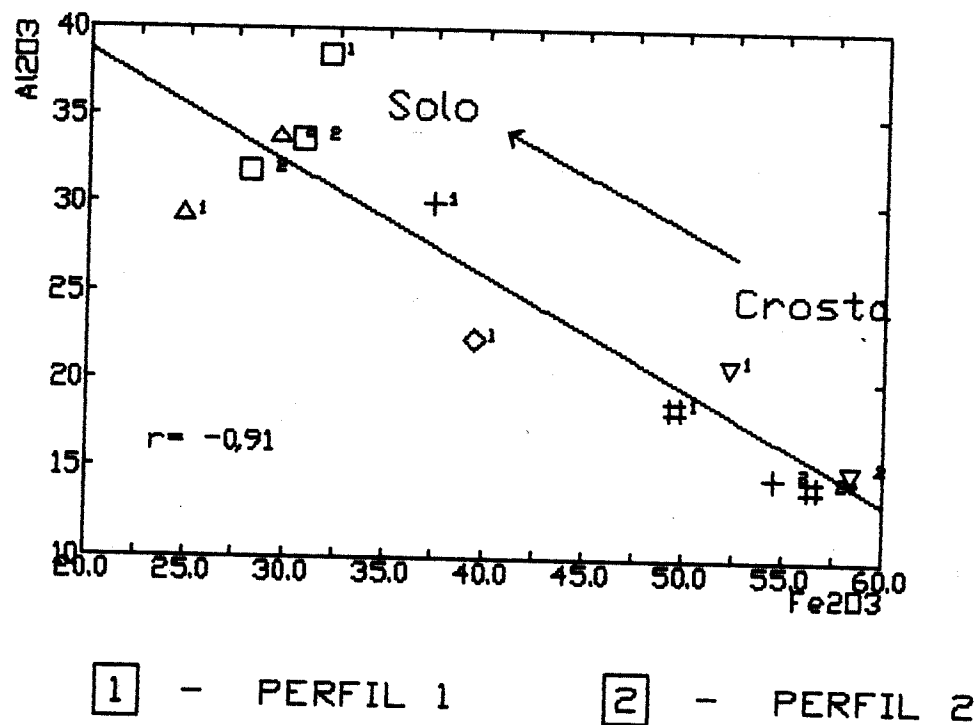
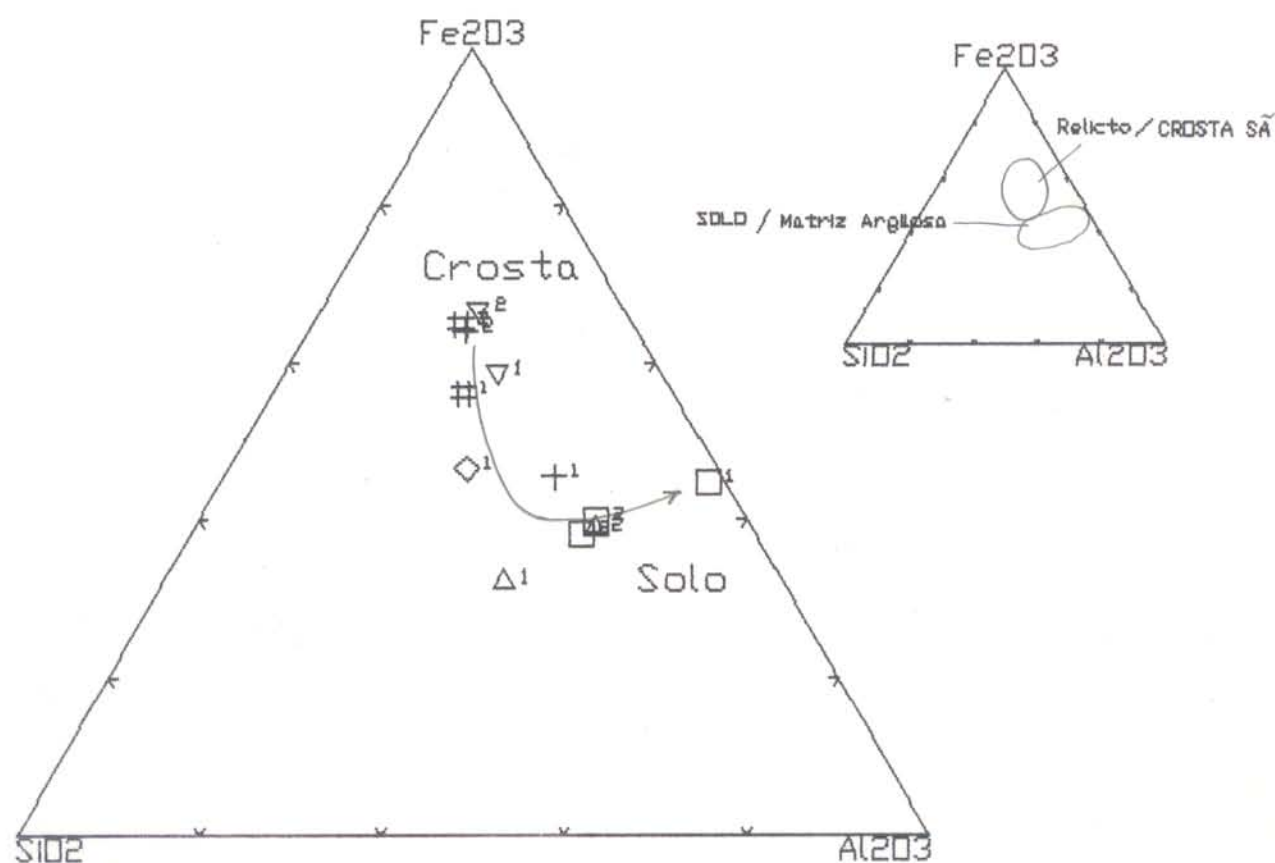


Figura 3.15: Correlação Fe_2O_3 - Al_2O_3 nos perfis de N5



1 - Perfil 1 2 - Perfil 2

□ SOLO

◇ CRISTA INTEMPERIZADA

Δ Matriz Angilosa

▽ Relicto

+ CRISTA PARCIALMENTE INTEMPERIZADA

CRISTA SÃ

Figura 3.16: Diagrama SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃ dos perfis de N5

degradação de crostas ferruginosas com formação de solos, conforme observado na África por TARDY & NAHON (1985), TARDY (1993), BITTON & VOLKOFF (1993) e BEAUVAIS & TARDY (1993).

3.4.1.1 - Composição Química dos Componentes que Constituem a Crosta e seus Relictos

As análises químicas, realizadas por microsonda eletrônica, mostram que a crosta sã é constituída por cerca de 51% de Fe_2O_3 , 19% de SiO_2 e 9% de Al_2O_3 (Tabela 3.4), não apresentando variações expressivas. Essa composição diverge da crosta sã, (Tabela 3.3) apenas no mais baixo teor de Al_2O_3 . Isso se deve ao fato que o Al_2O_3 , na crosta sã, ocorre preferencialmente como cristais bem desenvolvidos de gibbsita, evitados nas análises, para obter-se resultados apenas do plasma hematítico. Portanto, as análises representam principalmente a hematita, goethita e caolinita presentes no plasma ferruginoso, todos criptocristalinos.

Tabela 3.4: Composição química da crosta sã (% em peso), obtida por microsonda eletrônica.

Pontos analisados	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	H ₂ O	TOTAL
1	18,57	9,03	53,70	0,51	18,19	81,81
2	16,63	7,59	56,83	1,99	16,96	83,04
3	18,69	8,86	47,03	7,61	17,81	82,19
4	20,00	8,96	48,65	0,78	21,61	78,39
5	19,16	9,56	49,75	0,69	20,84	79,16
Média	18,61	8,80	51,19	2,31	19,08	

Os nódulos que compõem os relictos da crosta parcialmente intemperizada, que tem núcleo marrom-avermelhado a preto e a zona externa porosa (Figura 3.5 e 3.6), também foram analisados (Figura 3.17). Os teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 do núcleo do

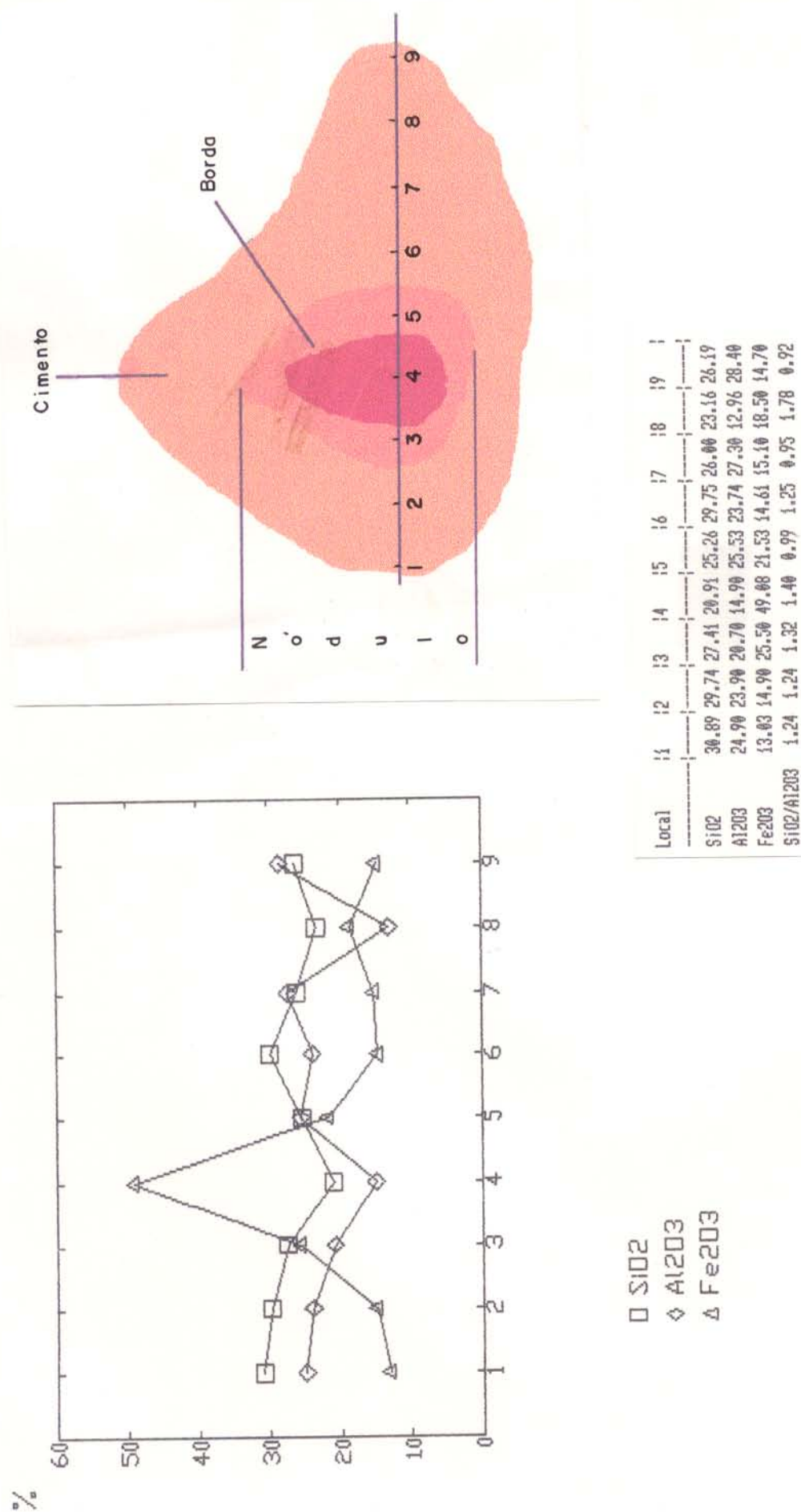


Figura 3.17: Distribuição dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ obtidos por microsonda em um nódulo e sua auréola externa da crosta parcialmente interperitada

nódulo são comparáveis ao obtido nas análises de microsonda da crosta sã (Tabela 3.4). Os teores de Fe_2O_3 , que no núcleo são de 49%, caem abruptamente para as zonas externas, com teores equivalentes ou mesmo mais baixos que o plasma internodular. Por outro lado, SiO_2 e Al_2O_3 aumentam do núcleo para as zonas externas e em direção ao plasma internodular, de modo similar ao observado por NAHON et al. (1979) e NAHON (1991) na diferenciação de nódulos. Esse padrão de distribuição da SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 em escala de milímetros equivale ao observado ao longo de todo o perfil de N5, de modo que o núcleo corresponde à crosta sã e o plasma internodular à matriz argilosa sugerindo, portanto que o nódulo é reliquiar e não neoformado.

A transformação química entre o nódulo e o plasma internodular representa portanto um forte processo de desferrificação, provocado pelo alto teor inicial em Fe_2O_3 de modo que a dissolução do nódulo alimenta o plasma internodular. Esse processo é similar ao observado na alteração de rochas básicas descritas por MELFI & LEVI (1972), ao obtido por BITTON & VOLKOFF (1993) na formação do plasma internodular internodular e na desagregação de crostas gerando relictos, segundo NAHON et al. (1979) e NAHON (1991).

O paralelismo entre as curvas de SiO_2 e Al_2O_3 (Figura 3.17), com a razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ aproximadamente igual a 1,2, permite confirmar a presença de caolinita além da hematita e goethita nos materiais analisados. Quando o teor de Al_2O_3 se aproxima ou supera os de SiO_2 (Figura 3.17), indica a presença também de gibbsita, comprovada pelas análises de DRX. O comportamento inverso indica a presença aleatória de quartzo.

3.4.2 - Elementos-Traço

Os teores dos elementos-traço nos perfis de N5 são apresentados na tabela 3.5. Os teores mais elevados são de V, Zr, Cr e Mn (900 ppm, 1200 ppm, 65 ppm e 850 ppm, respectivamente). O Ni, Ga, Sc, Cu e Pb encontram-se entre 40 ppm e 170 ppm, enquanto B, Mo e Y estão abaixo de 40 ppm. Se comparados com a média crustal, V, Cr, Zr, Ga, Sc e Cu apresentam teores mais elevados e Ni e Mn mais baixos. Os demais (B, Mo, Y e Pb) apresentam teores tanto acima como abaixo da média crustal.

Não se observa diferença marcante de teores entre os dois perfis, exceto o Mo com teores abaixo do limite de detecção no perfil 2, provavelmente relacionado à problemas analíticos. Dessa forma, os dois perfis, também em termos de teor de elementos-traço, são semelhantes entre si.

Tabela 3.5: Concentração dos elementos-traço nos dois perfis de N5 (ppm).

HORIZONTE	V	Cr	Ni	B	Mo	Zr	Ga	Y	Sc	Mn	Cu	Pb
PERFIL 1												
SOLO	580	170	40	14	32	920	62	36	64	390	48	10
CROSTA INTemperizada*	650	700	73	16	39	630	49	25	49	230	71	<10
Matriz areno-argilosa	480	395	61	<10	17	600	37	30	36	168	79	58
Relicto	900	1200	51	<10	30	330	45	15	37	244	76	78
CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada	780	710	55	16	37	600	44	16	44	210	72	<10
CROSTA Sã	850	710	65	28	42	490	48	16	62	850	42	<10
PERFIL 2												
SOLO	500	250	12	14	<5	750	47	82	47	113	17	19
SOLO	690	280	24	40	<5	620	58	92	56	170	30	42
CROSTA INTemperizada												
Matriz areno-argilosa	760	192	34	45	<5	560	43	72	59	418	63	53
Relicto	740	480	31	<10	<5	220	52	71	90	260	170	46
CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada	1010	350	20	29	<5	220	50	75	88	177	93	41
CROSTA Sã	1060	420	24	<10	<5	220	50	66	74	153	102	40
Média crustal	135	100	75	10	1,5	165	15	33	22	900	55	13

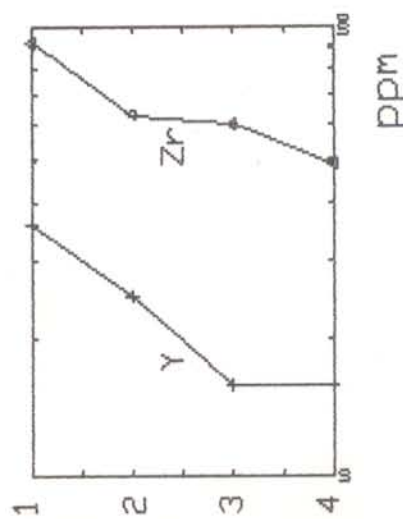
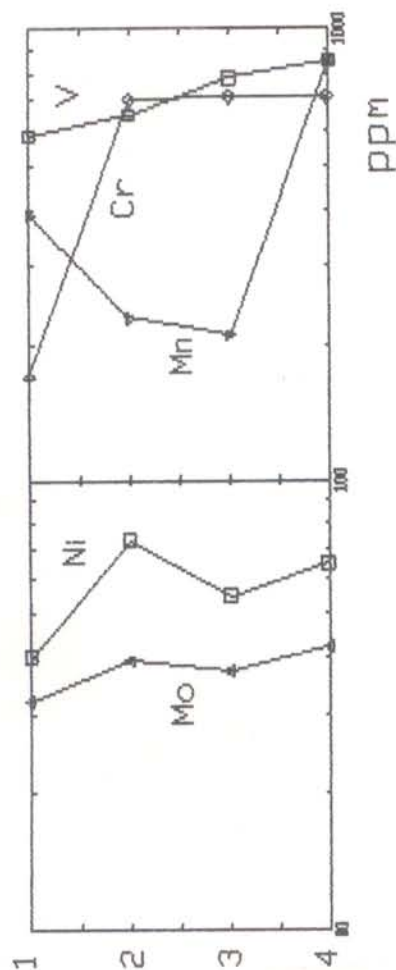
* rocha total

Quando se analisa o padrão de distribuição ao longo dos dois perfis diferenciam-se três grupos (Figura 3.18):

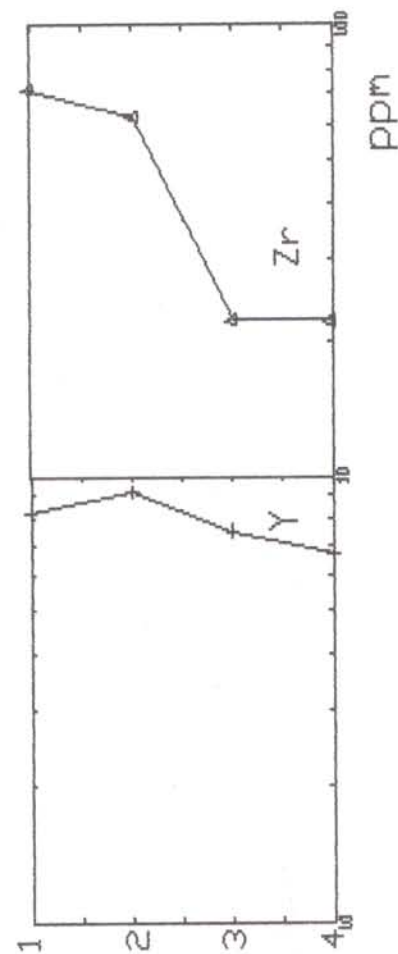
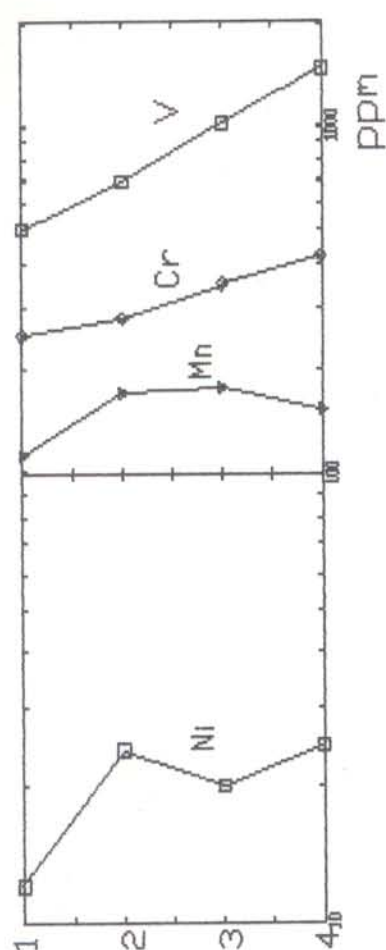
1- V, Cr, Ni e Mn com teores, em geral, mais elevados na crosta sã/relicto, decrescendo ao longo do perfil até os solos. Este padrão é similar ao apresentado pelo Fe₂O₃ no perfil (Figura 3.13), na forma de hematita e goethita. Como entre esses dois minerais apenas a hematita diminui de teor, os elemento-traço deste grupo devem fazer parte da estrutura desse mineral.

2- Zr e Y com os teores aumentando ao solo (Figura 3.18), com distribuição comparável ao do TiO₂ (Figura 3.13) e portanto correlacionável ao anatásio, que se concentra no solo dos perfis de N5. Esse aumento de teores, principalmente de Zr, também foi observado em solos residuais (ESSON, 1983; SCHORIN & PUCHELT,

PERFIL 1



PERFIL 2



- 1 - Solo
 2 - Crosta Intemperizada
 3 - Crosta Parcialmente Intemperizada
 4 - Crosta Sã

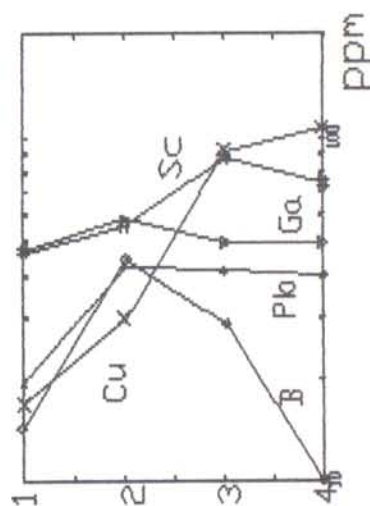
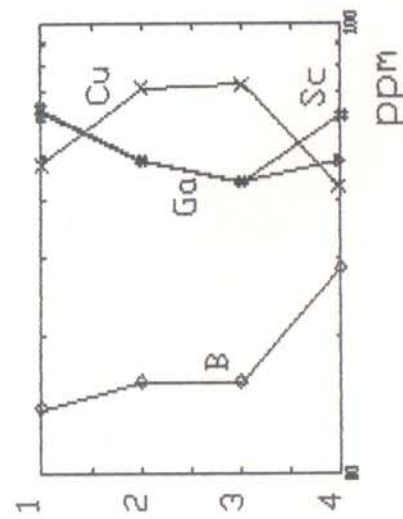


Figura 3.18: Distribuição dos elementos-traço, por horizontes, nos perfis de N5

1987; OLIVEIRA et al. 1988; DANI et al. 1989; MARKER et al. 1989; COSTA, 1990; ROQUIN et al. 1990; HORBE, 1991 e BEAUVAIS & COLIN, 1993). Uma fração do teor desses elementos deve estar relacionado ao resistato zircão, acessório mais comum.

3- B, Mo, Ga, Sc, Cu e Pb que não apresentam padrão.

A semelhança entre os dois perfis, da crosta sã ao solo, é melhor indicada na figura 3.19. O contraste está principalmente nos teores de Mn, muito mais elevados no perfil 1. Nessa figura também se visualiza que a evolução da crosta sã para os solos se dá com diminuição acentuada dos teores de V, Cr e Mn e aumento muito expressivo de Zr. A morfologia das curvas pode indicar ainda a dependência química entre os horizontes do perfil.

Quando se compara os relictos com a respectiva matriz na crosta intemperizada (Figura 3.19), e os nódulos com o plasma internodular da crosta parcialmente intemperizada (Figura 3.20), constata-se o aumento nos teores de Zr e diminuição de V, Cr e Mn, como observado ao longo do perfil. Contudo, o padrão das curvas é semelhante entre os materiais considerados em cada horizonte, reforçando a relação química entre a crosta sã e os demais horizontes sobrejacentes.

Pelo exposto verifica-se que o V, Cr, Ni e Mn se correlacionam com o Fe_2O_3 , que forma a crosta e seus relictos, e que sua distribuição está diretamente relacionada à distribuição da hematita ao longo do perfil. Por outro lado o Zr, Y e, em parte, Ga e Sc, que se concentram na matriz e mais ainda nos solos, estão ligados direta ou indiretamente à goethita e gibbsita por apresentarem a mesma distribuição ao longo do perfil.

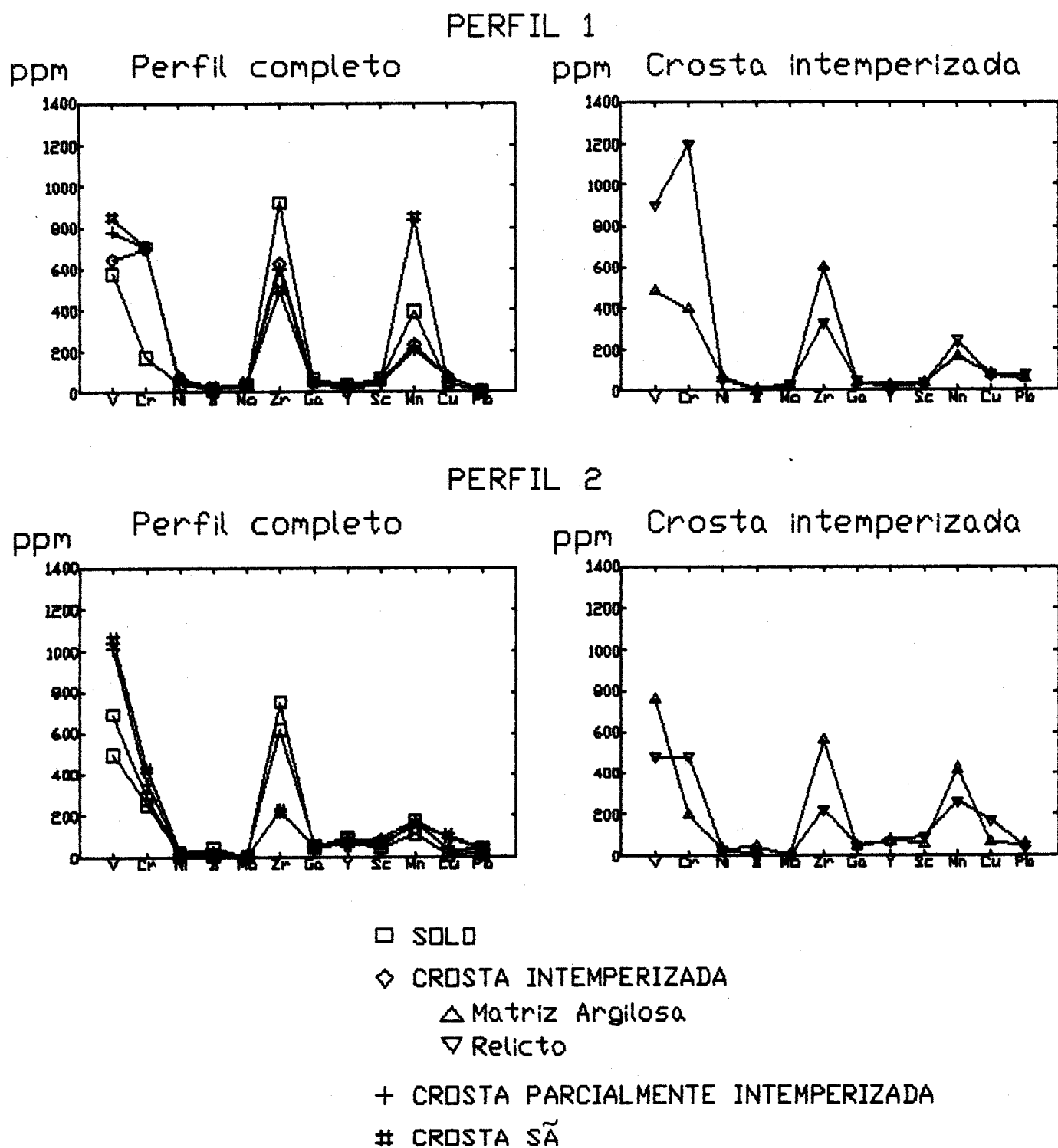
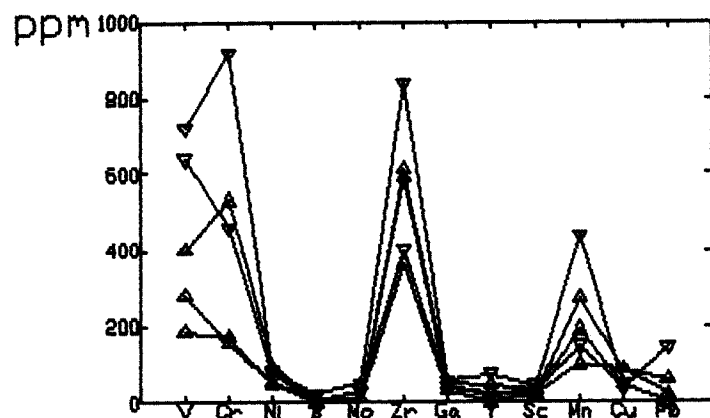
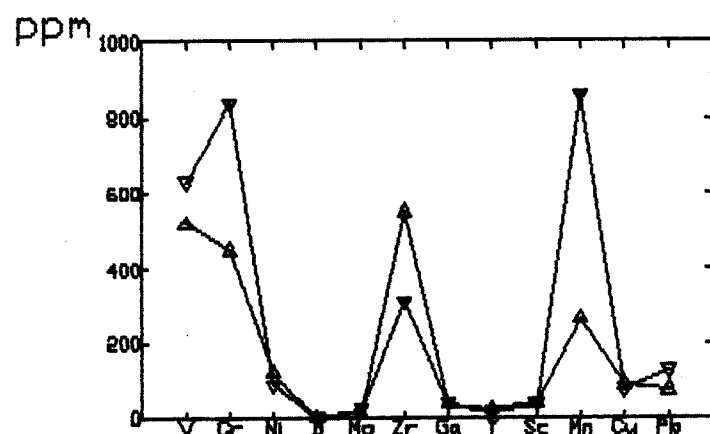


Figura 3.19: Distribuição dos elementos-traço entre os materiais dos perfis de N5



CROSTA PARCIALMENTE INTERPERIZADA

- △ Plasma internodular
- ▽ Nódulo ferruginoso de um relicto



CROSTA SÃ

- △ Plasma internodular
- ▽ Nódulo ferruginoso de um relicto

Figura 3.20: Distribuição dos elementos-traço na crosta parcialmente interperitizada e na crosta sã

Há portanto a diluição dos teores dos elementos-traço associados ao Fe_2O_3 (V, Cr, Ni, Mo e Mn) e uma concentração residual, especialmente do Zr. A diluição dos teores deve-se, segundo TARDY & NAHON (1985), ROQUIN et al. (1993), BEAUVAIS & TARDY (1993), BEAUVAIS & COLIN (1993) e TARDY (1993), à dissolução da hematita e a consequente liberação de Fe_2O_3 , V, Cr, Ni, Mo e Mn presentes em sua estrutura e a parcial adsorção desses elementos na goethita. O Fe^{3+} da goethita pode ser substituído isomorficamente, além do alumínio, por diversos elementos-traço como V, Cr, Ni, Mo e Mn (SCHELLMANN, 1983; MANCEAU & CALAS, 1986; CORNELL & GIOVANNOLI, 1987; CORNELL, 1988; SCHWERTMANN et al. 1989 e GERTH, 1990), o que justifica a presença desses elementos no solo.

O diagrama da figura 3.21, mostra que os quatro horizontes dos perfis de N5 formam um campo composicional contínuo, indo da crosta, com teores elevados de V, para solos com altos teores de Zr, sugerindo uma evolução contínua das crostas para os solos, passando pela crosta parcialmente intemperizada e intemperizada, de modo semelhante àquela verificada no diagrama $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

3.4.2.1 - Elementos Terras Raras (ETR)

As concentrações dos ETR, determinados somente no perfil 1, estão indicadas na tabela 3.6, onde os ETRL estão muito mais concentrados e com maior dispersão de teores do que os ETRP. Entre os ETRL o Ce é o mais abundante, seguido pelo La e Nd, todos em concentrações inferiores à média crustal (Tabela 3.6). O Sm, Eu e Gd são, em relação à média crustal, os de teores

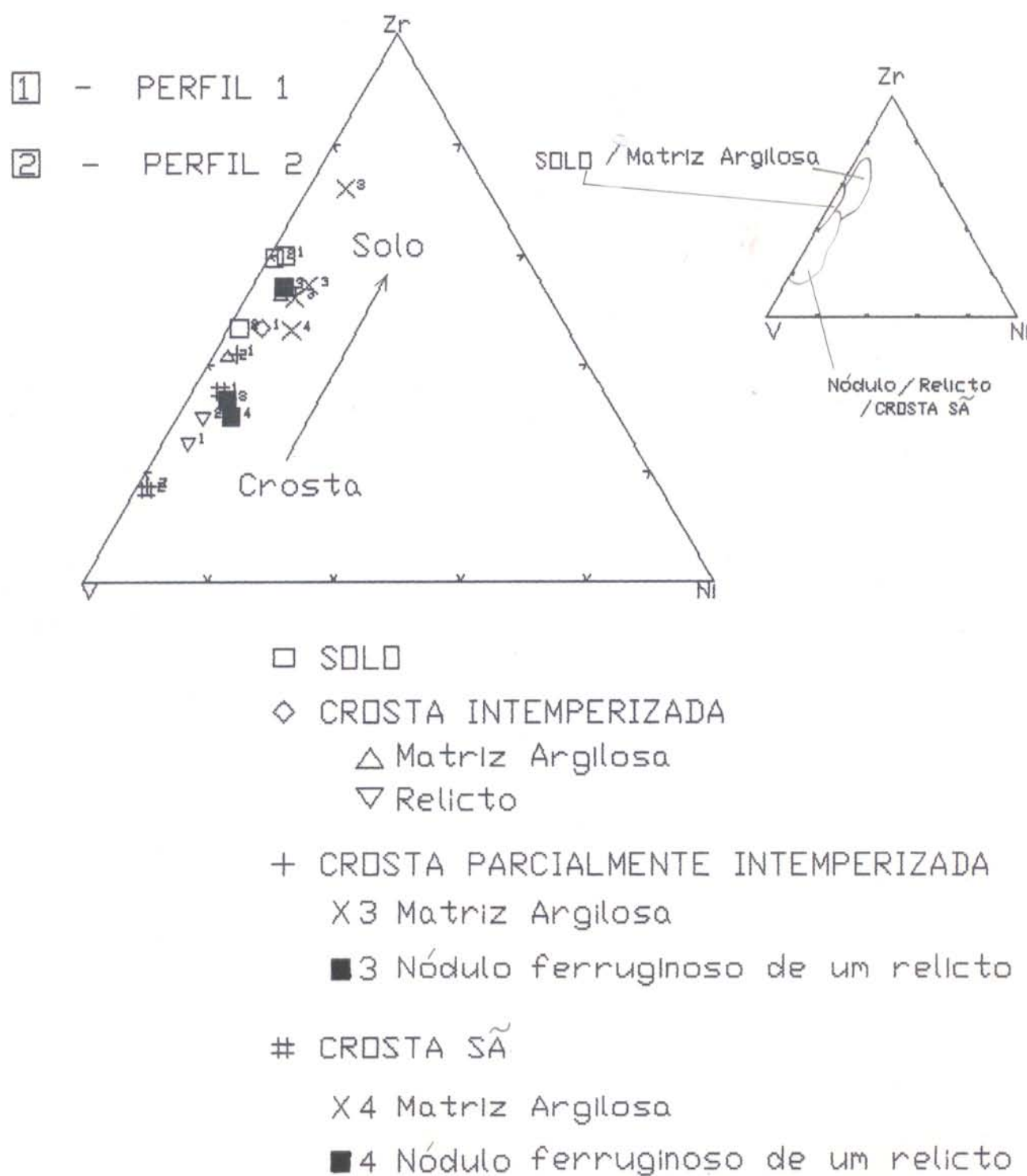


Figura 3.21: Diagrama V-Ni-Zr dos perfis de N5

relativamente mais baixos.

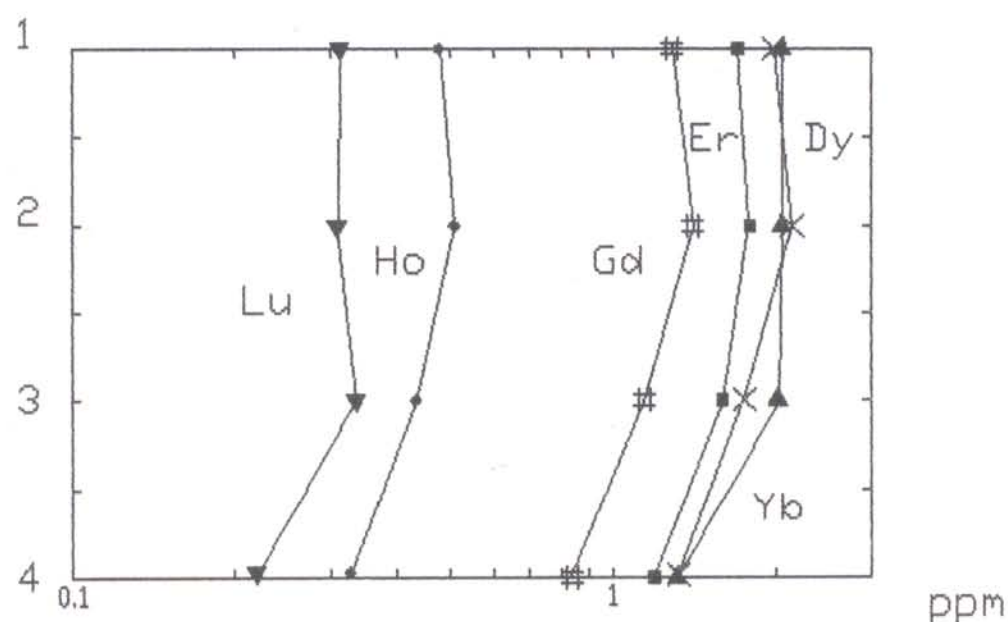
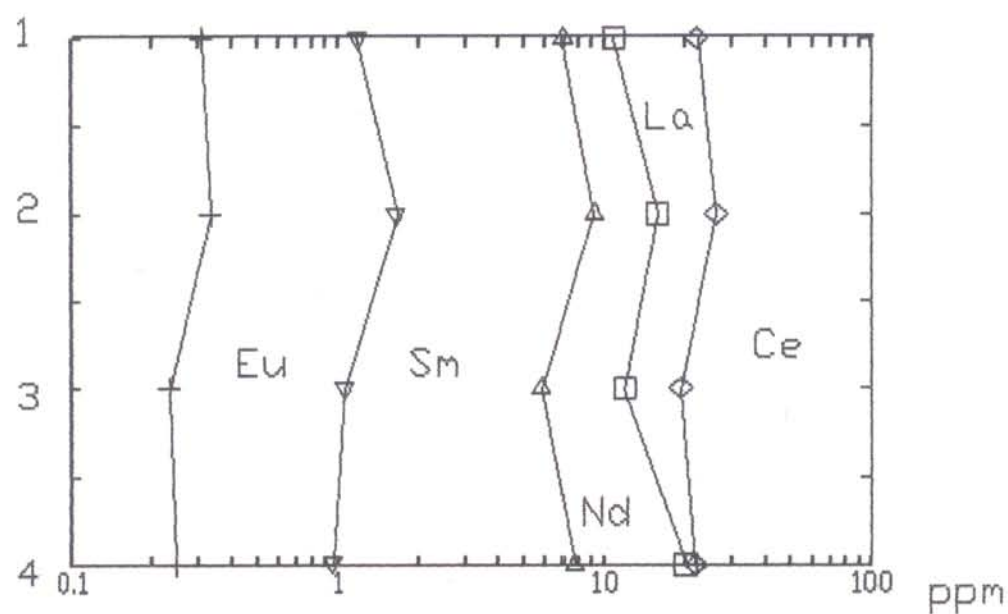
Tabela 3.6: Concentração dos elementos terras raras no perfil 1 de N5

HORIZONTES	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Lan/Smn
SOLO	10,94	22,36	7,07	1,18	0,31	1,28	1,97	0,47	1,70	2,04	0,31	5,83
CROSTA INTENPERIZADA*	16,02	26,49	9,29	1,64	0,33	1,40	2,14	0,50	1,78	2,04	0,30	6,12
Matriz argilosa	27,40	43,43	18,67	2,74	0,46	2,02	2,04	0,42	1,19	1,15	0,14	6,31
Relicto	21,40	31,24	16,05	1,47	0,25	1,06	1,32	0,29	0,94	1,02	0,13	9,20
CROSTA PARC. INTENPERIZADA	12,05	19,50	5,85	1,05	0,23	1,14	1,74	0,43	1,59	2,01	0,33	7,18
CROSTA Sã	20,86	21,92	7,99	0,95	0,26	0,84	1,30	0,32	1,20	1,44	0,23	13,72
Média crustal	30,00	60,00	28,00	6,00	1,20	5,40	3,00	1,20	2,80	3,00	0,50	

* rocha total

A distribuição dos teores ao longo do perfil (Figura 3.22) é caracterizada pelo aumento dos teores nos ETRP, enquanto que os de ETRL experimentam aumento de teor na crosta intemperizada e diminuição no solo. Assim, a curva de distribuição dos ETRP é comparável a do TiO_2 , Zr e Y (Figura 3.13 e 3.18), enquanto a dos ETRL não se compara as dos demais elementos-traço, nem a dos óxidos maiores. A crosta sã, a crosta parcialmente intemperizada e os relictos apresentam teores, em termos gerais, semelhantes entre si e diferentes dos da matriz, apenas para os ETRL. Os teores da matriz argilosa e do solo também são diferentes entre si, com os ETRL mais concentrados na matriz argilosa e os ETRP (apenas Er, Yb e Lu) mais concentrados no solo.

As curvas normalizadas aos condritos (Figura 3.23) apresentam anomalia negativa em Eu, com depleção decrescente do La para o Eu em direção ao solo e do relictos para matriz argilosa, caracterizando a diluição de teores de La nessa mesma direção. De modo geral o paralelismo das curvas é mais um



- 1 - Solo
- 2 - Crosta Intemperizada
- 3 - Crosta Parcialmente Intemperizada
- 4 - Crosta Sã

Figura 3.22: Distribuição dos ETR por horizontes no perfil 1 de N5

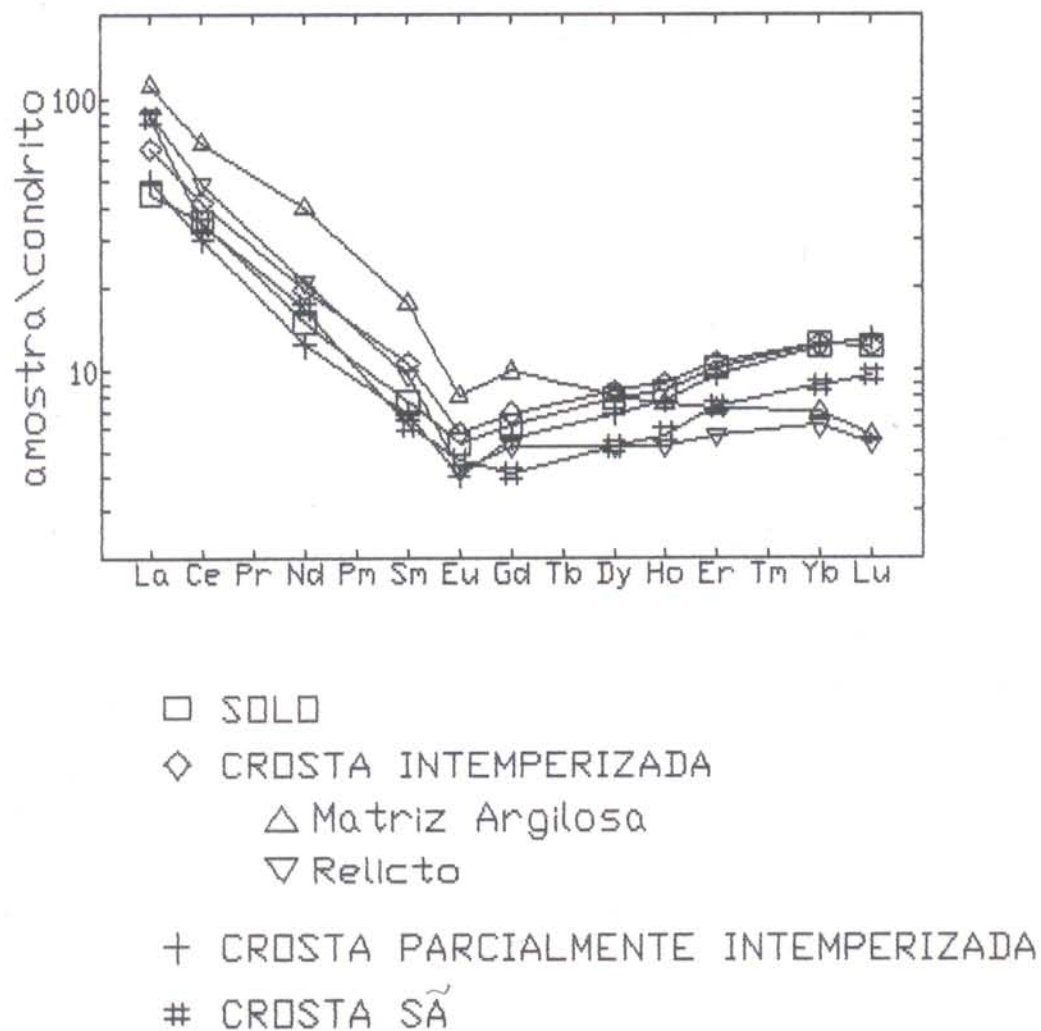


Figura 3.23: Normalização dos ETR em relação aos condritos no perfil 1 de N5

argumento para a evolução do perfil a partir da crosta sã em direção ao solo.

A normalização dos horizontes em relação a crosta sã indica que os ETRL apresentam um padrão mais irregular que os ETRP (Figura 3.24). Observa-se inicialmente uma depleção em relação à crosta sã dos ETRL (La, Ce, Nd e Eu) e aumento do Sm, desenvolvendo uma anomalia positiva nesse elemento, e dos ETRP na crosta parcialmente intemperizada. Na crosta intemperizada e no solo todos os elementos, com exceção do La, experimentam um aumento mais acentuado para o Sm, Gd e Dy. A normalização em relação ao relicto (Figura 3.24b) também reforça a sua natureza reliquiar.

O aumento maior nos primeiros estágios do intemperismo e posterior diminuição, principalmente dos ETRL, no solo, é um comportamento típico dos ETR em perfis de intemperismo (SCHORIN & PUCHELT, 1987; OLIVEIRA & SILVA, 1990; COSTA et al. 1991a e BRAUN et al. 1993), estando os teores mais elevados em ETRP provavelmente relacionados ao aumento do teor de zircão, clássico portador de ETR, e indicativo de um ambiente moderadamente oxidante (BEAUVAIS & COLIN, 1993).

3.5 - BALANÇO DE MASSA E CONCLUSÕES

O balanço de massa dos perfis de N5 (Tabela 3.7), tendo o titânio como elemento imóvel e a crosta sã como rocha-mãe, mostra que o ferro é lixiviado nos dois perfis, principalmente no solo, sendo acompanhado pelo V, Cr, B, Cu, Ga, Mn, Ni e Mo. Dentre todos os elementos analisados, são esses os únicos que apresentam um padrão constante nos dois perfis. Eles representam a

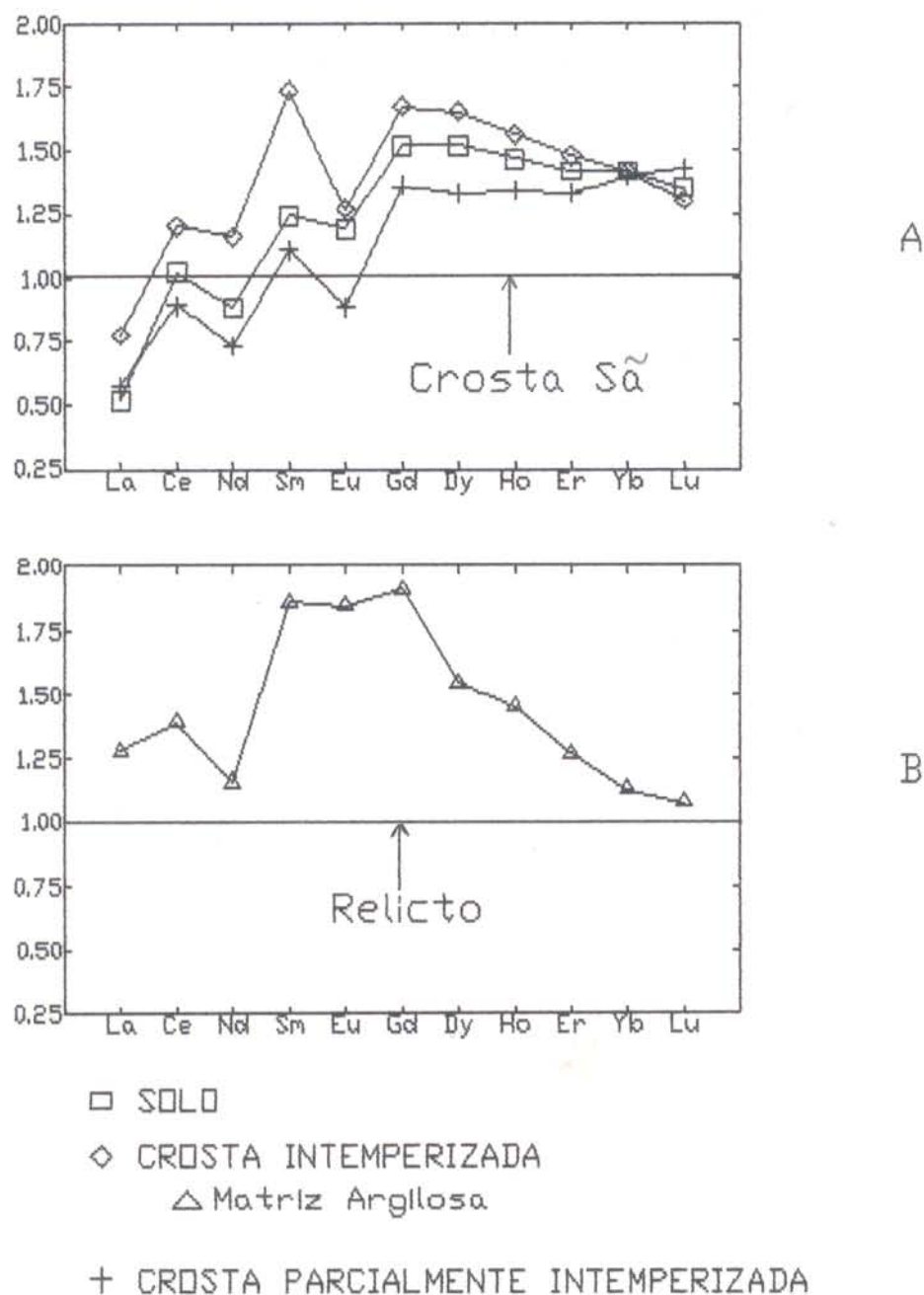


Figura 3.24: Normalização dos ETR em relação a crosta sã (A) e da matriz argilosa em relação ao relictos (B) na crosta intemperizada do perfil 1 de N5

decomposição da hematita, com cominuição da crosta e formação da matriz areno-argilosa e solos, com fixação, apenas parcial na Al-goethita e, em parte, na hematita remanescente.

O Al não apresenta padrão coerente, comportando-se como elemento lixiviado, imobilizado e enriquecido. Isso certamente deve refletir, em parte, a heterogeneidade dos teores de Al nas crostas. O Si apresenta idêntico comportamento. Esses dois elementos representam os minerais principais do perfil (caolinita, gibbsita e em parte o quartzo). O comportamento aleatório do Si pode ser explicado pela distribuição totalmente errática do quartzo no perfil. A gibbsita e caolinita na crosta são também distribuição bastante irregular, explicando assim o comportamento irregular do Al no perfil.

Com base nesses dados pode-se, concluir que o alumínio tem características de elemento que se enriquece ao longo do perfil intempérico, enquanto o silício se comporta como imobilizado e parcialmente lixiviado. O Zr e Y tem seu comportamento comparável ao do Al, enquanto o Ga e Sc são praticamente imóveis e ligeiramente lixiviados.

Os ETR, principalmente os ETRP, tem comportamento equivalente ao do Al_2O_3 , Zr e Y, ou seja, se enriquecem no solo.

Tabela 3.7: Balanço de massa dos perfis de N5

HORIZONTES	LIXIVIADOS			IMOBILIZADOS		ENRIQUECIDOS	
	190Z	90Z A 40Z	40Z A 10Z	10Z A 10Z	10Z A 40Z	40Z A 90Z	190Z
PERFIL 1							
SOLO	Si	Fetotal, Fe2+ V, Cr, B, Sc Cu, Mn, MV La, Ce, Nd, Eu Yb	Ni, Mo, Ga Sm, Gd, Dy Ho, Er, Lu	Al Zr, Y	PF	Sc	
CROSTA INTemperizada		Mn	B	Fetotal, V Sc, Mo, La	Si, Cr, Ni, Ga Nd, MV	Al, PF, Zr Y, Ce, Eu, Dy, Ho, Er, Yb, Lu	Fe2+, Cu Gd, Sm
CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada		Mn La, Nd	Si, B, Sc Sm	Fetotal, Fe2+ V, Ni, Mo, Ga, Ce, Eu	Cr, Y ETRP, MV	Zr	Al, PF, Cu
PERFIL 2							
SOLO		Fetotal V, Ni, Cu, Pb	MV, Cr Ga, Sc, Mn	Si	Y		Al, Fe2+ PF, Zr
SOLO		V, Cu	Fetotal, Cr, Ni	Si, Sc	Ga, Y, Mn MV, Pb		Al, Fe2+ PF, Zr
CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada	Al			Si, Fetotal, PF, Fe2+, V, Zr, Ga Y, Pb	MV, Sc Mn		

MV- Modificação de volume

A modificação volumétrica (MV) mostra que há expansão de volume da crosta parcialmente intemperizada e da crosta intemperizada quando comparada com a crosta sã, o que está relacionado ao microfraturamento das crostas, ao preenchimento das fissuras, fraturas e poros por material iluvial, de modo semelhante à saprolitização de perfis observados por BOULET et al. (1977), BRIMHALL et al (1991) e HALE & PORTO (1994). O

colapso no solo está relacionado à lixiviação de Si e Fetotal, que levaram a total destruição dos relictos no solo. O colapso em direção ao solo também foi observado por BOULANGÉ (1984) em solos desenvolvidos a partir de bauxitas.

Desse modo, observa-se que a transformação da crosta em solo no perfil de N5 se dá basicamente pelo fraturamento da crosta. Há a individualização de relictos que são substituídos gradativamente pela matriz argilosa, em consequência da diminuição dos teores de hematita e caolinita e aumento de gibbsita, enquanto a Al-goethita mantém-se estável. Essa modificação mineralógica levou à lixiviação do Fetotal e ao enriquecimento em Al, este, provavelmente residual, devido à sua baixa mobilidade no ambiente intempérico. A persistência de teores em torno de 30% de Fe_2O_3 no solo, principalmente na forma de Al-goethita, mostra que sua lixiviação não foi total, e compatível, portanto com as condições de intemperismo, com formação de horizonte saprolítico e argiloso, onde a estrutura da rocha-mãe está parcialmente preservada e a goethita é o principal mineral de ferro.

Concomitante à lixiviação de Fetotal houve diminuição nos teores de V, Cr, Ni e Mn em direção ao topo do perfil e aumento de Zr devido ao seu enriquecimento residual associado ao zircão.

Com base no exposto é possível concluir que o solo é resultante da desagregação da crosta sã, sendo o intemperismo o motor dessa transformação onde a gibbsita, que predomina no solo, é produto de enriquecimento residual enquanto que parte da caolinita é neoformada pelo intemperismo e parte é reliquiar.

4 - PERFIL INTEMPÉRICO SOBRE GOSSAN E CROSTA LATERÍTICA FERRO-ALUMINOSA MATURA - IGARAPÉ BAHIA

4.1 - ASPECTOS GEOLÓGICOS

A área da mina do Igarapé Bahia, onde se localizam os perfis investigados, está situada sobre um platô constituído de solos argilosos amarelos, sendo que na porção mineralizada a cor é avermelhada (Figura 4.1). Nessa porção afloram localmente restos da crosta laterítica ferro-aluminosa e também de gossans fisicamente desmantelados. Os gossans mineralizados a ouro desenvolveram-se sobre corpos sulfetados à base de calcopirita, pirita, hematita e magnetita, tendo como rochas encaixantes metapelitos, arenitos, formações ferríferas, piroclásticas ácidas à intermediárias, basaltos e gabros (COSTA, 1991a).

Na mina do Igarapé Bahia os gossans e metapelitos encaixantes foram modificados pelo evento de lateritização no Terciário Inferior, que atingiu toda a região amazônica e que formou os grandes depósitos de bauxita, ferro, caulim e fosfato, entre outros (COSTA, 1991a).

Para o estudo da relação crosta-solo foram amostrados três perfis na área dos solos vermelhos (Figura 4.1), localizados na frente de lavra da Mina do Igarapé Bahia. Os perfis variam de poucas dezenas de centímetros até mais de 12m de profundidade, apresentando expressivas variações laterais (Figura 4.2).

O perfil 1 (Figura 4.2) é constituído na sua base por um material representativo de uma crosta laterítica ferro-aluminosa já desagregada, onde os fragmentos estão envolvidos por uma matriz argilosa avermelhada, de aspecto terroso. Essa matriz é

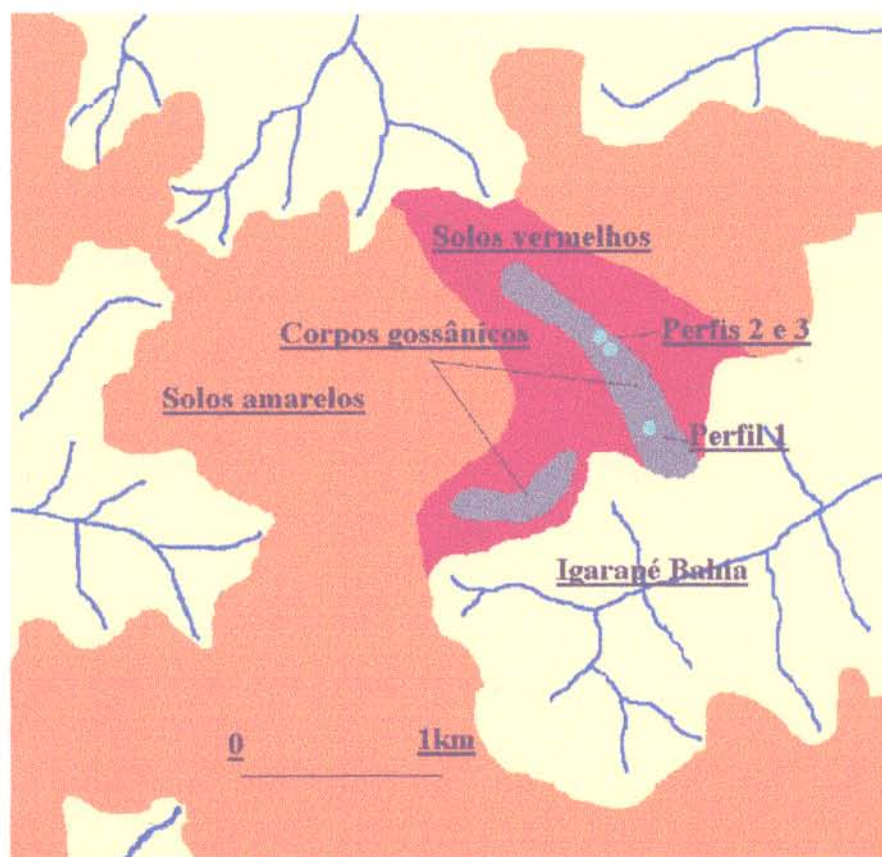
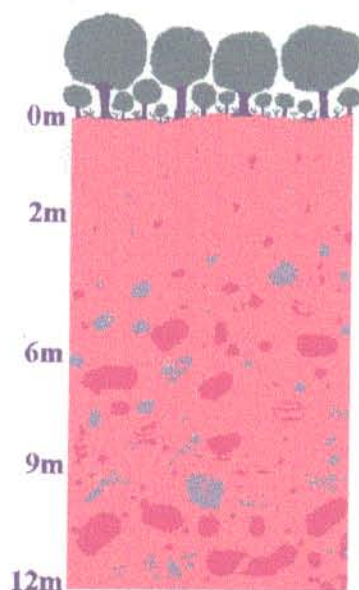


Figura 4.1: Mapa de localização da área mineralizada do Igarapé Bahia com individualização dos solos amarelos e vermelhos.

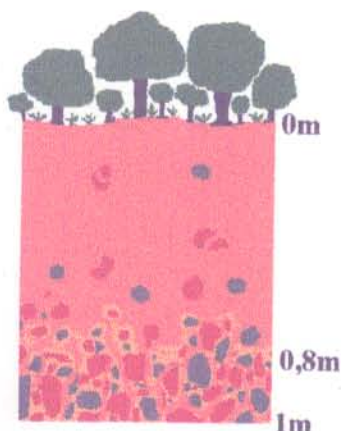
PERFIL 1



Material argiloso vermelho, composto por caolinita, gibbsita, goethita, hematita e raros fragmentos milimétricos de gossan (cinza) e metapelito (marrom-avermelhado) (Solo).

Material desagregado onde predomina uma matriz argilosa avermelhada sobre os fragmentos de gossan e metapelito (Crosta intemperizada).

PERFIS 2 e 3



Material argiloso vermelho similar ao do topo do perfil 1 (Solo).

Material parcialmente desagregado onde fragmentos de gossan e metapelito predominam sobre uma matriz argilosa vermelha (Crosta parcialmente intemperizada).

Figura 4.2: Perfis de alteração da crosta ferro-aluminosa do Igarapé Bahia

formada por caolinita, gibbsita, goethita e hematita. Os fragmentos da crosta, com até 20cm de diâmetro, são constituídos por restos de gossans e de metapelitos.

Os fragmentos de gossan, de cor cinza e brilho metálico, são constituídos por hematita e goethita, com fraturas preenchidas por material argiloso ocre (Figura 4.3) à base de goethita e caolinita. Os fragmentos de metapelito, por outro lado, apresentam cor avermelhada, textura maciça a laminada, por vezes nodular (Figura 4.4), sendo constituídos por goethita, hematita e gibbsita.

A crosta desagregada passa a solo em direção à superfície, apresentando aspecto terroso, microagregado, formado pelos mesmos minerais encontrados na matriz argilosa (Figura 4.4).

Os perfis 2 e 3 (Figura 4.2) são constituídos, na sua base, por uma crosta laterítica ferro-aluminosa apenas parcialmente desagregada, onde fragmentos irregulares com até 50cm de diâmetro, irregulares, são envolvidos por matriz argilosa avermelhada, de aspecto terroso, formada por caolinita, gibbsita, goethita e hematita. Sobre essa crosta, em contato gradacional, ocorre solo de aspecto similar ao do perfil 1. No solo ocorrem raros fragmentos de metapelito. Os dois perfis tem um metro de espessura (Figura 4.2). Os fragmentos dessa crosta parcialmente desagregada englobam fragmentos menores, nodulares, de material gossânico e de metapelito (Figura 4.5). Apesar de não terem sido identificados fragmentos isolados de gossan e metapelito, como na crosta intemperizada do perfil 1, eles ocorrem fora da área selecionada para a amostragem.

Em resumo, os perfis de alteração das crostas ferro-



Figura 4.3: Fragmento de gossan de cor cinza com fraturas preenchidas por material argiloso ocre. Material da crosta intemperizada do perfil 1.



Figura 4.4: Fragmentos de metapelite lateritizada com textura nodular. Material da crosta intemperizada do perfil 1.



Figura 4.5: Aspecto nodular dos fragmentos da crosta parcialmente intemperizada onde se identificam os nódulos de gossan de cor cinza e os de metapelite lateritizada avermelhados envolvidos pelo cimento ocre.

aluminosas do Igarapé Bahia, da mesma forma que em N5, são constituídos, da base para o topo, dos seguintes horizontes: crosta parcialmente desagregada, crosta desagregada e solo.

A ausência da crosta ferro-aluminosa são, ainda presente localmente em N5, indica que os perfis do Igarapé Bahia experimentaram maior grau de alteração. A fragmentação da crosta ferro-aluminosa, a predominância da matriz argilosa na crosta desagregada e a quase ausência desses fragmentos no solo, é similar ao observado em N5. Portanto, os horizontes identificados acima terão a mesma denominação dos de N5, sendo os fragmentos denominados relictos.

4.2 - CARACTERÍSTICAS MICROMORFOLÓGICAS

4.2.1 - Crosta Parcialmente Intemperizada

Este horizonte é formado por relictos da crosta e por uma incipiente matriz argilosa. Os relictos, com até 50cm de diâmetro, incorporam fragmentos menores de formas nodulares, que variam de poucos milímetros até 5cm de diâmetro. Os nódulos são de restos de gossan, metapelito e, por vezes, de formação ferrífera, que estão cimentados por um plasma gibbsítico (Figura 4.5).

Os nódulos de gossan têm o interior (Figura 4.6) hematítico de coloração preta, com poros preenchidos por gibbsita microcristalina e uma borda externa onde predomina goethita. Os nódulos de metapelito apresentam um núcleo marrom-avermelhado, cujos poros também estão preenchidos por gibbsita e uma borda externa ferruginosa quase preta, descontínua (Figura 4.7). Essa

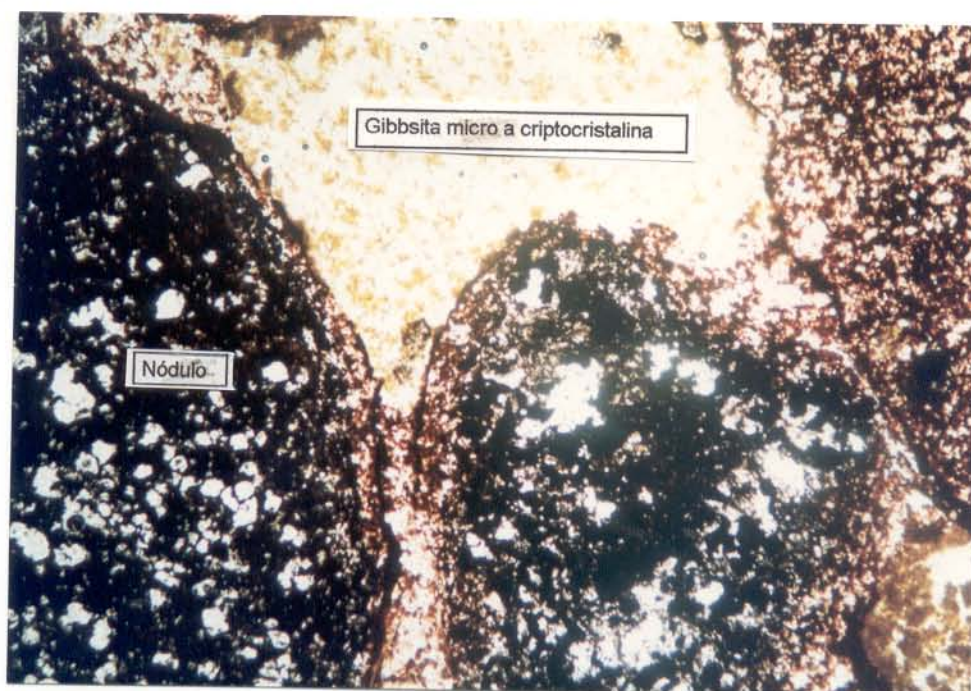


Figura 4.6: Aspecto dos nódulos de goossan com borda desferrificada e cimentados por gibbsita microcristalina na crosta parcialmente intemperizada. $1\text{cm}=0,7\text{mm}$.



Figura 4.7: Aspecto dos nódulos de metapelite da crosta parcialmente intemperizada onde se individualizam os nódulos ferruginosos com borda mais escura de óxi-hidróxidos e poros preenchidos por gibbsita. $1\text{cm}=0,7\text{mm}$.pn111

borda, ainda ferruginosa nos nódulos de gossan e de metapelito, é similar à observada em N5.

Ocasionalmente os nódulos de gossan e metapelito lateritizado encontram-se envolvidos por um córtex goethítico cristalino, com alternância de cores vermelho-alaranjado à laranja-avermelhado, formando franjas concêntricas. O plasma gibbsítico que envolve os nódulos (gossan, metapelito e, por vezes, restos de formação ferrífera) é microcristalino, ocasionalmente manchada por um plasma criptocristalino de cor avermelhada (plasma internodular vermelho), de textura colomorfa, formado por gibbsita, goethita e caolinita.

4.2.2 - Crosta Intemperizada

Nessa crosta os relictos isolados de gossan e metapelito são menos comuns e, em geral, de diâmetro menor que os relictos do horizonte anterior. Os relictos de gossan são maciços, tem brilho metálico, formados por hematita e goethita. Envolvendo os relictos, do mesmo modo que nos nódulos do horizonte anterior, há um plasma ferruginoso, criptocristalino, de coloração marrom-avermelhada (Figura 4.8), constituído por caolinita, Al-goethita e gibbsita. Localmente, entre a porção opaca do relicto de gossan e o plasma marrom-avermelhado, ocorre goethita cristalina, cutânica, fibro-radial, de coloração vermelho-alaranjada, formando franjas de cristais de goethita dispostas perpendicularmente à superfície do poro.

Os relictos de metapelito lateritizado, assim como os nódulos do horizonte anterior, são microporosos, formados por um plasma marrom-avermelhado constituído por gibbsita, caolinita,

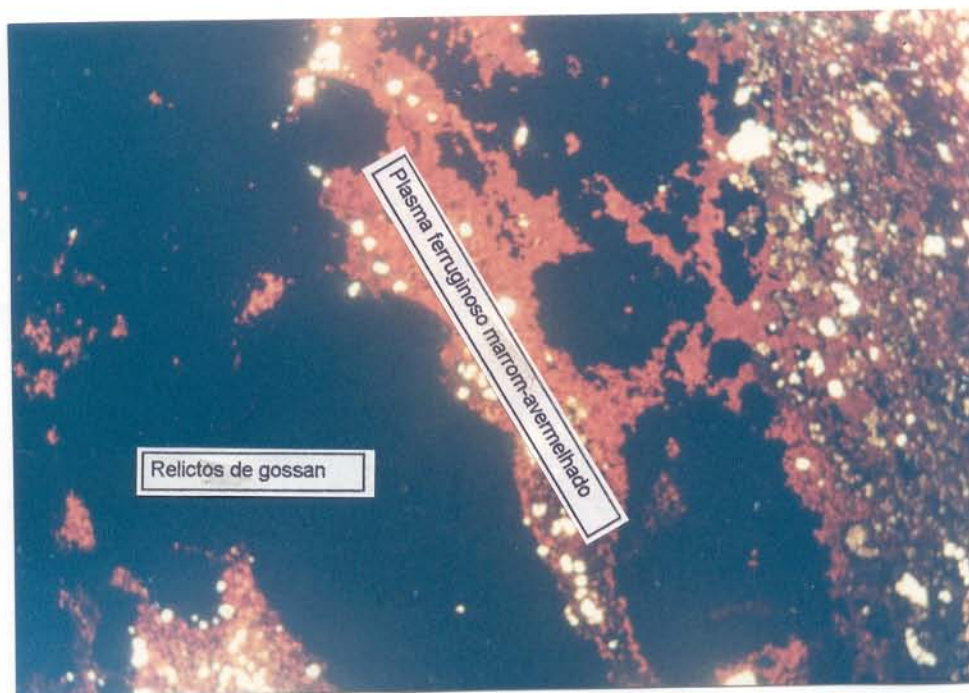


Figura 4.8: Relictos de gossan envolvidos pelo plasma ferruginoso marrom-avermelhado. 1cm=0,7mm.

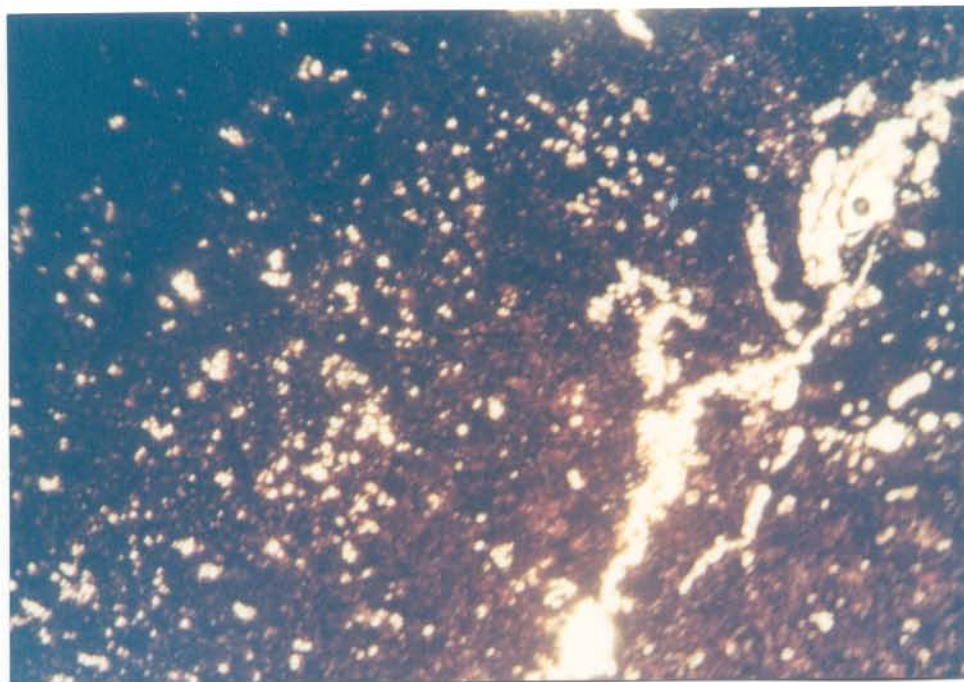


Figura 4.9: Relictos de metapelite formados por plasma marrom-avermelhado com fraturas preenchidas por gibbsita microcristalina. 1cm=0,7mm.

goethita, hematita e quartzo. No interior dos relictos, fissuras e poros são preenchidos por cristais de gibbsita microcristalina (Figura 4.9). Outras fissuras, que cortam as anteriores, contêm um plasma de cor marrom a ocre, criptocristalino, colomorfo, formado por caolinita e goethita. Esse plasma geralmente engloba, próximos às paredes mais externas das fissuras, cristais de gibbsita e quartzo. A presença de gibbsita, caolinita e goethita nos relictos de metapelito mostra que eles representam uma rocha já lateritizada, motivo pelo qual passará a ser denominado de metapelito lateritizado. A presença de pelo menos duas fases de formação de caolinita: uma mais antiga relacionada à lateritização do metapelito e uma segunda fase, mais recente, associada à goethita, preenchendo fissuras e fraturas, indica a superimposição de um novo processo intempérico.

4.2.3 - Solo

é formado por um plasma ferruginoso avermelhado, criptocristalino, com textura microagregada. Imersos nesse plasma ocorrem raros relictos milimétricos de gossan e de metapelito lateritizado além de grãos de quartzo, com fraturas preenchidas por óxido de ferro. Pode-se observar também cristais de zircão geralmente zonado. Os raros relictos são envolvidos por um plasma marrom-avermelhado microporoso que predomina sobre porções mais maciças e escuras do núcleo. O contato difuso entre o núcleo e o plasma (Figura 4.10) evidencia um processo de cominuição.

4.2.4 - Sequência de Alteração da Crosta ao Solo

A estruturação do perfil em: crosta parcialmente

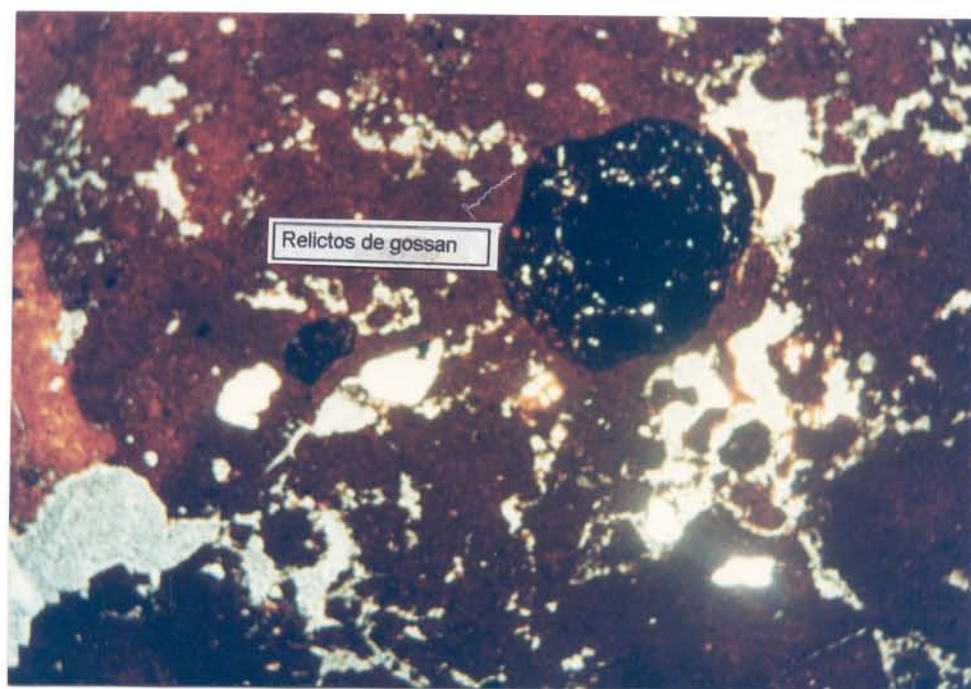


Figura 4.10: Relictos de gossan onde se individualiza um núcleo ferruginoso com bordas porosas imersos no plasma ferruginoso avermelhado que constitui o solo. $\text{icm}=0,7\text{mm}$.

intemperizada, crosta intemperizada e solo, indica, pela individualização de relictos e o aumento gradativo da proporção da matriz argilosa, a gradual transformação da crosta em solo em direção ao topo do perfil (Figura 4.11), de modo semelhante ao observado em N5. A ausência da crosta sã nos três perfis, bem como da parcialmente intemperizada no perfil 1, sugere o seu intenso retrabalhamento durante etapas de modificação da paisagem, envolvendo escorregamento de massa com preenchimento de depressões, levando ao estabelecimento de um perfil parcialmente alóctone. Observa-se que, tanto neste perfil como em N5, parte da caolinita está relacionada a processos posteriores à formação da gibbsita.

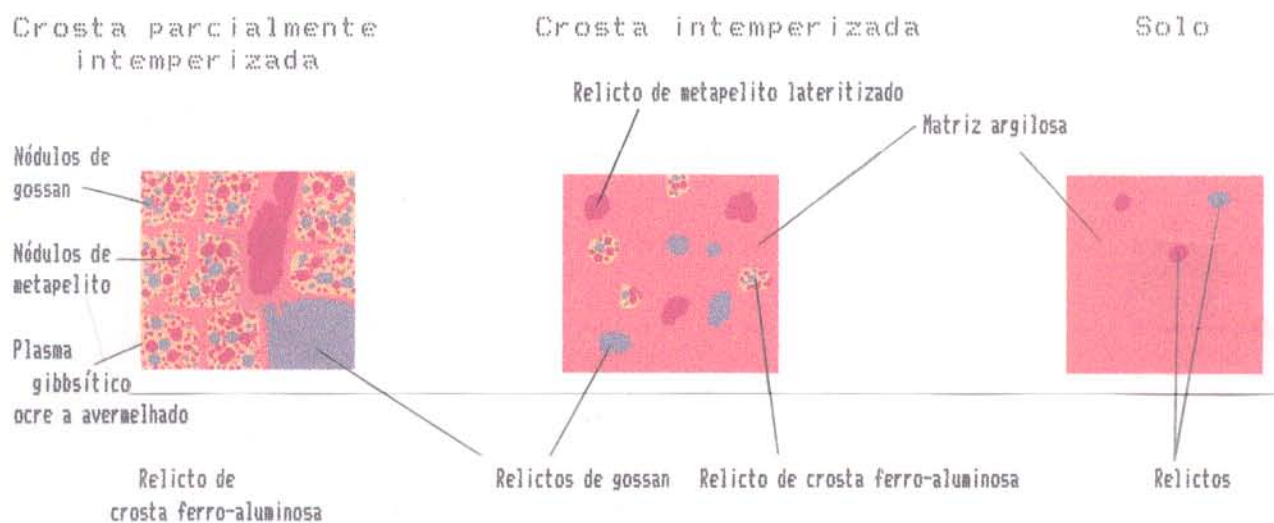


Figura 4.11: Sequência esquemática do intemperismo da crosta em direção ao solo no Igarapé Bahia, com base na estruturação do perfil e nos seus aspectos micromorfológicos

4.3 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

Devido ao fato do material estar totalmente desagregado e por serem os relictos muito grosseiros (ver item 2.2), o estudo da relação crosta-solo será feito no perfil 1, com base nas

transformações sofridas pelos relictos e pela matriz argilosa ao longo dos perfis.

Mineralogicamente os três perfis do Igarapé Bahia são formados por caolinita, gibbsita, goethita, hematita, quartzo e anatásio, que variam proporcionalmente entre si de acordo com o tipo de relictos (gossan e metapelito lateritizado) e ao longo do perfil (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Composição mineralógica dos perfis 1, 2 e 3 do Igarapé Bahia (% em peso).

HORIZONTE	Caolinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Quartzo	Anatásio
PERFIL 1						
SOLO	2	40	41	<1	11	5
CROSTA INTENPERIZADA (2,0m)						
Matriz argilosa	17	31	41	1	5	4
Relicto de metapelito lateritizado	4	38	40	2	11	4
Relicto de gossan	4	3	56	36		<1
CROSTA INTENPERIZADA (6,0m)						
Matriz argilosa	36	20	38	2		4
Relicto de gossan	6	<1	36	57		<1
CROSTA INTENPERIZADA (9,0m)						
Matriz argilosa	34	16	31	13		5
Relicto de metapelito lateritizado	38	<1	43	15		3
Relicto de gossan	5	4	22	68		<1
CROSTA INTENPERIZADA (12,0m)						
Matriz argilosa	21	18	37	21		2
Relicto de metapelito lateritizado	21	18	41	17		2
PERFIL 2						
SOLO						
Matriz argilosa	25	26	21	19	5	3
Relicto de metapelito lateritizado	28	<1	48	23		<1
CROSTA PARCIALMENTE INTENPERIZADA (1,0m)	6	1	48	43		1
PERFIL 3						
SOLO	12	35	32	7	10	3
SOLO (0,8m)	33	23	34	6		3
CROSTA PARCIALMENTE INTENPERIZADA (1,0m)	32	10	3	53		1

(0,5m) profundidade em relação topo do perfil

A composição mineralógica dos relictos e da matriz argilosa ao longo dos três perfis caracteriza-se, em geral, pela diminuição nos teores de caolinita e hematita e concomitante aumento nos de gibbsita, quartzo e anatásio, enquanto os de goethita quase não variam (Figura 4.12 e 4.13). Essa distribuição mineralógica ocorre tanto a nível de relictos ao longo do perfil como de relictos para matriz argilosa e solo (Tabela 4.1). Observa-se ainda que o relictos de metapelito lateritizado tende a assemelhar-se mineralogicamente à matriz argilosa no topo do perfil. Os baixos teores de caolinita no solo do perfil 1 permitem correlacioná-lo com o solo do perfil 1 de N5 e, portanto, de composição equivalente à bauxita, enquanto os demais, com teores de caolinita mais elevados, se assemelham ao do perfil 2 de N5.

Nota-se, portanto, que apesar da heterogeneidade dos materiais que formam os perfis do Igarapé Bahia, a variação da composição mineralógica entre os relictos que constituem a crosta e o solo é similar ao perfil de N5. Os teores mais elevados de caolinita e quartzo na matriz argilosa do que nos relictos representam, juntamente com a presença de goethita, a dissolução de crostas subjacentes segundo NAHON et al. (1979) e o processo de podzolização do topo dos perfis.

Na distribuição mineralógica dos três perfis, com base no teor de hematita+caolinita e no de gibbsita+goethita, tem-se uma variação linear e contínua entre esses dois grupos de minerais (Figura 4.14), que é similar à observada entre a crosta sã e o solo de N5.

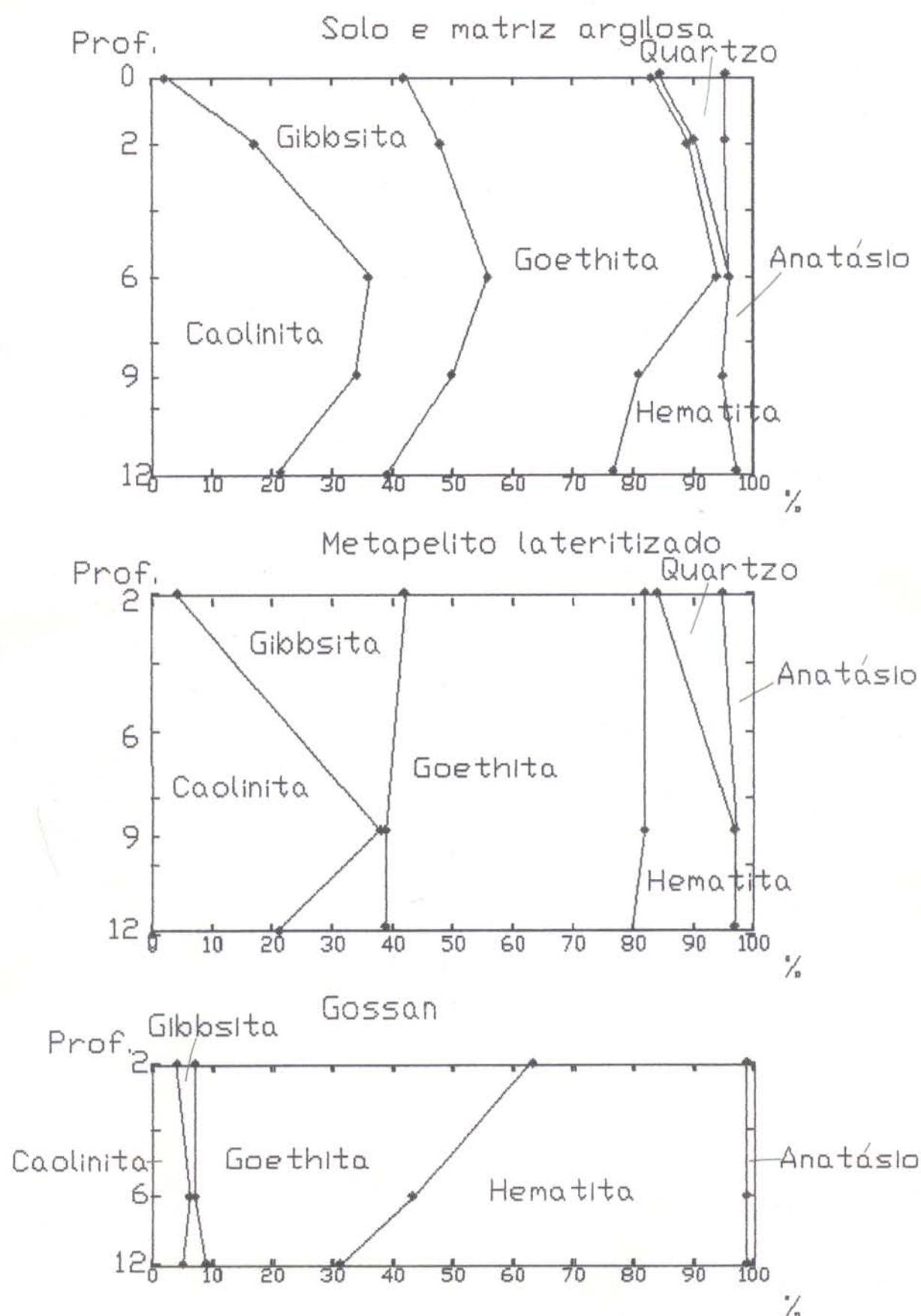


Figura 4.12: Composição mineralógica dos materiais que compõem o perfil 1 do Igarapé Bahia

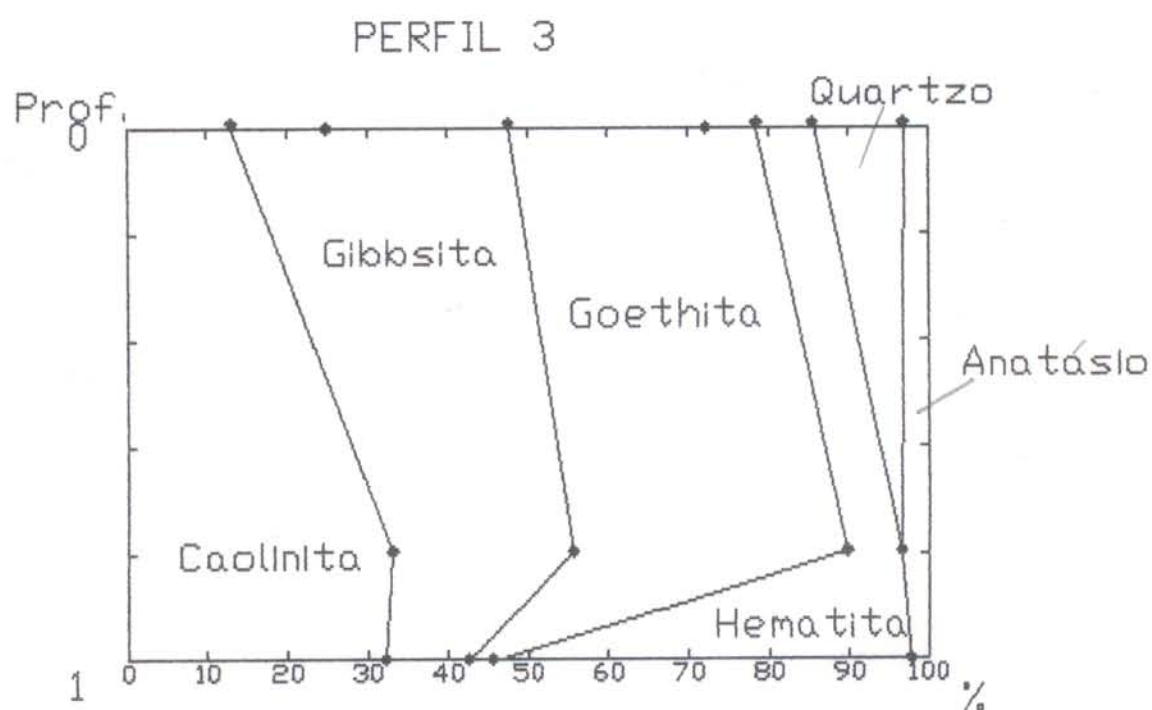
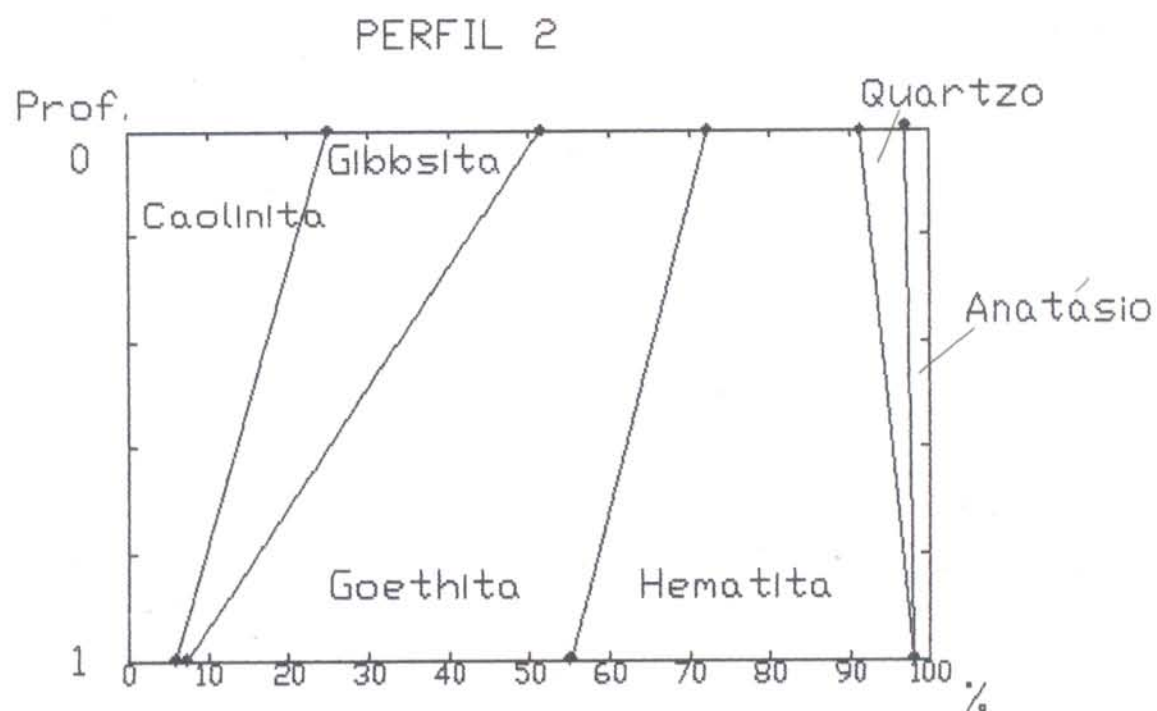
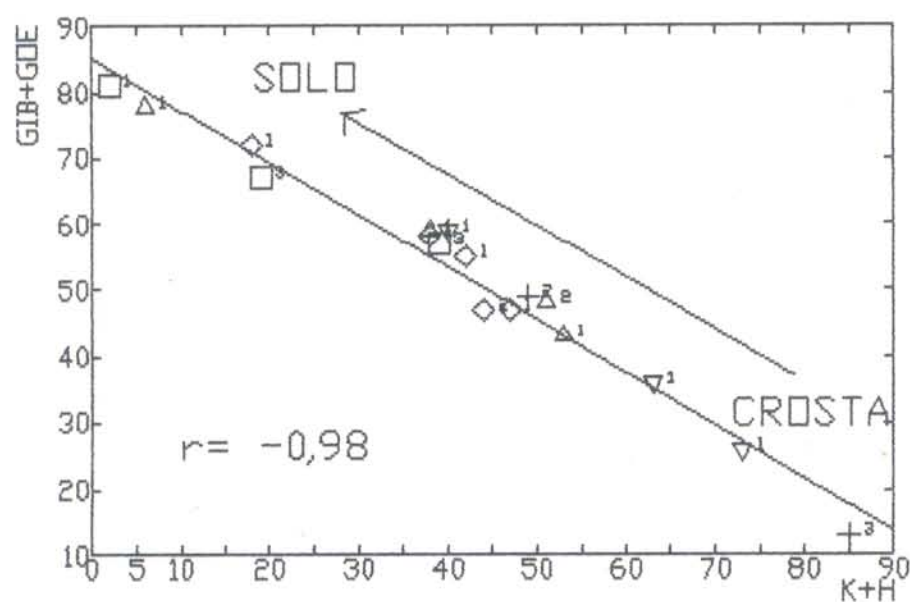


Figura 4.13: Composição mineralógica dos perfis 2 e 3 do Igarapé Bahia



1 Perfil 1 2 Perfil 2 3 Perfil 3

□ SOLO

◇ CROSTA INTEMPERIZADA

△ Matriz argilosa

▽ Metapelito lateritizado

+ Gossan

× CROSTA PARCIALMENTE INTEMPERIZADA

Figura 4.14: Correlação caolinita+hematita (K+H) e gibbsita+goethita (GIB+GOE) nos três perfis do Igarapé Bahia

4.3.1 - Conteúdo de Alumínio nas Goethitas

O conteúdo de alumínio nas goethitas dos perfis do Igarapé Bahia varia em função do tipo de material (Tabela 4.2).

Tabela 4.2: Moles % de $AlOOH$, fórmula mínima e teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 nas goethitas dos perfis do Igarapé Bahia.

HORIZONTE	Moles % de $AlOOH$	Fórmula Mínima	$Al_2O_3\%$	$Fe_2O_3\%$
PERFIL 1				
SOLO	34	$(Fe_{0.66}Al_{0.34})OOH$	29	59
CROSTA INTemperizada (2,0m)				
Matriz argilosa	32	$(Fe_{0.68}Al_{0.32})OOH$	27	61
Relicto de metapelito lateritizado	32	$(Fe_{0.68}Al_{0.32})OOH$	27	61
Relicto de gossan	3	$(Fe_{0.97}Al_{0.03})OOH$	3	87
CROSTA INTemperizada (6,0m)				
Matriz argilosa	33	$(Fe_{0.67}Al_{0.33})OOH$	28	60
Relicto de gossan	2	$(Fe_{0.98}Al_{0.02})OOH$	2	88
CROSTA INTemperizada (9,0m)				
Matriz argilosa	38	$(Fe_{0.62}Al_{0.38})OOH$	32	56
Relicto de metapelito lateritizado	8	$(Fe_{0.92}Al_{0.08})OOH$	7	82
Relicto de gossan	6	$(Fe_{0.94}Al_{0.06})OOH$	5	84
CROSTA INTemperizada (12,0m)				
Matriz argilosa	32	$(Fe_{0.68}Al_{0.32})OOH$	27	61
Relicto de metapelito lateritizado	4	$(Fe_{0.96}Al_{0.04})OOH$	3	86
PERFIL 2				
SOLO (0,3m)				
Matriz argilosa	32	$(Fe_{0.68}Al_{0.32})OOH$	27	61
Relicto de metapelito lateritizado	26	$(Fe_{0.74}Al_{0.26})OOH$	22	67
CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada (1,0m)	2	$(Fe_{0.98}Al_{0.02})OOH$	2	88
PERFIL 3				
SOLO (0,5m)	32	$(Fe_{0.68}Al_{0.31})OOH$	27	61
SOLO (0,8m)	31	$(Fe_{0.69}Al_{0.31})OOH$	26	62
CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada (1,0m)	12	$(Fe_{0.88}Al_{0.12})OOH$	10	79

(2,0m) profundidade em relação topo do perfil

Os moles % de $AlOOH$ nas goethitas do gossan quase não variam ao longo do perfil 1, sendo as que apresentam a menor taxa de substituição do Fe pelo Al (de 2 a 6 moles % de $AlOOH$) (Figura 4.15). Não sofreram, portanto, modificações substanciais durante

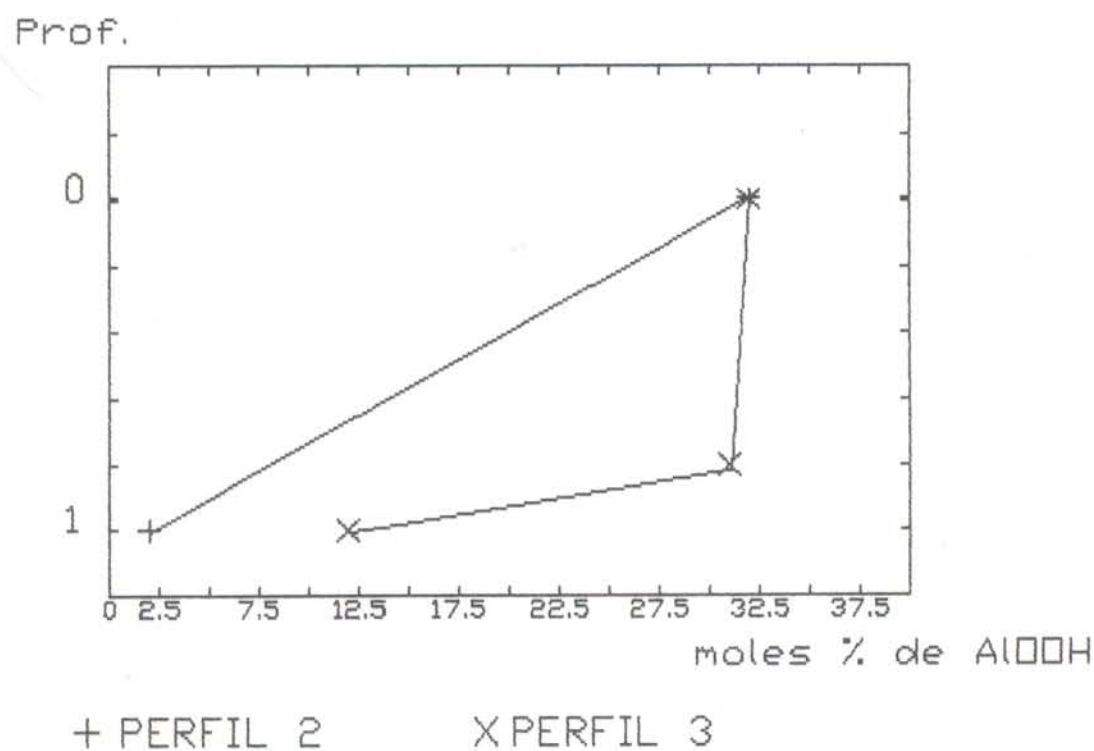
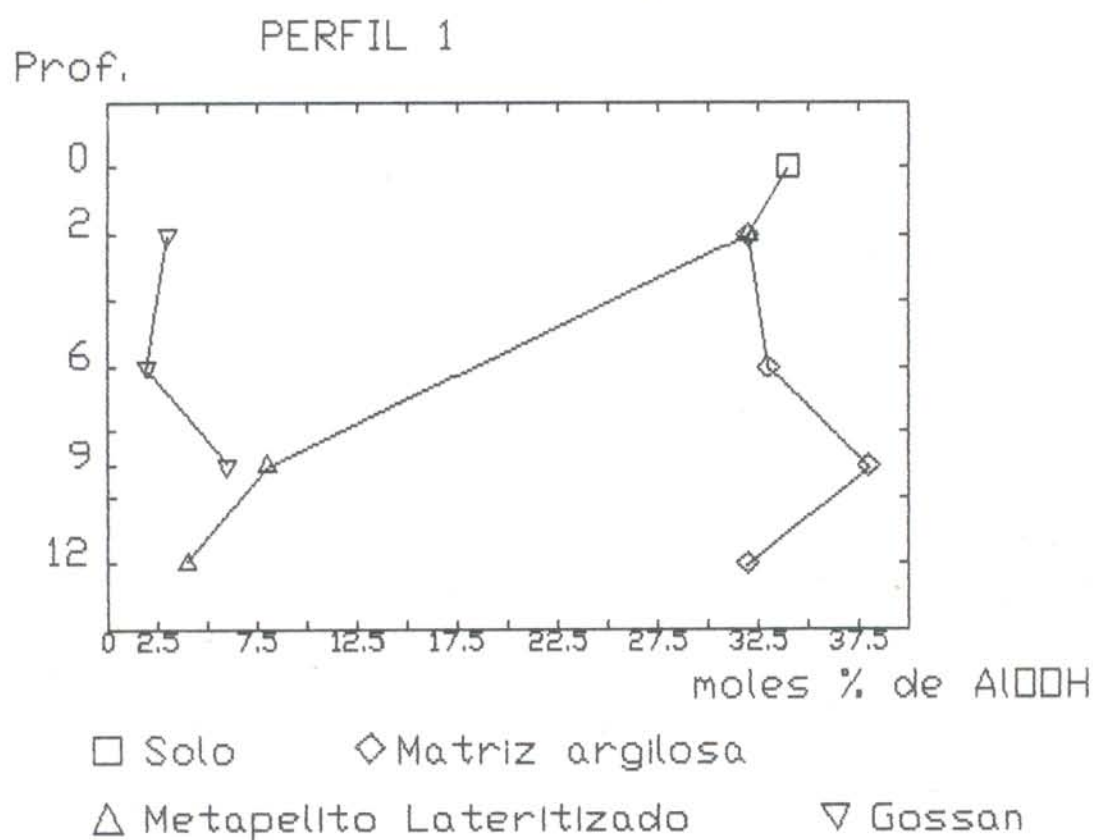


Figura 4.15: Conteúdo de AlOOH nas goethitas dos perfis do Igarapé Bahia

o intemperismo e os relictos de gossan, embora cada vez menores, estão ainda mineralogicamente preservados.

Por outro lado, nos relictos de metapelito lateritizado a substituição do Fe por Al aumenta da base para o topo do perfil, passando de goethitas pouco aluminosas (4 moles % de AlOOH) na base do perfil, para muito aluminosas (32 moles % de AlOOH) no topo da crosta intemperizada (Figura 4.15). Esses dados mostram que os metapelitos foram intemperizados em grau crescente para o topo do perfil.

A goethita da matriz argilosa é tipicamente aluminosa com teores entre 31 e 38 moles % de AlOOH, não variando sensivelmente ao longo do perfil (Figura 4.15). Este valor é superior ao conteúdo máximo de 33 moles % de AlOOH reportado em goethitas de solos (TARDY & NAHON, 1985 e TARDY, 1993).

Nos perfis 2 e 3 as goethitas mais aluminosas (32 moles % de AlOOH) também estão presentes no solo (Figura 4.15), enquanto que as da crosta parcialmente intemperizada variam de 2 a 12 moles % de AlOOH.

O teor crescente de AlOOH dos relictos para a matriz argilosa e metapelito lateritizado ao longo do perfil é semelhante ao observado em N5, sugerindo uma filiação química entre os relictos e o solo dos três perfis do Igarapé Bahia. Indica ainda que o gossan é mais refratário ao intemperismo que o metapelito lateritizado.

4.4 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

4.4.1 - Composição Química Geral

Os três perfis do Igarapé Bahia são constituídos essencialmente por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 que, juntamente com a perda ao fogo, compõem mais de 95% da sua composição química total (Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Composição química dos perfis da mina do Igarapé Bahia (% em peso).

HORIZONTES	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	TiO_2	PF	TOTAL
PERFIL 1							
SOLO	12,08	27,74	37,14	2,22	4,66	18,70	100,32
CROSTA INTemperizada (2,0m)							
Matriz argilosa	12,80	27,57	38,86	0,79	4,16	17,76	101,15
Relicto de metapelito lateritizado	13,08	26,78	38,42	0,36	4,14	17,94	100,36
Relicto de gossan	2,00	3,91	84,82	0,21	<1	7,30	98,03
CROSTA INTemperizada (6,0m)							
Matriz argilosa	17,10	27,74	37,48	0,79	3,73	16,17	102,22
Relicto de gossan	2,90	3,44	87,10	7,39	<1	4,62	98,06
CROSTA INTemperizada (9,0m)							
Matriz argilosa	15,72	23,81	41,45	0,50	4,79	13,42	99,19
Relicto de metapelito lateritizado	17,80	15,35	53,69	0,21	2,91	9,85	99,60
Relicto de gossan	2,30	4,84	90,43	6,30	0,18	4,41	102,16
CROSTA INTemperizada (12,0m)							
Matriz argilosa	10,00	20,50	53,91	0,31	2,31	13,06	99,78
Relicto de metapelito lateritizado	3,86	25,75	56,04	0,36	1,59	13,53	100,77
PERFIL 2							
SOLO							
Matriz argilosa	16,78	27,60	40,31	0,36	2,65	14,97	102,31
Relicto de metapelito lateritizado	13,00	11,08	66,91	0,57	0,82	6,51	98,32
CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada (1,0m)	7,51	7,31	77,54	4,45	0,64	7,51	100,51
PERFIL 3							
SOLO	15,50	27,77	37,32	1,22	3,13	16,89	100,61
SOLO (0,8m)	15,94	28,61	37,14	0,65	3,21	16,29	101,19
CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada (1,0m)	16,80	12,78	60,53	0,68	0,95	8,05	99,11

T- teor total; (2,0m) profundidade em relação ao topo do perfil

No perfil 1 os relictos de gossan são marcados por teores

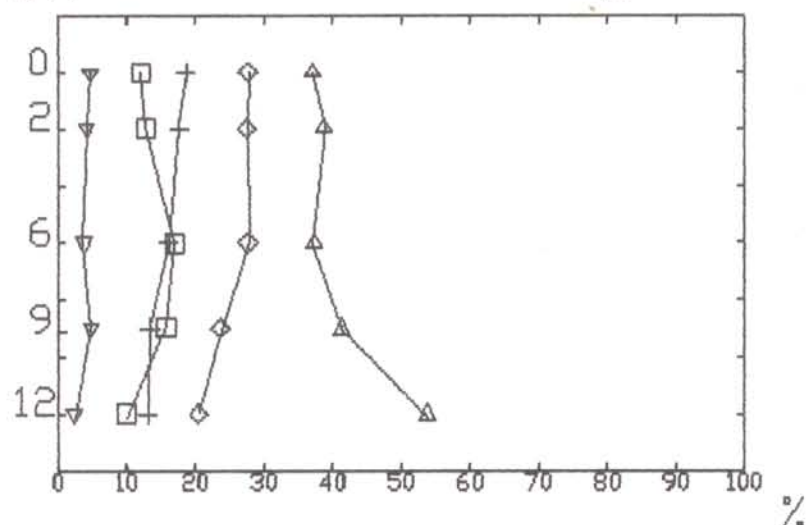
em Fe₂O₃ acima de 80%, caracterizando o domínio da hematita e goethita e pelos teores relativamente baixos de SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ e PF (<8%, Figura 4.16), que representam a caolinita, gibbsita e anatásio com pequenas variações ao longo do perfil, ou seja, praticamente inalterados (Figura 4.17).

Os relictos de metapelito lateritizado diferenciam-se dos do gossan pelos mais baixos teores de Fe₂O₃ (38% a 56%) e mais elevados em SiO₂, Al₂O₃ e TiO₂ (Tabela 4.3).

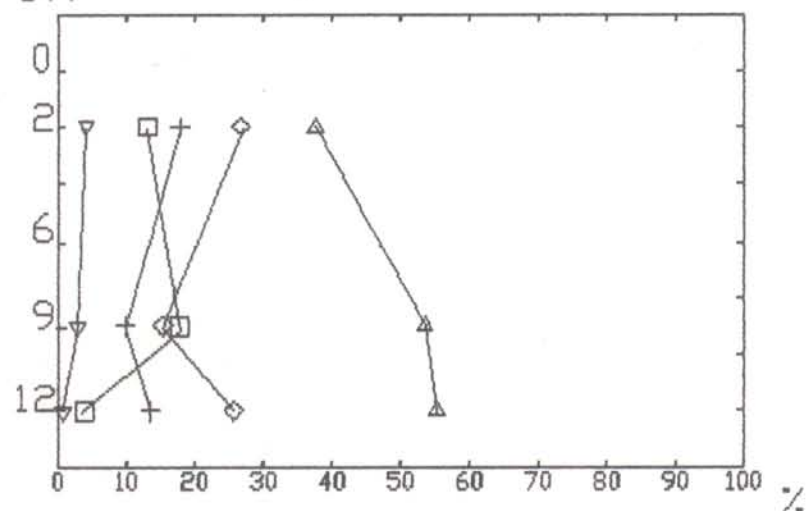
Ao longo do perfil, os relictos de metapelito lateritizado e a matriz argilosa caracterizam-se pela redução nos teores de Fe₂O₃ em direção ao topo, acompanhando a distribuição da hematita e pelo aumento de Al₂O₃, TiO₂ e PF (Figura 4.16), refletindo a distribuição da gibbsita e anatásio no perfil. A SiO₂ apresenta distribuição irregular. Isto indica que os relictos de metapelito lateritizado não se mantiveram intactos ao intemperismo, ao contrário dos de gossan. As variações um pouco mais acentuadas das curvas dos relictos de metapelito lateritizado (Figura 4.17) indicam que a sua composição ou era originalmente diferente, ou foi modificada, levando, principalmente, ao acúmulo de Al₂O₃ e assemelhando-se à composição da matriz argilosa (Figura 4.17). Isso permite inferir que no perfil prevalecem os metapelitos lateritizados como fonte principal da matriz argilosa e dos solos.

A crosta parcialmente intemperizada dos perfis 2 e 3 caracteriza-se pelos elevados teores de Fe₂O₃ (60% a 70%) e pelos mais baixos, e mais similares entre si, de SiO₂ e Al₂O₃ (Tabela 4.3 e Figura 4.18). No solo os teores de Fe₂O₃ são mais

Prof. SOLO e Matriz Argilosa



Prof. Metapelite Lateritizado



- SiO₂
- ◇ Al₂O₃
- △ Fe₂O₃
- ▽ TiO₂
- + PF

Prof. Gossan

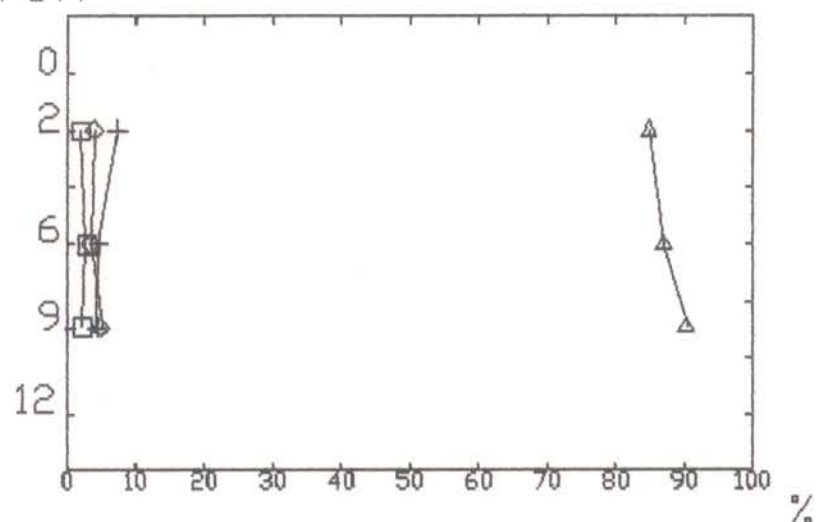


Figura 4.16: Distribuição da composição química por horizontes nos materiais do perfil 1 do Igarapé Bahia

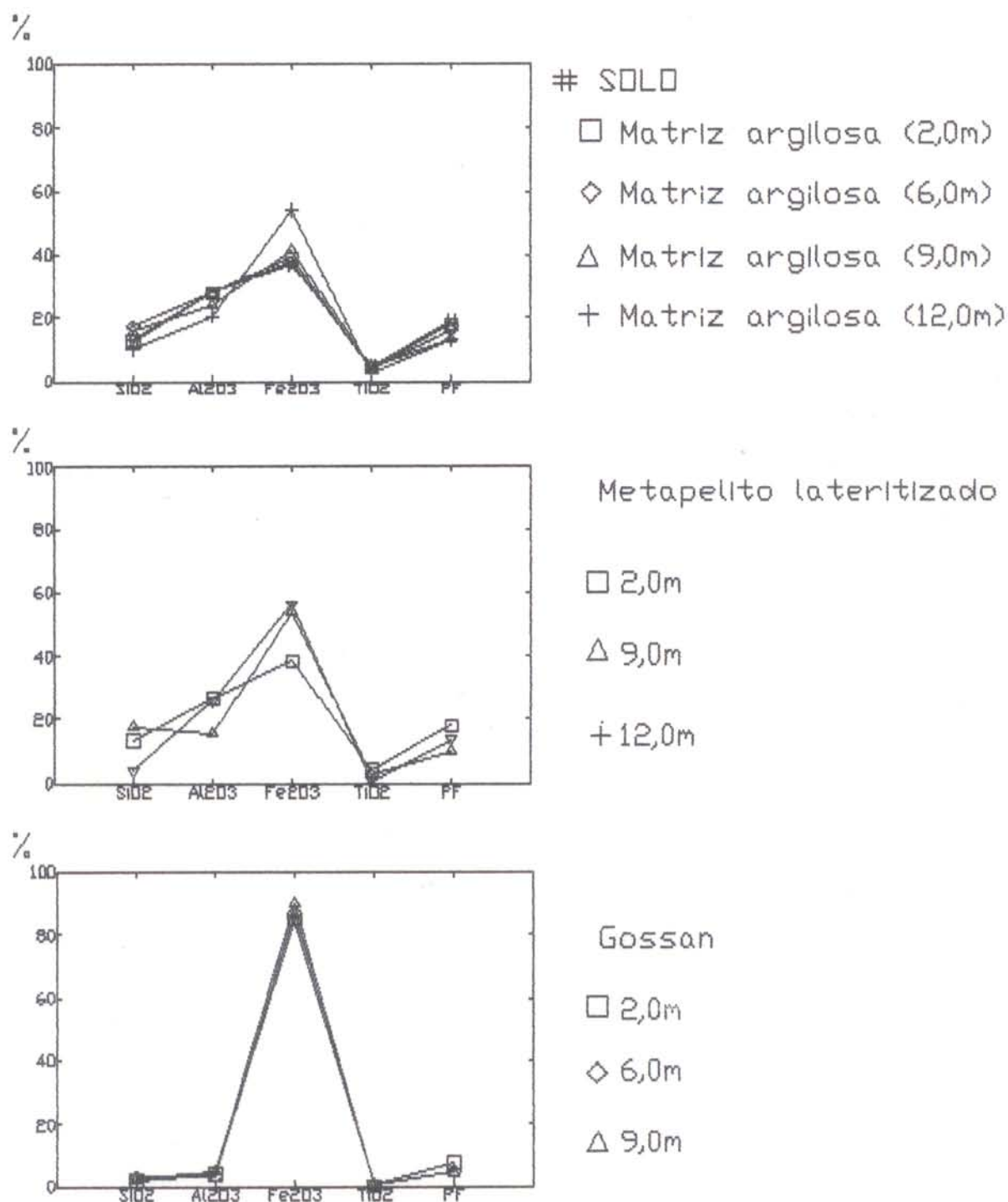


Figura 4.17: Distribuição da composição química por tipo de material ao longo do perfil 1 do Igarapé Bahia.

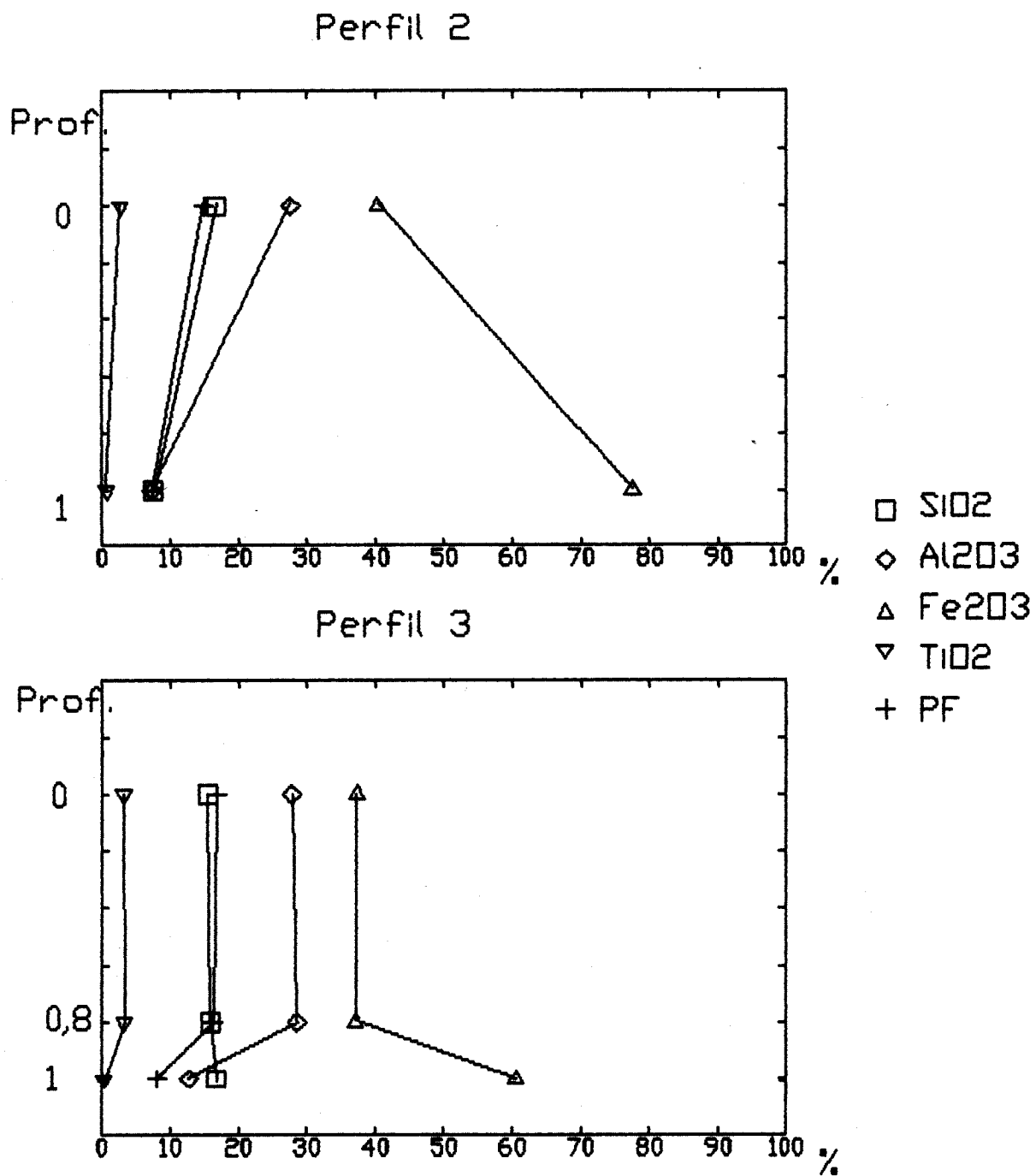


Figura 4.18: Distribuição da composição química por horizontes nos perfis 2 e 3 do Igarapé Bahia

baixos e os de Al_2O_3 , TiO_2 e PF mais altos que na crosta (Figura 4.18). Os teores de SiO_2 são maiores no solo do perfil 2 e similares a crosta no perfil 3 (15%). Nesses perfis a composição da crosta e do relicto de metapelito lateritizado diferem da matriz argilosa e do solos, mostrando que da crosta para o solo também tem-se diminuição no teor de Fe_2O_3 e aumento, principalmente, de Al_2O_3 (Figura 4.19), como observado em N5.

A correlação entre o Fe_2O_3 e Al_2O_3 nos diversos materiais ao longo dos três perfis (Figura 4.20) permite inferir uma filiação geoquímica entre eles, idêntica à obtida em N5.

No diagrama SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 (Figura 4.21) os materiais que compõem o perfil do Igarapé Bahia (matriz argilosa, metapelito lateritizado e gossan), a exemplo de N5, também constituem um campo composicional que converge para o membro Al_2O_3 e SiO_2 .

4.4.1.1 - Composição Química dos Componentes que Constituem a Crosta e seus Relictos

As análises químicas obtidas por microsonda eletrônica mostram que os relictos de gossan, encontrados na crosta intemperizada do perfil 1, são constituídos por cerca de 96% de Fe_2O_3 e menos de 1% de SiO_2 e Al_2O_3 (Tabela 4.4), divergindo da análise total desse material (Tabela 4.3), onde os teores de SiO_2 e Al_2O_3 são mais elevados. Essa diferença é originada pelo material argiloso que envolve o relicto e preenche os seus poros e fissuras e que não foi analisado por microsonda. Estes teores representam fundamentalmente a hematita e a goethita.

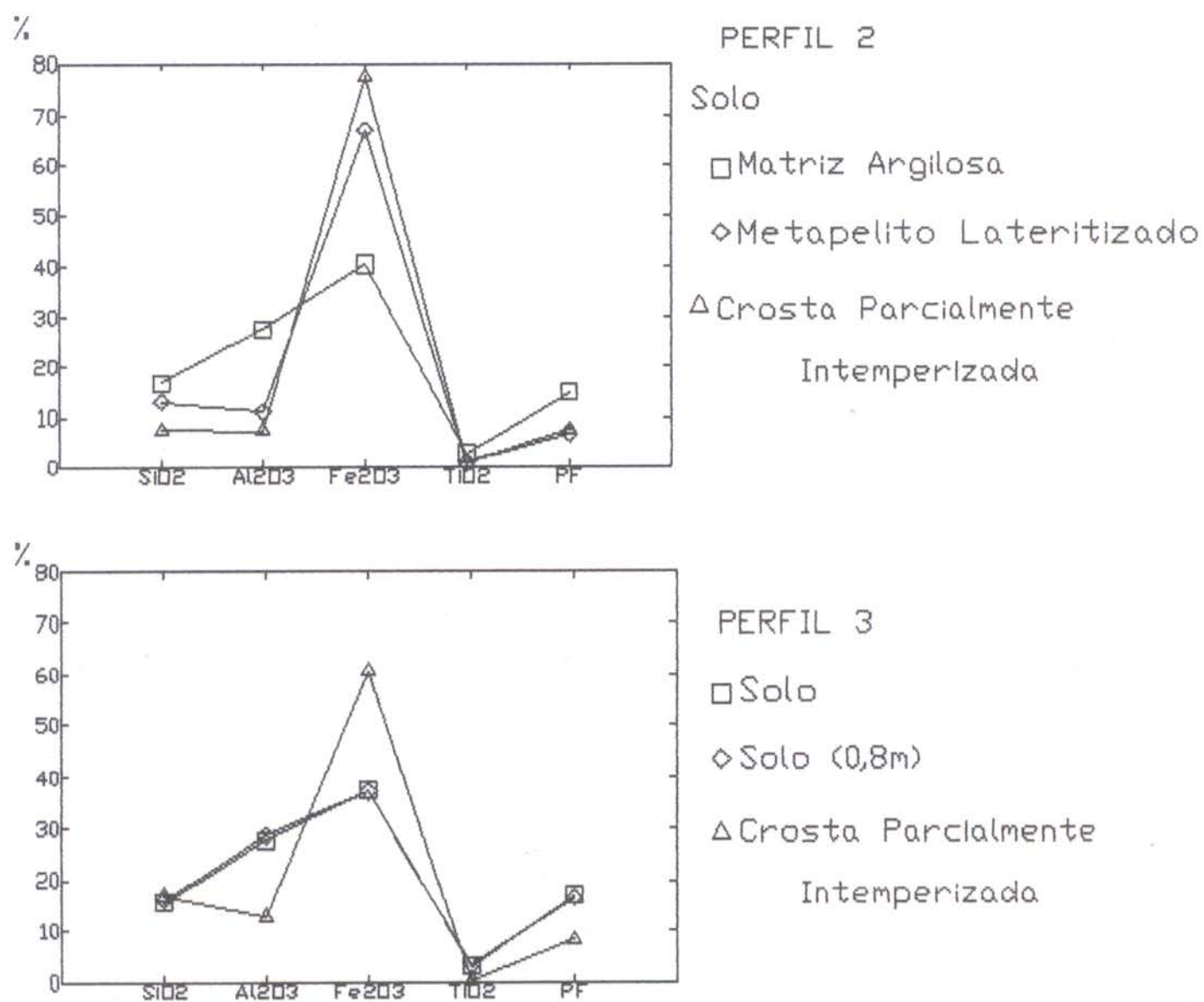
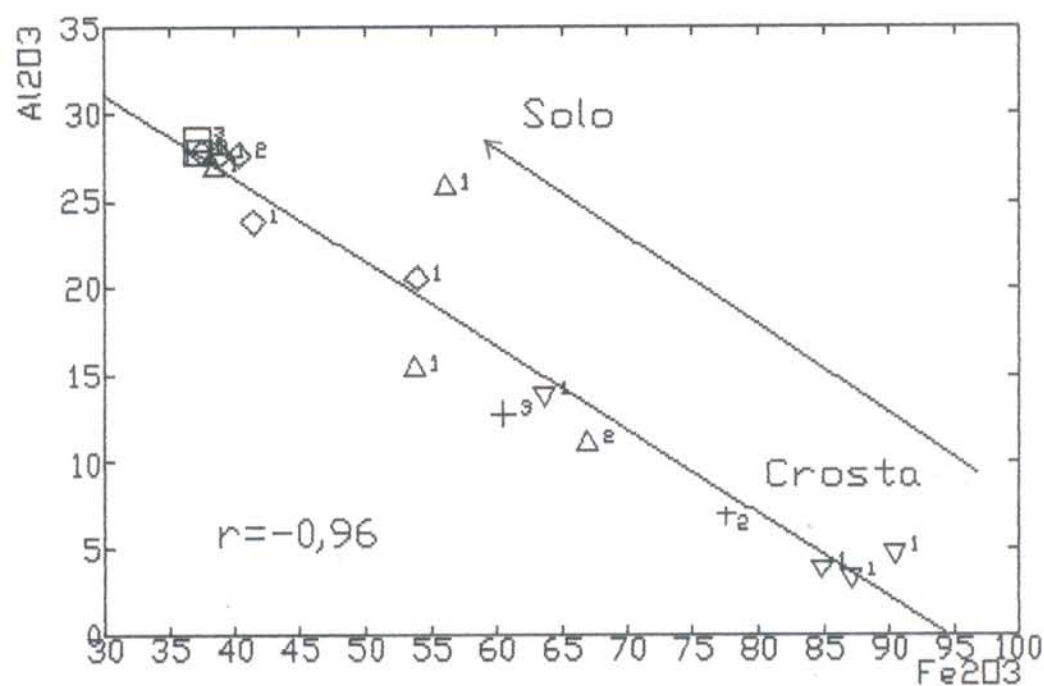


Figura 4.19: Distribuição da composição química dos perfis 2 e 3 do Igarapé Bahia



1 Perfil 1 2 Perfil 2 3 Perfil 3

□ SOLO

CROSTA INTEMPERIZADA

◇ Matriz argilosa

△ Metapelito lateritizado

▽ Gossan

+ CROSTA PARCIALMENTE INTEMPERIZADA

Figura 4.20: Correlação Fe_2O_3 e Al_2O_3 nos três perfis do Igarapé Bahia

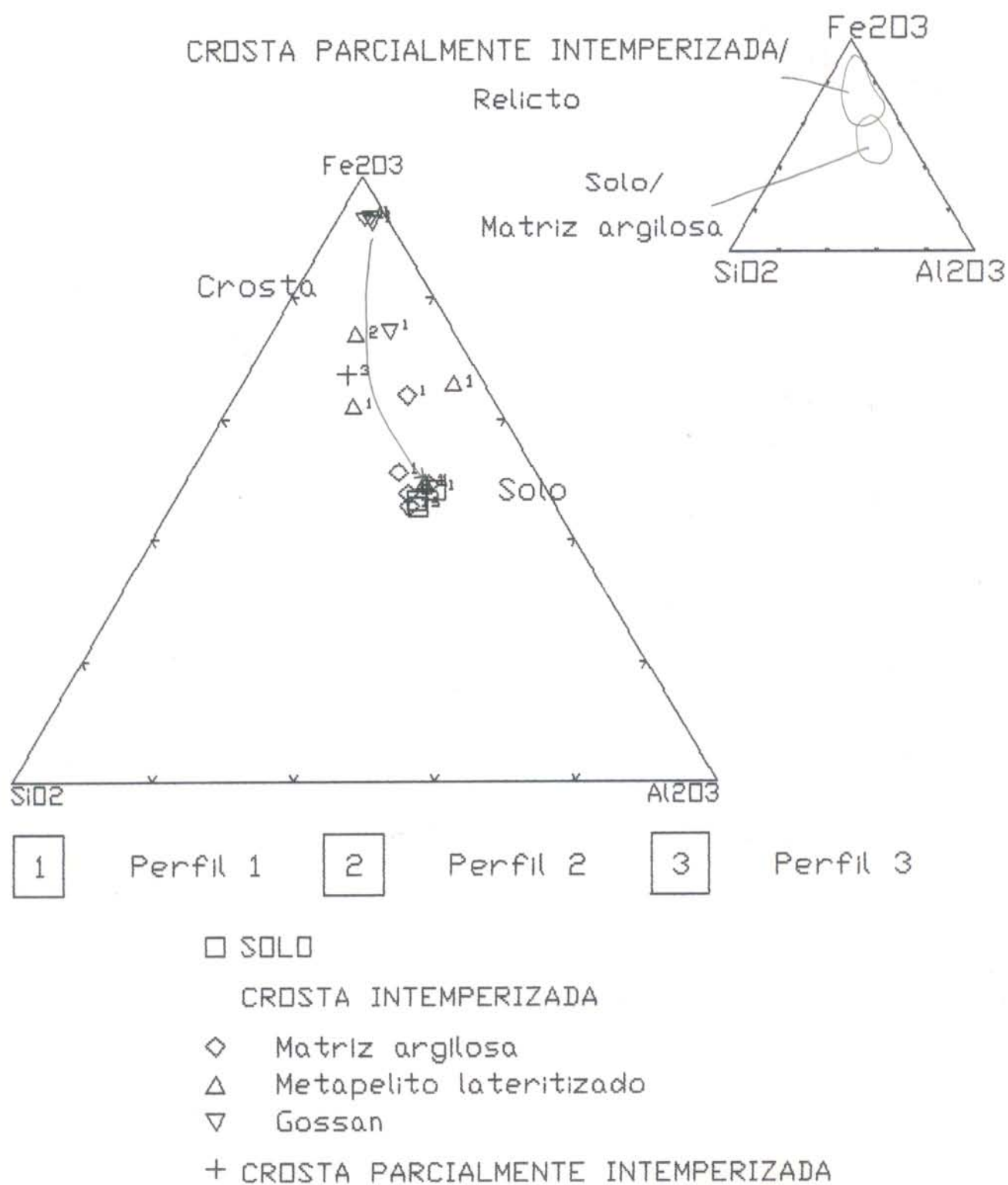


Figura 4.21: Diagrama SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃ dos 3 perfis do Igarapé Bahia

Tabela 4.4: Composição química dos relictos de gossan obtida por microsonda(% em peso).

Pontos analisados	SiO2	Al2O3	Fe2O3	TiO2	H2O	TOTAL
1	0,57	0,45	88,16	0,10	10,72	89,28
2	1,07	1,19	87,74	0,11	9,89	90,11
3	0,90	0,57	93,96	0,20	4,37	95,63
4	0,33	0,00	98,64	*	1,03	98,97
5	0,15	0,00	97,92	*	1,93	98,07
6	0,18	0,00	98,02	*	1,80	98,20
7	0,53	0,14	97,99	*	1,34	98,66
8	3,16	0,17	94,98	*	1,69	98,31
9	0,00	0,00	99,12	*	0,88	99,12
10	0,25	0,00	98,55	*	1,20	98,80
11	0,43	0,00	98,35	*	1,22	98,78
Média	0,69	0,23	95,77	0,14	3,17	96,83

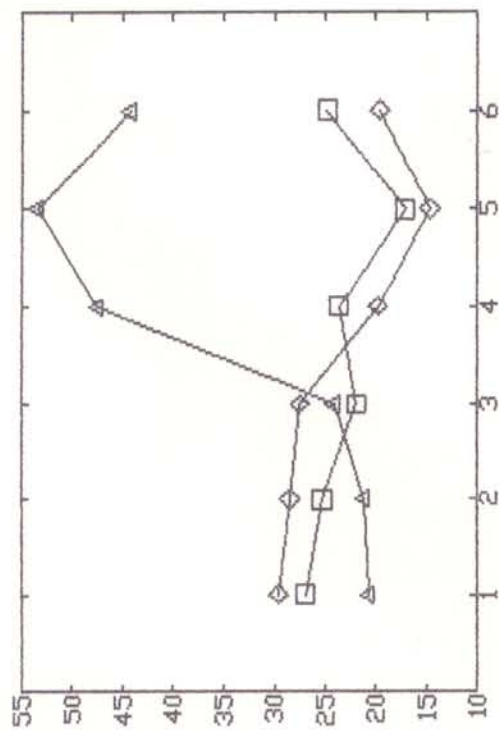
* - não analisado

Foram analisados também os nódulos e o plasma internodular gibbsítico que constituem a crosta parcialmente intemperizada (Figura 4.5). As análises realizadas na seção transversal A-A' mostram que o núcleo dos nódulos são mais ferruginosos (53%), aproximando-se da composição do metapelito lateritizado, havendo decréscimo abrupto e contínuo para a zona externa e o plasma internodular (Figura 4.22a). O SiO2 e o Al2O3 apresentam variações menos expressivas com teores menores no núcleo do nódulo. Os teores de Al2O3, mais elevados que os de SiO2, indicam a predominância de gibbsita sobre a caolinita no plasma internodular, enquanto no núcleo, onde a relação SiO2/Al2O3 é aproximadamente igual a 1,2, há apenas caolinita, além de hematita e goethita.

Na seção transversal B-B' (Figura 4.22b) o núcleo do nódulo tem 88% de Fe2O3, equivalente a do gossan. Na zona externa e no plasma internodular também há decréscimo abrupto e contínuo de Fe2O3, com aumento simultâneo de SiO2 e Al2O3. Os teores de Al2O3

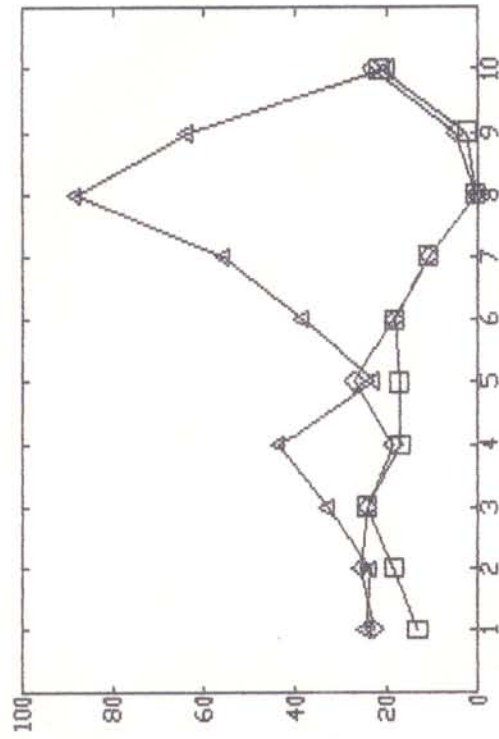
%

A

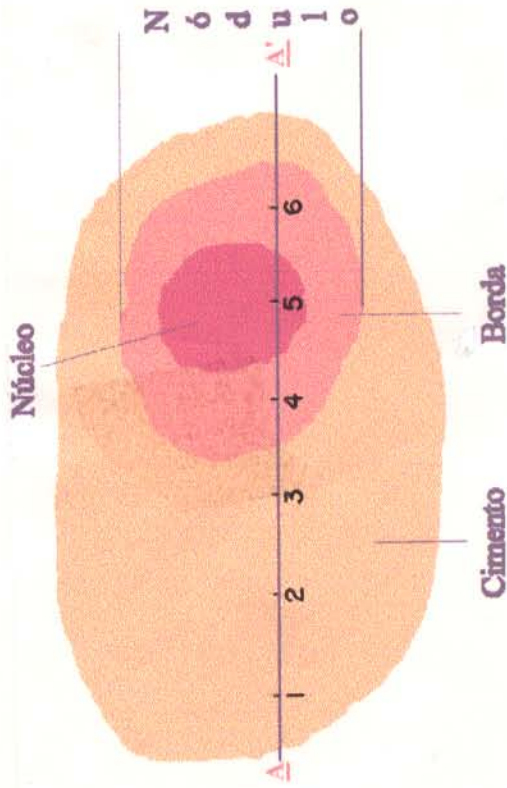


□ SiO₂
 ◇ Al₂O₃
 △ Fe₂O₃

B



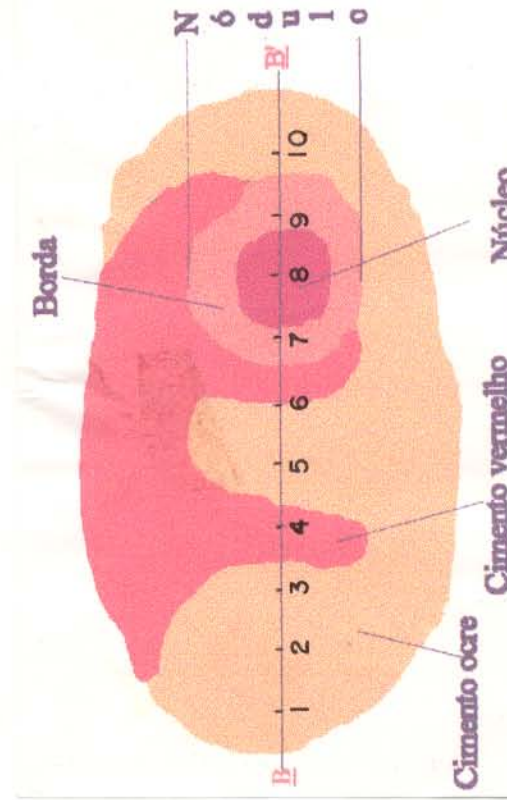
Núcleo



Cimento

Borda

Borda



Cimento ocre

Cimento vermelho

Núcleo

Figura 4.22: Distribuição dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ obtidos por microssanda na crosta parcialmente interperthítica do perfil 2

são equivalentes ou mais elevados que os de SiO_2 , indicando a presença de gibbsita e secundariamente de caolinita. O teor de Fe_2O_3 , um pouco mais elevado no plasma internodular vermelho, representa a sua difusão em direção às zonas periféricas, promovendo o manchamento do material. Observa-se, portanto um processo de desferrificação do nódulo em direção ao plasma internodular e um aumento de SiO_2 e Al_2O_3 de modo similar ao observado entre os horizontes do perfil e comparável a N5.

4.4.2 - Elementos-Traço

Os elementos-traço nos três perfis do Igarapé Bahia (Tabela 4.5), ao contrário dos perfis de N5, concentram-se acima da média crustal. Os teores relativamente mais altos são de Cu, Mo, V, Pb e Au. Os relictos de gossan se caracterizam, em relação aos demais materiais, pelos teores mais altos em Mo, Cu e Y e mais baixos em Cr, B, Ga e Sc, em uma típica assinatura geoquímica de gossans derivados de sulfetos de cobre e ferro. Os relictos de metapelito lateritizado se destacam pelos altos teores de Cu e Au, além de Cr, enquanto a matriz argilosa contém os teores mais elevados em Zr, B, Pb e, em parte Mn. Os elevados teores de Cu e Au nos relictos do metapelito lateritizado são consequência da presença de venulações gossânicas (anteriormente venulações sulfetadas), demonstrando a influência da lateritização, remobilizando esses elementos do gossan para os metapelitos encaixantes.

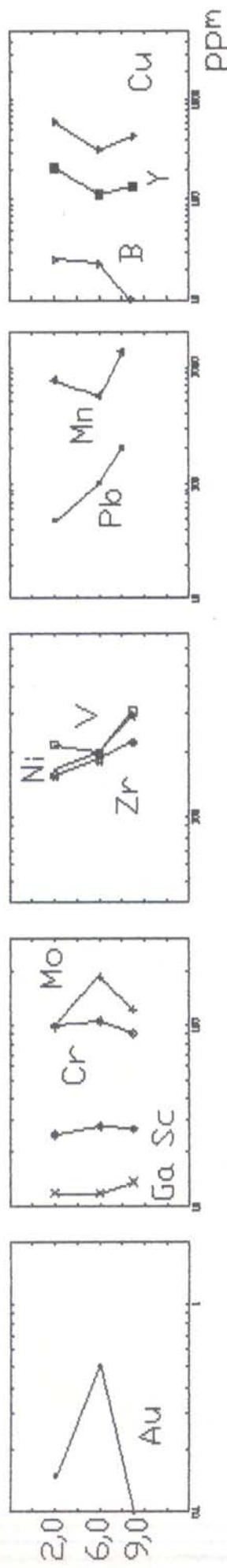
As concentrações dos elementos-traço na matriz argilosa e no solo se equivalem, indicando a filiação geoquímica entre os materiais.

Tabela 4.5: Concentração dos elementos-traço nos perfis do Igarapé Bahia (ppm).

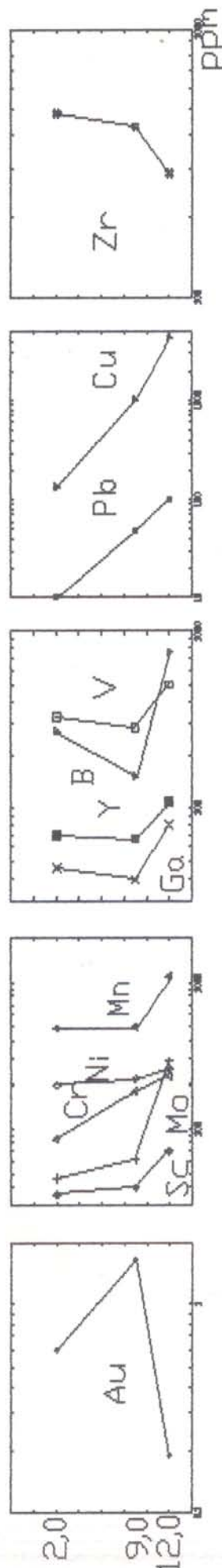
HORIZONTE	V	Cr	Ni	B	Ko	Zr	Ga	Y	Sc	Mn	Cu	Pb	Au
PERFIL 1													
SOLO (0,3m)	370	168	50	210	43	580	52	74	34	560	80	110	0,25
CROSTA INTENPERIZADA (2,0m)													
Matriz argilosa	345	128	52	290	47	660	46	82	39	520	82	182	0,10
Relicto de metapelito lateritizado	325	200	84	270	46	480	46	70	36	480	136	110	0,60
Relicto de gossan	215	100	158	25	98	154	12	210	25	780	600	48	0,15
CROSTA INTENPERIZADA (6,0M)													
Matriz argilosa	370	200	59	280	49	490	68	80	46	540	116	290	0,15
Relicto de gossan	198	106	192	23	188	182	12	112	28	560	320	102	0,50
CROSTA INTENPERIZADA (9,0M)													
Matriz argilosa	385	150	96	340	56	570	55	92	49	690	130	370	0,20
Relicto de metapelito lateritizado	285	220	180	152	62	430	40	67	40	490	1000	48	1,65
Relicto de gossan	305	90	290	110	122	220	14	136	27	1360	440	200	0,10
CROSTA INTENPERIZADA (12,0M)													
Matriz argilosa	550	240	402	750	110	480	69	112	58	1160	1080	500	0,65
Relicto de metapelito lateritizado	550	260	230	760	290	290	80	108	70	1100	4300	102	1,90
PERFIL 2													
SOLO													
Matriz argilosa	420	440	52	335	34	500	50	32	34	377	177	72	0,55
Relicto de metapelito lateritizado	355	1850	105	120	48	165	36	33	30	735	347	111	1,70
CROSTA PARCIALMENTE INTENPERIZADA	370	460	103	110	100	96	35	13	27	919	624	212	1,30
PERFIL 3													
SOLO (0,5m)	310	310	103	280	25	360	44	17	29	281	85	65	0,10
SOLO (0,8m)	450	480	51	245	37	560	42	27	32	290	95	67	0,15
CROSTA PARCIALMENTE INTENPERIZADA(1,0m)	560	480	57	225	66	220	38	25	40	426	168	92	0,58
MÉDIA CRUSTAL	135	100	75	10	1,5	165	15	33	22	900	55	33	0,004

A distribuição dos elementos-traço, da base para o topo em cada tipo de relicto e na matriz argilosa do perfil 1 (Figura 4.23), mostra que nos relictos de gossan aumentam os teores de B, Y e Cu, enquanto o V, Zr, Ni, Pb e Mn diminuem e os demais elementos não variam. Isto indica que os relictos de gossan experimentaram pequena alteração ao longo do perfil, como verificado nos estudos micromorfológicos, mineralógicos e

Relictos de gossan



Relictos de metapelite lateritizada



Solo e matriz argilosa

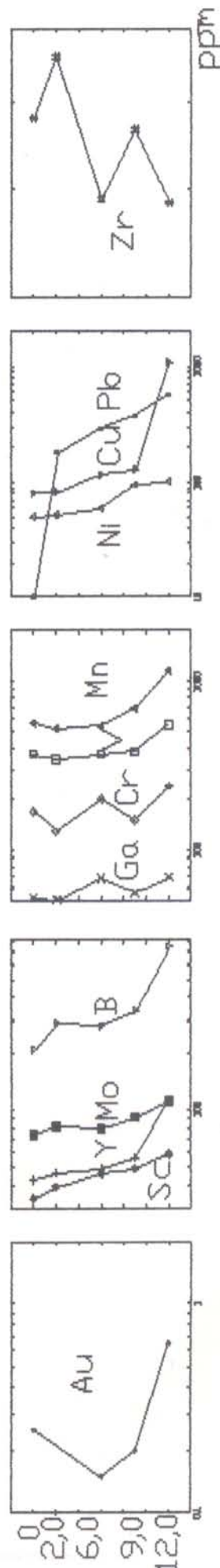


Figura 4.23: Distribuição dos elementos-traço nos materiais ao longo do perfil 1 do Igarapé Bahia

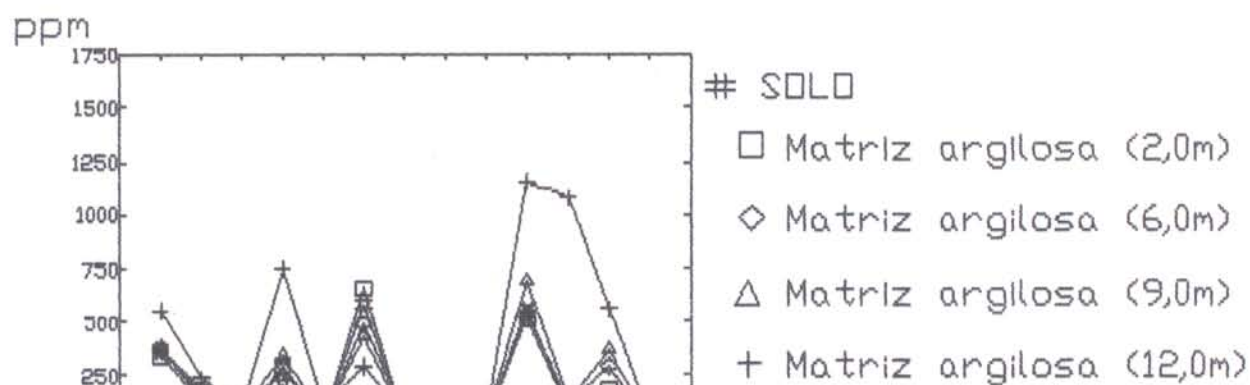
químicos. Já nos relictos de metapelito lateritizado e na matriz argilosa somente o Zr experimentou aumento na mesma direção (Figura 4.23).

A figura 4.24 mostra as diferenças entre os relictos e a semelhança entre o metapelito lateritizado e a matriz argilosa ao longo do perfil. Essa semelhança indica que o metapelito lateritizado é mais susceptível ao intemperismo que o gossan, mas ainda preservando seu padrão de distribuição dos elementos-traço. Indica, também, que a matriz argilosa é derivada principalmente do metapelito lateritizado e secundariamente do gossan.

Nos perfis 2 e 3 os teores de Zr, B, Y, Sc e Ga aumentam da crosta parcialmente intemperizada em direção ao solo (Figura 4.25), enquanto os demais decrescem em um padrão, em parte, similar à matriz argilosa e ao metapelito lateritizado e comparável ao que ocorre em N5.

A figura 4.26 mostra a semelhança entre o padrão de distribuição dos elementos-traço nos diferentes horizontes dos perfis 2 e 3, que é comparável ao dos nódulos e do plasma internodular (Figura 4.27) que constituem os relictos dessa crosta. A divergência está apenas no relictos de metapelito lateritizado, que não foi encontrado no perfil 3.

Pelo exposto observa-se que o padrão de distribuição dos elementos-traço nos perfis do Igarapé Bahia varia em função do tipo de material, mas, de modo geral, o Zr e em parte o B aumentam de teor da crosta parcialmente intemperizada e dos relictos para o solo dos perfis e, portanto, correlacionando-se ao TiO_2 . Desse modo tem-se nos três perfis a diluição dos teores dos elementos-traço (V, Cr, Ni, Mo, Mn, Cu, Pb e Au)



$Au \times 100$

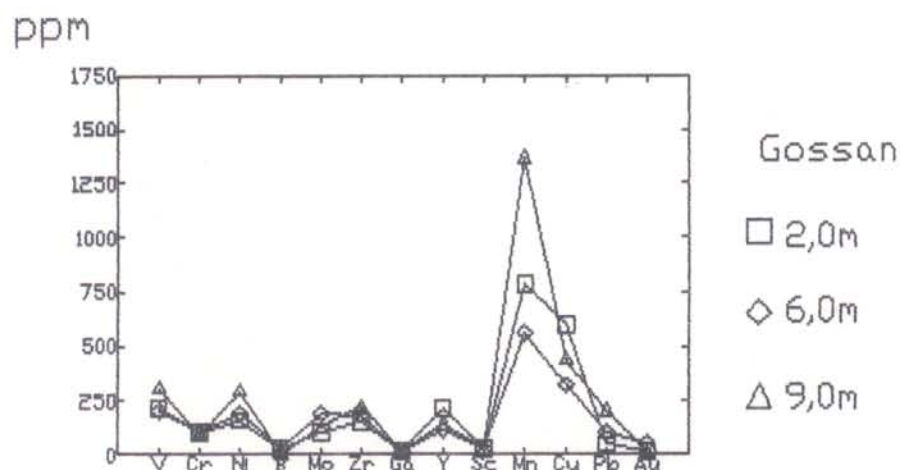
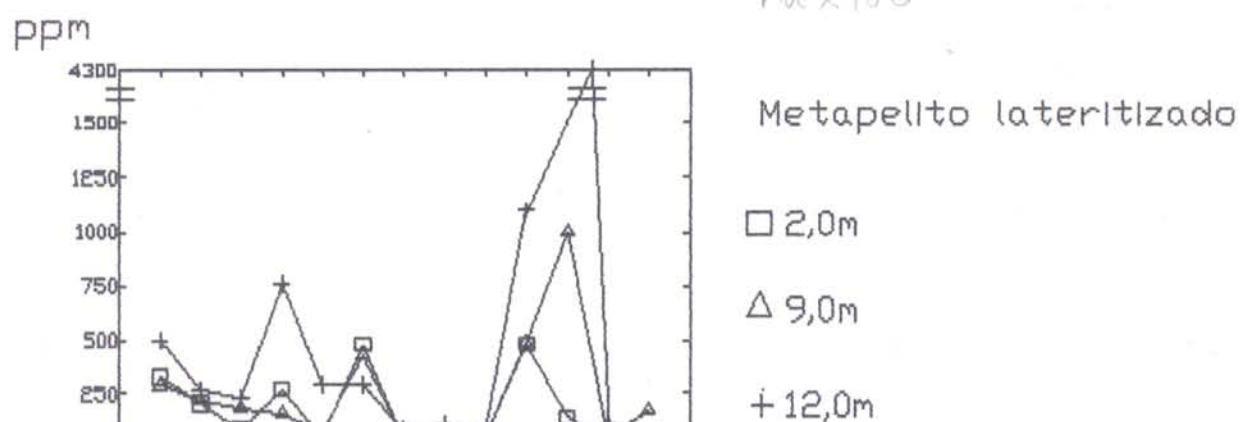
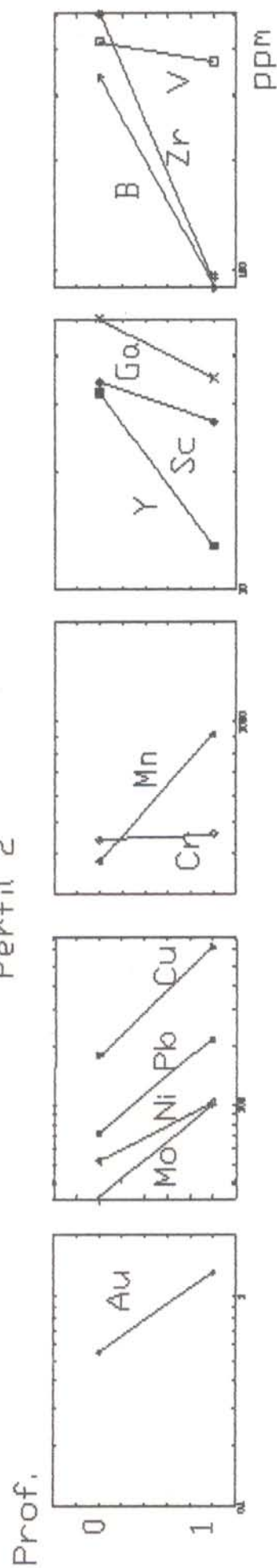


Figura 4,24: Distribuição dos elementos-traço por tipo de material no perfil 1 do Igarapé Bahia

Perfil 2



Perfil 3

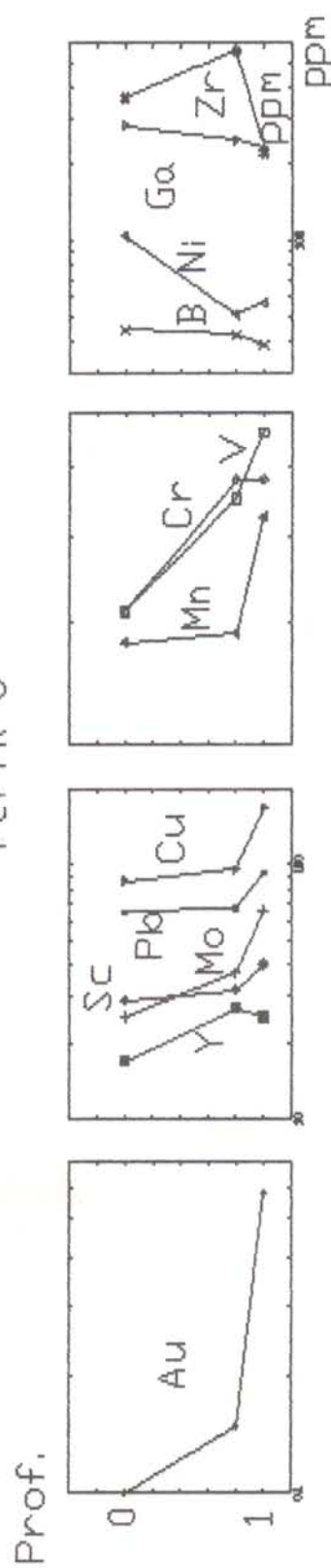
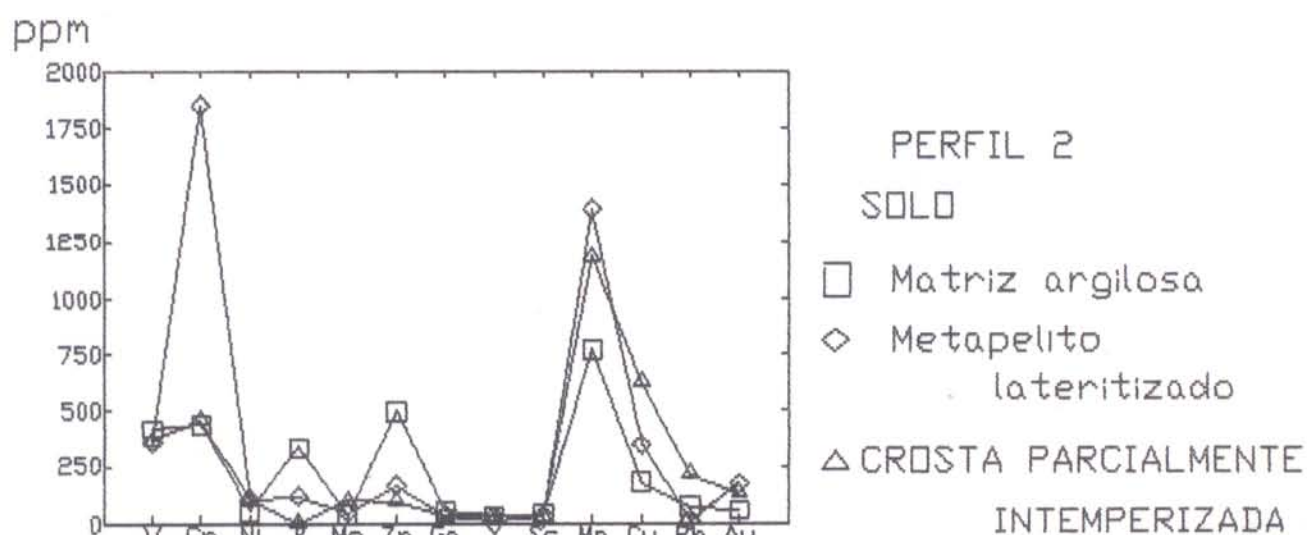


Figura 4.25: Distribuição dos elementos-traço nos horizontes dos perfis 2 e 3 do Igarapé Bahia



Au × 100

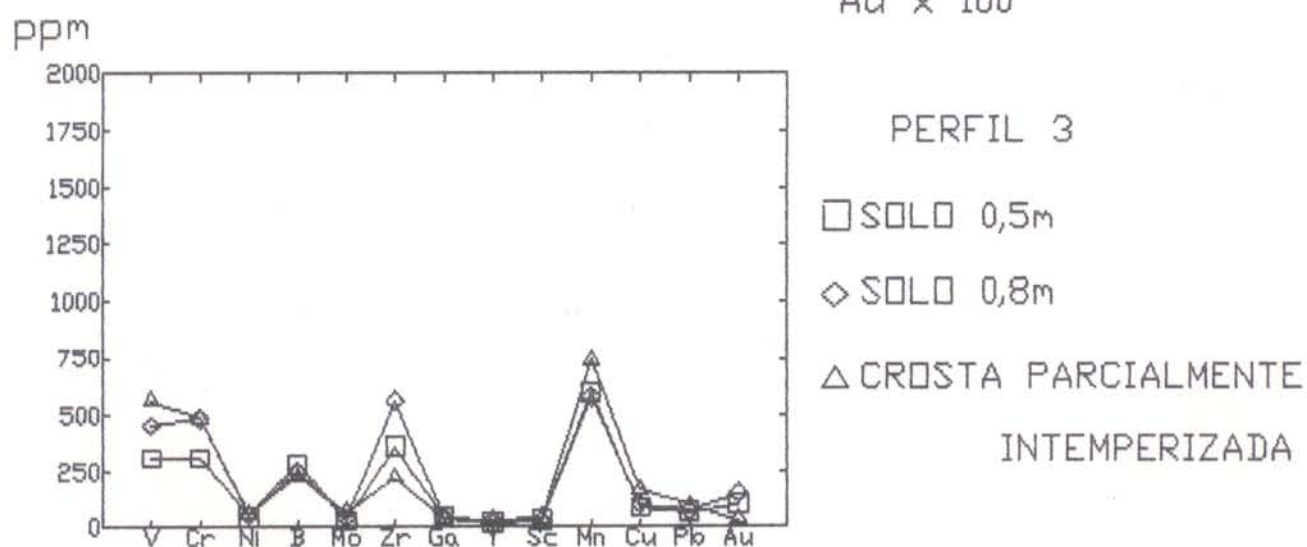


Figura 4.26: Distribuição dos elementos-traço nos perfis 2 e 3 do Igarapé Bahia

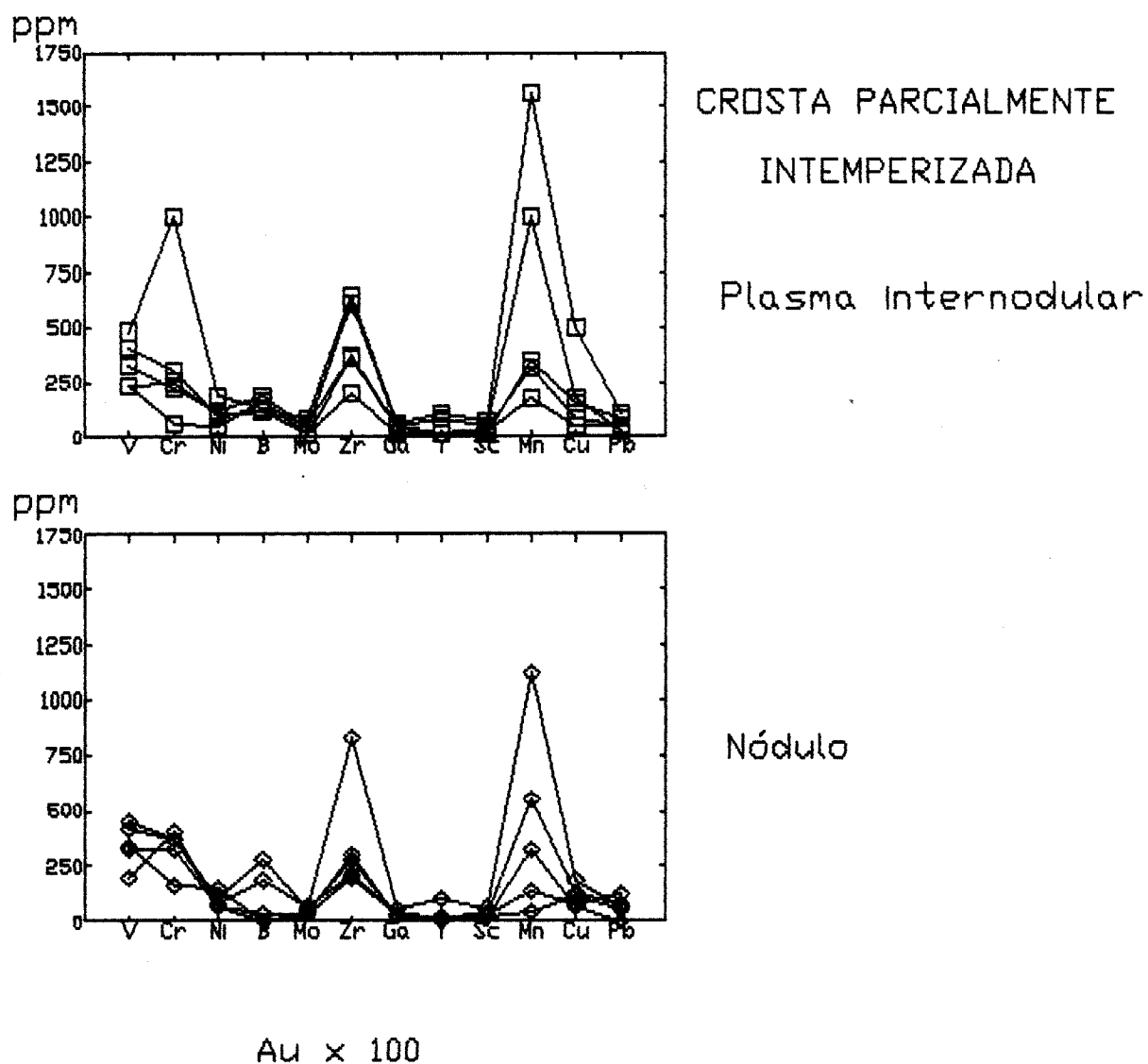


Figura 4.27: Distribuição dos elementos-traço no plasma internodular e nos nódulos dos relictos da crosta parcialmente intemperizada

associados ao ferro (Figura 4.16 e 4.18) na estrutura da hematita, .pn100único mineral com teores decrescentes ao longo dos perfis (Figura 4.12 e 4.13) e concentração residual do Zr e secundariamente do B como mostram os diagramas da figura 4.28. Pelo menos parte do teor de Zr deve estar relacionado ao zircão, mineral acessório resistato mais frequente, e o de B à turmalina (dravita) identificada por COSTA (1991b). A distribuição do Zr nos perfis e a presença de V, Cr, Ni, Mo, Mn, Cu, Pb e Au em teores menores no solo que na crosta assemelha-se à distribuição desses elementos no perfil de N5, indicando que no Igarapé Bahia a transformação da crosta em solo se dá em um processo similar a N5.

4.4.2.1 - Elementos Terras Raras (ETR)

As concentrações dos ETR (Tabela 4.6) são mais elevadas no perfil 1 do que no perfil 3, principalmente os ETRL, sendo que no perfil 1 está acima e no perfil 3 equivalem à média crustal.

No perfil 1 observa-se um decréscimo de teor a partir dos relictos, da base do perfil para a matriz argilosa do topo e o solo, especialmente do La ao Gd. Os demais mantiveram-se praticamente constantes ou aumentaram, em um padrão equivalente ao observado em N5.

No perfil 3, onde se tem apenas amostra totais, o padrão diverge um pouco, pois apenas o La e Ce diminuem de teor e os demais aumentam da base para o topo (Figura 4.29), correlacioando-se ao TiO₂ (Figura 4.18).

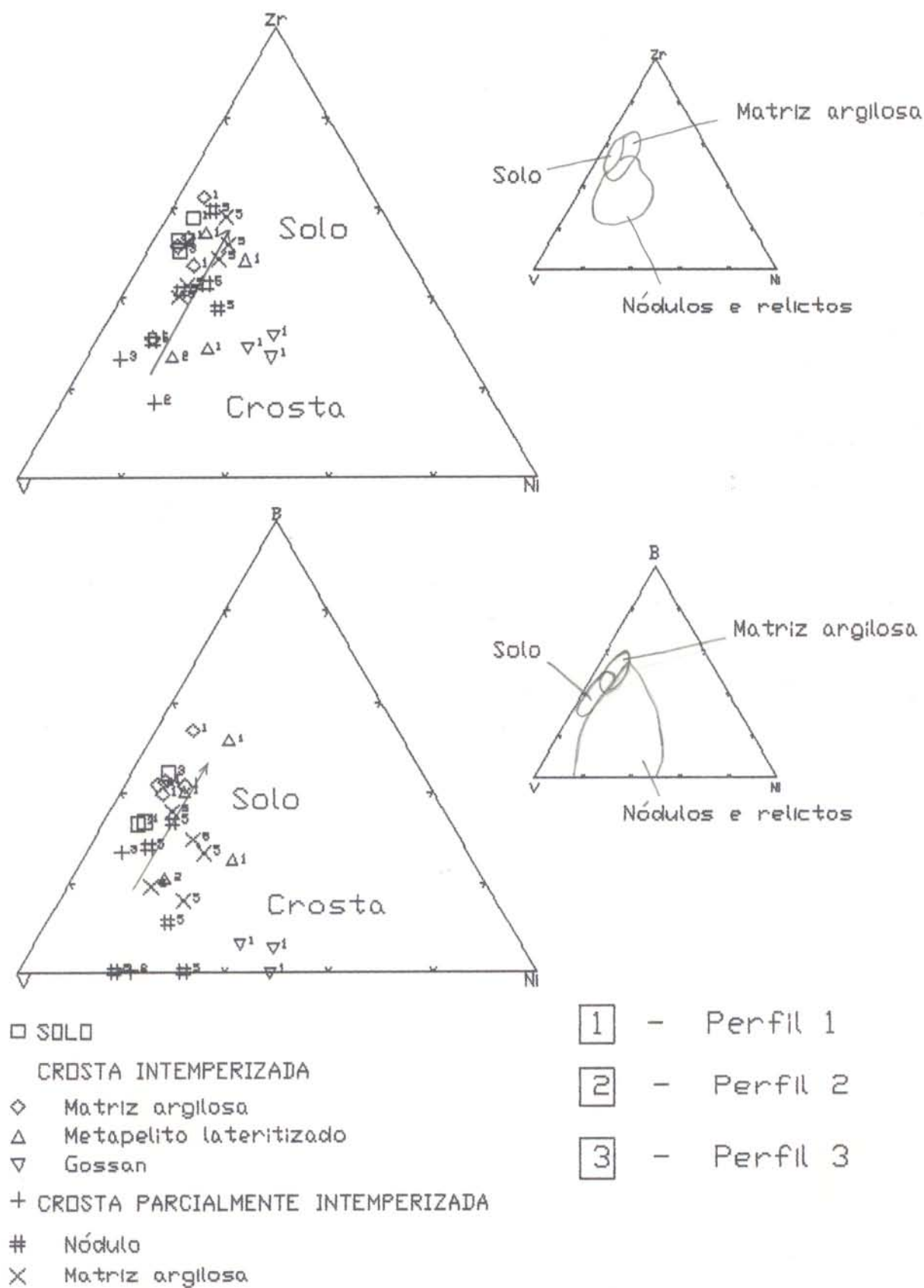


Figura 4.28: Diagramas V-Ni-Zr e V-Ni-B do Igarapé Bahia

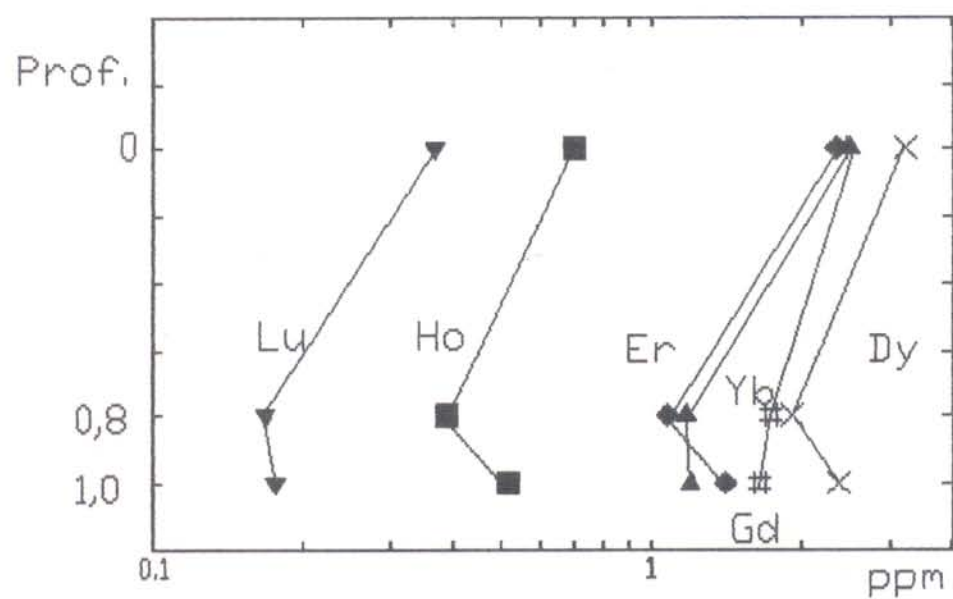
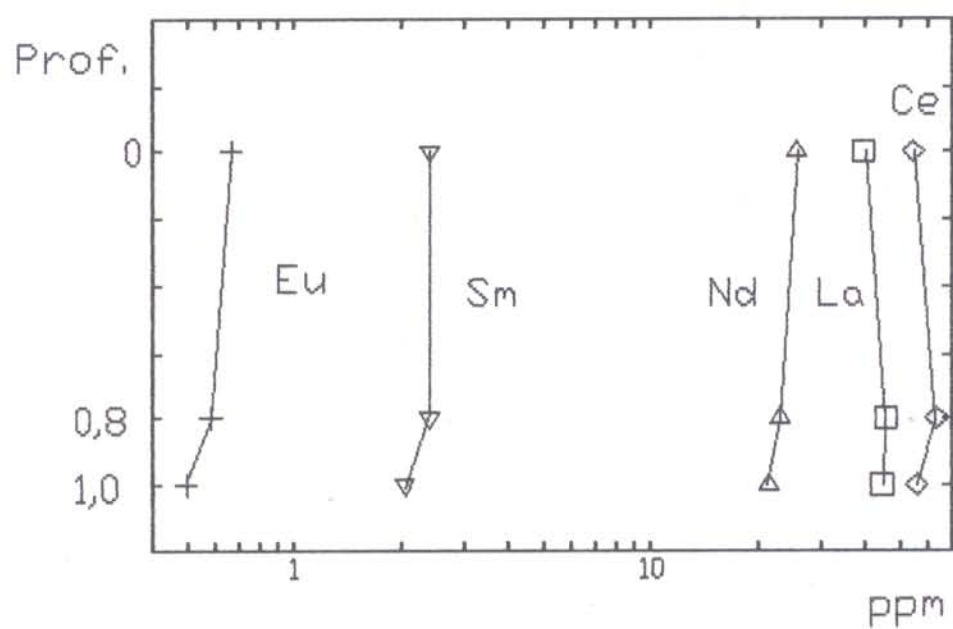


Figura 4.29: Distribuição dos ETR no perfil 3 do Igarapé Bahia

Tabela 4.6: Concentração dos elementos terras raras nos perfis 1 e 3 do Igarapé Bahia (ppm)

HORIZONTE	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Lan/Smn
PERFIL 1												
SOLO (0,3m)	68,56	57,39	33,99	4,39	0,90	2,84	3,24	0,74	2,46	2,57	0,38	9,83
CROSTA INTemperizada (9,0m)												
Matriz argilosa	91,46	96,87	26,56	3,70	0,85	2,98	3,52	0,77	2,42	2,38	0,33	15,55
Relicto de metapelito lateritizado	304,40	235,10	67,55	7,04	1,38	3,76	2,83	0,62	1,93	2,04	0,33	27,21
Relicto de gossan	449,30	300,20	111,80	13,07	2,34	6,50	4,89	1,07	3,35	3,34	0,49	21,64
PERFIL 3												
SOLO(0,5m)	39,71	54,66	25,70	2,40	0,67	2,40	3,23	0,70	2,35	2,48	0,37	8,80
SOLO(0,8m)	45,75	63,60	23,20	2,39	0,59	1,74	1,92	0,39	1,08	1,17	0,17	12,05
CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada(1,0m)	44,66	56,03	21,50	2,04	0,50	1,65	2,37	0,52	1,41	1,19	0,18	13,81
NÉDIA CRUSTAL	30,00	60,00	28,00	6,00	1,20	5,40	3,00	1,20	2,80	3,00	0,50	

As curvas normalizadas aos condritos (Figura 4.30) apresentam forte depleção entre os ETRL, como mostra a relação Lan/Smn da tabela 4.6, similar a observada em N5. O paralelismo dessas curvas pode ser interpretado como mais um argumento à favor da evolução dos perfis a partir do intemperismo dos relictos.

A normalização dos ETR em relação à crosta parcialmente intemperizada do perfil 3 (Figura 4.31) ressalta também a tendência de depleção dos ETRL e aumento dos ETRP, indicando lixiviação dos ETRL no início do intemperismo e seu enriquecimento no solo, assemelhando-se ao perfil de N5.

A distribuição dos ETR reforça a forte afinidade geoquímica entre as crostas, seus componentes (relictos e a matriz argilosa) e o solo, estando o aumento de teores relacionado provavelmente a presença de zircão.

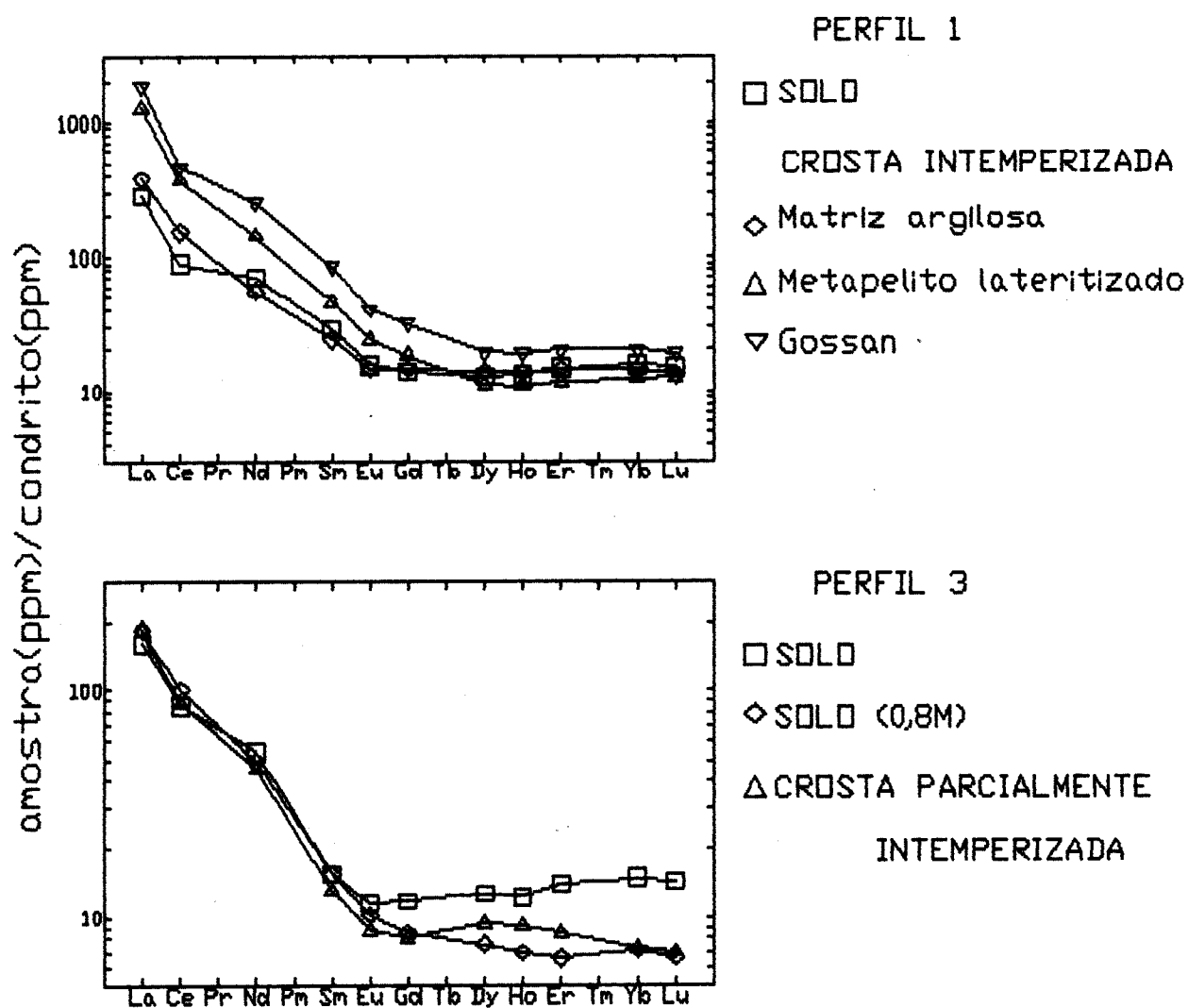


Figura 4.30: Normalização dos ETR em relação aos condritos nos perfis 1 e 3 do Igarapé Bahia

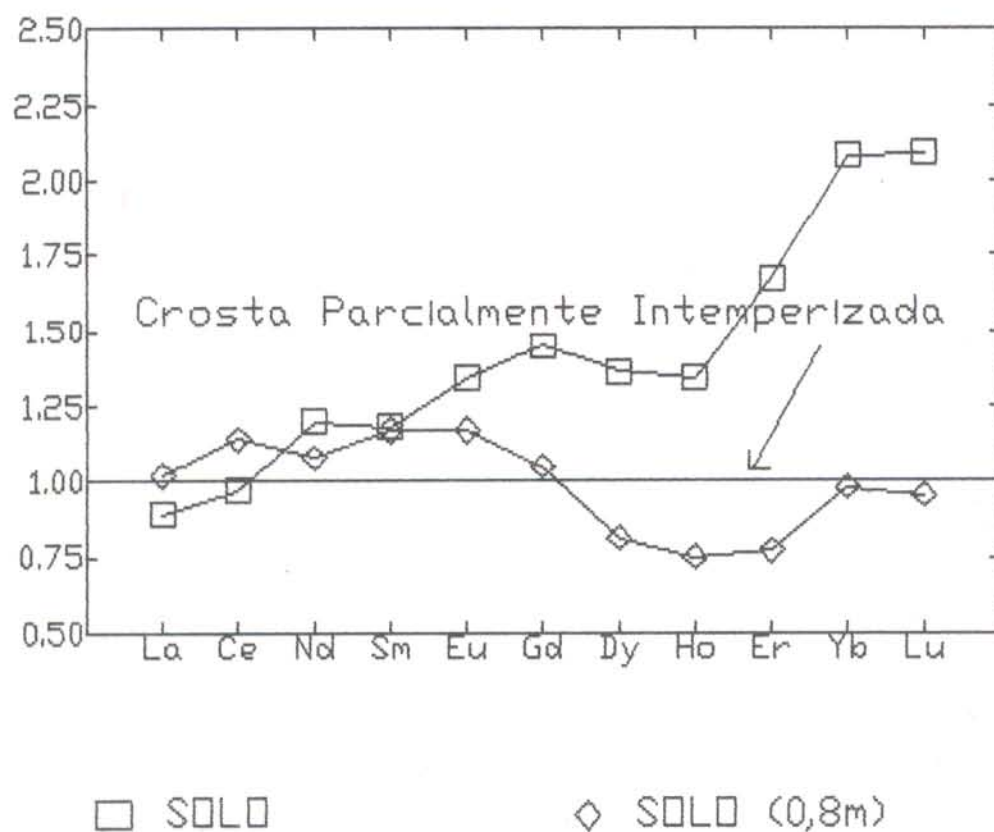


Figura 4.31: Normalização dos ETR em relação a crosta parcialmente intemperizada do perfil 3 do Igarapé Bahia

4.5 - BALANÇO DE MASSA E CONCLUSÕES

O balanço de massa dos três perfis do Igarapé Bahia (Tabela 4.7) usa o titânio como elemento imóvel, o metapelito lateritizado (12,0m) como rocha-mãe do perfil 1 e a crosta parcialmente intemperizada para os perfis 2 e 3. O metapelito lateritizado foi utilizado como rocha-mãe do perfil 1 por ser quimicamente mais semelhante à matriz argilosa e, por ser mais susceptível ao intemperismo que os relictos de gossan.

Os dados obtidos mostram que todos os elementos são lixiviados, exceto o Si e parte do Fe^{2+} , Zr, Pb e Ni, imobilizados e enriquecidos na base do perfil 1 (Tabela 4.7), o que é provavelmente causado pela lixiviação menos intensa do Fetotal nesse horizonte. A lixiviação do Fetotal e Al nos três perfis representa, respectivamente, a decomposição da hematita e caolinita e, conseqüentemente, a diminuição dos relictos, levando à formação da matriz argilosa e do solo. O Si apresenta padrão irregular enriquecendo-se no perfil 1 e sendo lixiviado no 2 e 3, representando, portanto, a heterogeneidade das rochas-mães consideradas e a distribuição errática do quartzo.

Apesar da composição mineralógica do perfil mostrar que o teor de caolinita diminui para o solo, os dados micromorfológicos indicam que está havendo neoformação de caolinita e não de gibbsita e que, portanto, assim como em N5, a gibbsita está sendo substituída por caolinita neoformada. Essa caolinita está, portanto, em equilíbrio com o processo de intemperismo da crosta ferro-aluminosa e a gibbsita é residual no solo.

Tabela 4.7: Balanço de massa dos perfis do Igarapé Bahia

HORIZONTE	LIXIVIADOS		INOBLIZADOS		ENRIQUECIMENTO	
	>90Z	90Z A 40Z	<40Z	10Z A 10Z	<40Z	40Z A 90Z
PERFIL 1						
SOLO(0,3M)	Ni, B, Mo Cu, Au	Al, Fetotal, PF V, Cr, Ga, Y, Mn	Zr, Sc	Si		Fe2+
CROSTA INTERPERIZADA(2,0M) Matriz argilosa	Ni, Mo, Cu Au	Al, Fetotal, PF V, Cr, B, Ga, Y Sc, Mn	Fe2+ Zr, Pb		Si	
CROSTA INTERPERIZADA(6,0M) Matriz argilosa	Cu, Au	Al, Fetotal, PF Cr, Ni, B, Mo, Ga V, Y, Sc, Mn	Zr	Fe2+	Pb	Si
CROSTA INTERPERIZADA(9,0M) Matriz argilosa	Mo, Cu, Au	Al, Fetotal, PF, Fe2+, V, Cr, Ni, B, Ga, Y, Sc, Mn	Zr		Si, Pb	
CROSTA INTERPERIZADA(12,0M) Matriz argilosa		Al Mo, Sc, Cu, Au	Fetotal, Fe2+, PF, V, Cr, B, Ga, Y Mn		Ni, Zr	Si Pb
PERFIL 2						
SOLO Matriz argilosa	Fe2+ Mo, Pb	Si, Fetotal, PF V, Cr, Ni, Ga, Y, Sc, Mn, Cu, Au	Al	Zr		
PERFIL 3						
SOLO	Au	Si, Al, Fetotal, Fe2+, V, Cr, Ni, B, Mo, Zr, Ga, Y, Sc, Mn, Cu, Pb MV, ETR-(Yb, Lu)	PF Yb, Lu			
SOLO	Au	Si, Fetotal, Fe2+ V, Cr, Ni, B, Mo, Ga, Y, Sc, Mn, Cu, Pb, MV, ETR	Al, PF Zr			

MV= Modificação de volume

A modificação de volume (MV), obtida somente para o perfil

3, mostra o colapso da crosta parcialmente intemperizada para o solo em consequência da lixiviação do Fe, Al e Si, que levaram à total destruição da crosta de modo semelhante ao observado em N5.

Observa-se desse modo que a transformação da crosta do Igarapé Bahia se dá principalmente pela lixiviação de Fe, Al, Si, V, Cr, B, Mo, Ga, Y, Sc, Mn, Cu, Au e ETR e, secundariamente, de Zr, Pb e Ni, gerando relictos e uma matriz argilosa que evolui para o solo em um processo similar aos perfis intempéricos e de desagregação e pedogênese de crostas lateríticas. Isto sugere que o intemperismo é o motor dessa transformação, na qual o solo é o seu produto final e que a variação no comportamento dos elementos nos três perfis deve-se às diferenças composicionais das rochas-mães.

5 - PERFIL INTEMPÉRICO SOBRE CROSTA LATERÍTICA ALUMINOSA MATURA - CAMOAI

5.1 - ASPECTOS GEOLÓGICOS

A mina de bauxita de Camoai faz parte da região bauxítica de Paragominas-Açailândia, localizada no nordeste do Pará. Desenvolve-se a partir de rochas sedimentares da Formação Itapecuru/Ipixuna (TRUCKENBRODT et al. 1982), sendo correlacionável às bauxitas de Almeirim e Nhamundá-Trombetas.

Para o estudo da relação crosta-solo foi selecionado um perfil (Figura 5.1) localizado na frente de lavra da mina homônima. A espessura do perfil é de 4,5m, sendo constituído, da sua base para o topo, pela crosta aluminosa, crosta aluminosa parcialmente desagregada, crosta aluminosa desagregada e solo.

A crosta aluminosa é compacta, de estrutura colunar, localmente porosa à vacuolar, cor rosada a levemente avermelhada com porções subordinadas de cor creme (Figura 5.2) constituída predominantemente por gibbsita e caolinita. A porção rosada passará a ser denominada de fácies rosado e a creme de fácies creme. Localmente, preenchendo os poros e fissuras, ocorre um material argiloso rosado a amarelado, de textura friável, formado à base de caolinita e gibbsita.

Sobreposto, em contato gradacional, tem-se um horizonte similar ao anterior porém apresentando fragmentação, formando blocos com até 20 cm de diâmetro, constituindo a crosta parcialmente desagregada. Envolvendo os blocos há um material argiloso amarelado, similar ao que preenche os poros e fissuras da crosta aluminosa, também formado por caolinita e gibbsita.

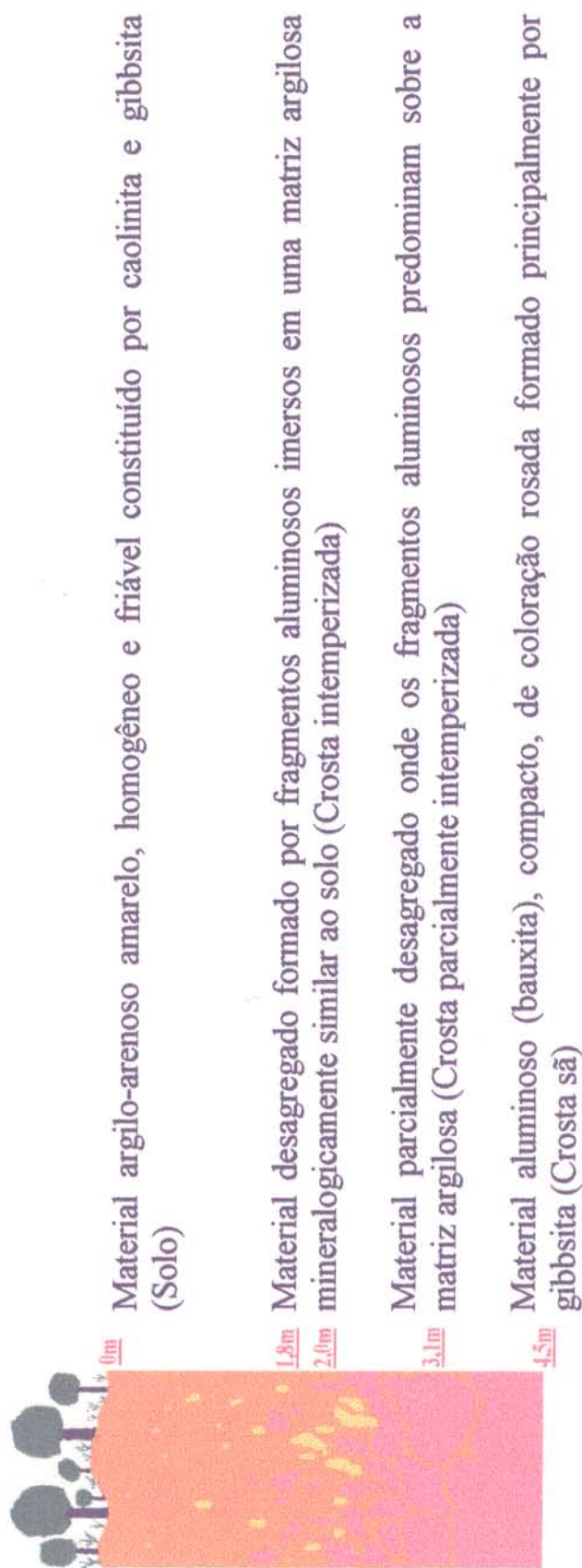


Figura 5.1: Perfil de alteração da crosta aluminosa de Camoá

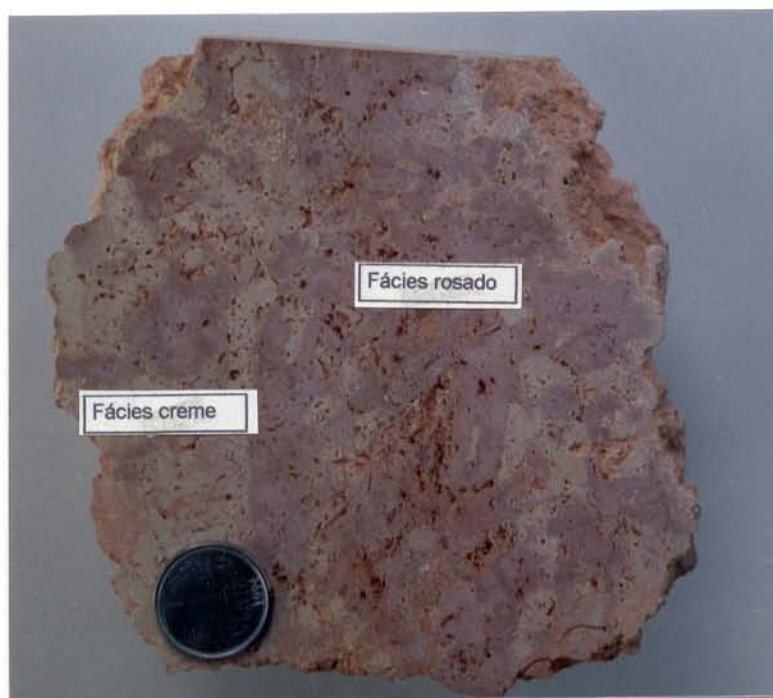


Figura 5.2: Aspecto macroscópico da crosta sã, porosa onde se identificam o fácies rosado e o creme além do material argiloso rosado a ocre que preenche os poros e fissuras.



Figura 5.3: Fragmentos da crosta intemperizada em forma de pipocas (nódulos).



Figura 5.4: Fragmentos da crosta intemperizada onde se identificam os nódulos ferruginosos e os nódulos do fácies rosado cimentados pelo fácies creme além da matriz argilosa ocre que envolve os relictos (material agregado com resina).

Em direção ao topo do perfil o material está totalmente desagregado, sendo que os fragmentos apresentam desenvolvimento de pronunciadas feições concrecionárias (Figura 5.3). As concreções, denominadas de bauxita pseudo-pisolítica concrecionária por KOTSCHOUBEY (1988), com até 5cm de diâmetro, apresentam a forma de "pipocas" (BARDOSSY & ALEVA, 1990). São constituídas por nódulos do fácies rosado com até 1 cm de diâmetro e nódulos ferruginosos, ambos cimentados pelo fácies creme (Figura 5.4). Esse conjunto está imerso em um material argiloso amarelado similar ao do horizonte anterior, constituindo a crosta desagregada. Enquanto no horizonte anterior o material avermelhado ocorre como manchas, neste horizonte elas estão individualizadas formando nódulos ferruginosos.

No topo do perfil predomina o material argiloso, amarelado, de aspecto terroso e os relictos, geralmente do fácies creme, são raros e milimétricos, formando o solo.

As características descritas acima mostram que o perfil é marcado pela sua desagregação e redução no tamanho dos fragmentos, acompanhado do aumento na proporção da matriz argilosa em direção ao topo do perfil até formar o solo, onde os fragmentos da crosta aluminosa são raros. O conjunto apresenta uma estruturação em horizontes similar aos perfis de N5 e Igarapé Bahia: crosta sã, crosta parcialmente intemperizada, crosta intemperizada e solo. Os fragmentos, assim como nos perfis de N5 e Igarapé Bahia passam a serem denominados de relictos.

5.2 - CARACTERÍSTICAS MICROMORFOLÓGICAS

5.2.1 - Crosta Sã

É formada por gibbsita criptocristalina de aspecto leitoso, com poros e fissuras preenchidos por gibbsita cristalina (Figura 5.5), maclada, formando franjas orientadas perpendicularmente aos bordos dessas cavidades sendo, provavelmente, resultante da remobilização da gibbsita criptocristalina (TRUCKENBRODT & KOTSCHOUBEY, 1981). O tom rosado observado macroscopicamente se deve unicamente à pigmentação da gibbsita criptocristalina por óxido de ferro, na forma de pequenas partículas sub-esféricas, avermelhadas não havendo contato nítido entre o fácies rosado e o creme.

5.2.2 - Crosta Parcialmente Intemperizada

Os relictos deste horizonte são restos do horizonte anterior, conservando ainda as mesmas características micromorfológicas, predominando gibbsita criptocristalina e subordinadamente gibbsita cristalina. A matriz argilosa é criptocristalina, homogênea, de coloração leitosa.

5.2.3 - Crosta Intemperizada

Os nódulos do fácies rosado são formados por gibbsita com textura cripto a microcristalina similar à crosta sã, enquanto os nódulos ferruginosos são formados por agregados coalescentes de partículas esféricas avermelhadas, semelhantes as que pigmentam a gibbsita da crosta sã.

O plasma internodular é semelhante ao fácies creme da crosta

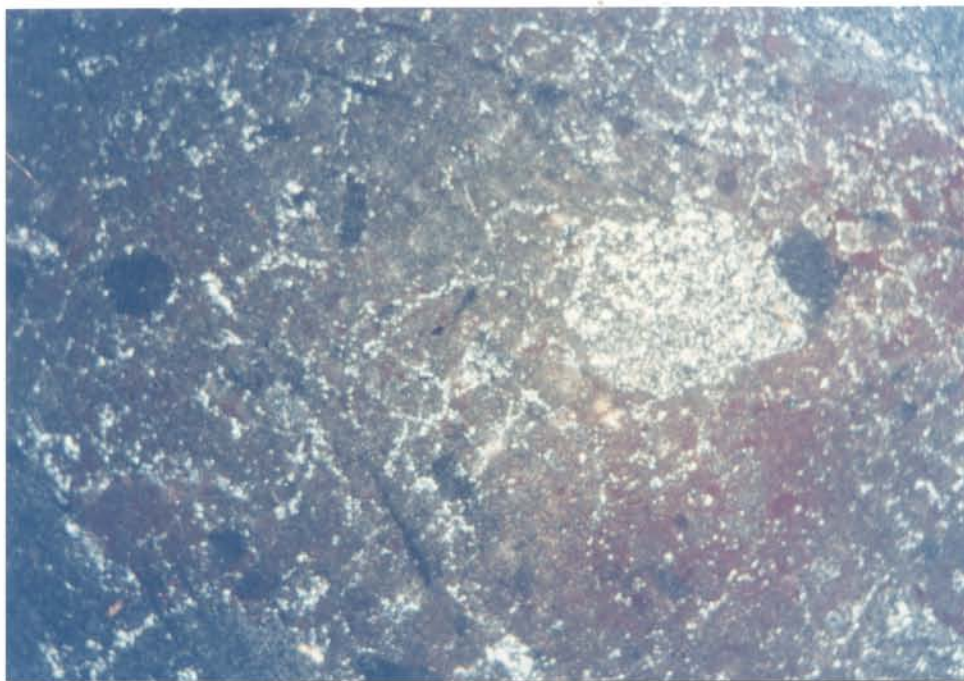


Figura 5.5: Plasma gibbsítico, microcristalino, leitoso da crosta são pigmentado por óxido de ferro. Os poros e fissuras estão preenchidos por gibbsita cristalina $1\text{cm}=0,7\text{mm}$.

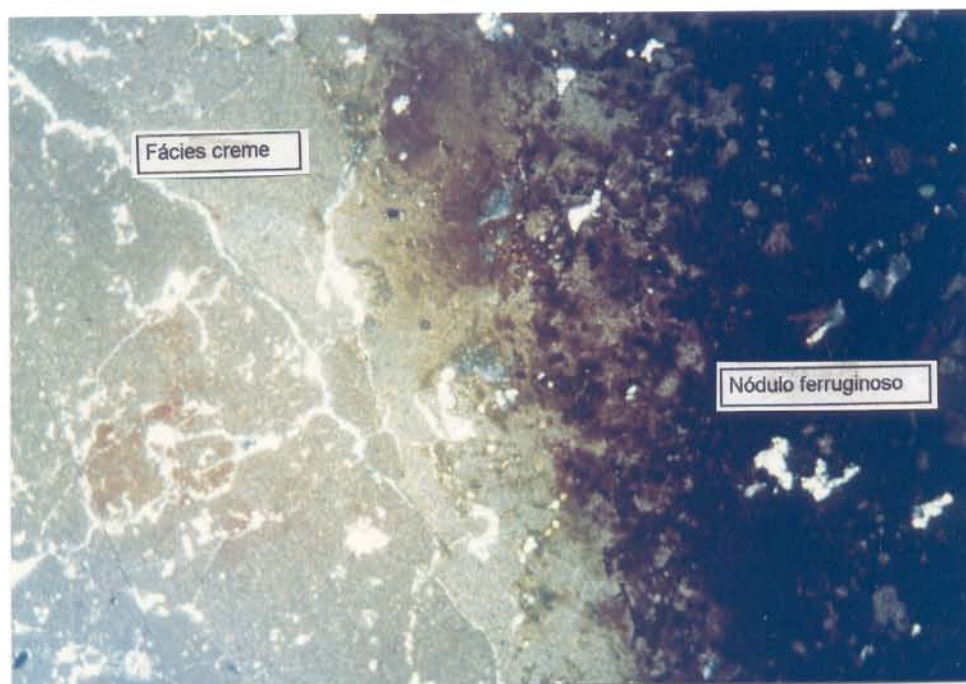


Figura 5.6: Contato difuso entre o nódulo ferruginoso e o fácies creme na crosta intemperizada. $1\text{cm}=0,7\text{mm}$.

sã, apresentando textura cripto à microcristalina e estando em contato difuso com os nódulos do fácies rosado e os ferruginosos (Figura 5.6). O contato difuso do plasma internodular com os nódulos, principalmente os ferruginosos, indica que os nódulos fazem parte da própria crosta aluminosa e que atualmente estão sofrendo um processo de desferrificação. Para BLACK et al. (1984) e BARDOSSY & ALEVA (1990) o fácies creme, em materiais similares a de Camoáí, é resultante de desferrificação e parcial enriquecimento em SiO₂ da bauxita (fácies rosado) ao longo da porosidade.

A matriz argilosa é similar a do horizonte sotoposto.

5.2.4- Solo

é formado por um plasma amarelado, criptocristalino, microagregado, constituído por caolinita, gibbsita, goethita e hematita, onde se identificam raros relictos do fácies creme da crosta aluminosa, com menos de 3mm de diâmetro.

5.2.5 - Sequência de Alteração da Crosta Sã até os Solos

A estruturação em horizontes do perfil de Camoáí e a individualização de relictos da crosta sã nos horizontes superiores (Figura 5.7) se dá em um processo similar ao observado nos perfis de N5 e Igarapé Bahia.

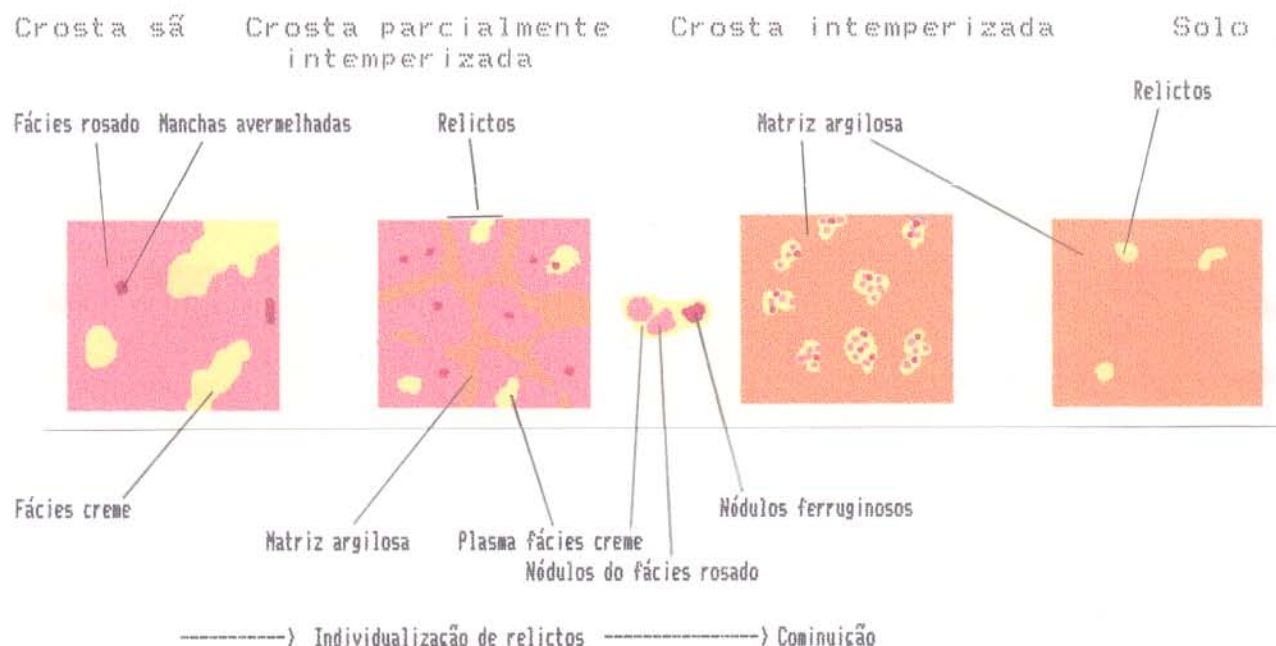


Figura 5.7: Sequência esquemática do intemperismo da crosta em direção ao solo em Camoá, com base na estruturação do perfil e nos aspectos micromorfológicos.

5.3 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

O perfil de Camoá é formado principalmente por caolinita e gibbsita, que representam aproximadamente 90% da sua composição mineralógica. Quartzo, hematita, goethita e anatásio representam os 10% restantes (Tabela 5.1). Essa composição é bastante diferente da observada nos perfis de N5 e Igarapé Bahia.

Tabela 5.1: Composição mineralógica do perfil de Camoá (% em peso).

HORIZONTES	Quartzo	Caolinita	Gibbsita	Hematita+goethita	Anatásio
SOLO	10	73	12	3	1
SOLO(1,8m)	9	72	14	3	2
CROSTA INTENPERIZADA(2,0m)					
Matriz argilosa		80	12	4	3
Relicto de crosta		13	78	6	2
CROSTA PARCIALMENTE INTENPERIZADA(3,1m)					
Matriz argilosa		85	10	3	1
Relicto de crosta	1	32	64	2	1
CROSTA Sã(4,5m)	5	13	79	1	1

(0,3m) profundidade em relação ao topo do perfil

A crosta sã e seus relictos nos horizontes superiores são formados predominantemente por gibbsita (64% a 79%) e caolinita (13% a 32%) e, secundariamente, por quartzo, hematita+goethita e anatásio (Figura 5.8). A maior discrepância na composição mineralógica do relictos da crosta parcialmente intemperizada deve-se ao seu maior fissuramento e porosidade em relação a crosta sã e ao relictos da crosta intemperizada. As fissuras preenchidas por material argiloso aumentam o teor de caolinita e diminuem o de gibbsita.

O solo e a matriz argilosa dos horizontes sotopostos têm composição química similar entre si. A caolinita varia de 71% a 85% e a gibbsita, subordinada, com teores em torno de 11%. Os teores de hematita+goethita e anatásio são inferiores a 6% e o quartzo ocorre somente no solo (Figura 5.8).

Pelo exposto, a crosta sã e seus relictos divergem, em termos mineralógicos, da matriz argilosa e do solo. Contudo, o aumento de caolinita+quartzo, da crosta sã para o solo, se dá, a grosso modo, com a diminuição (correlação negativa) de gibbsita

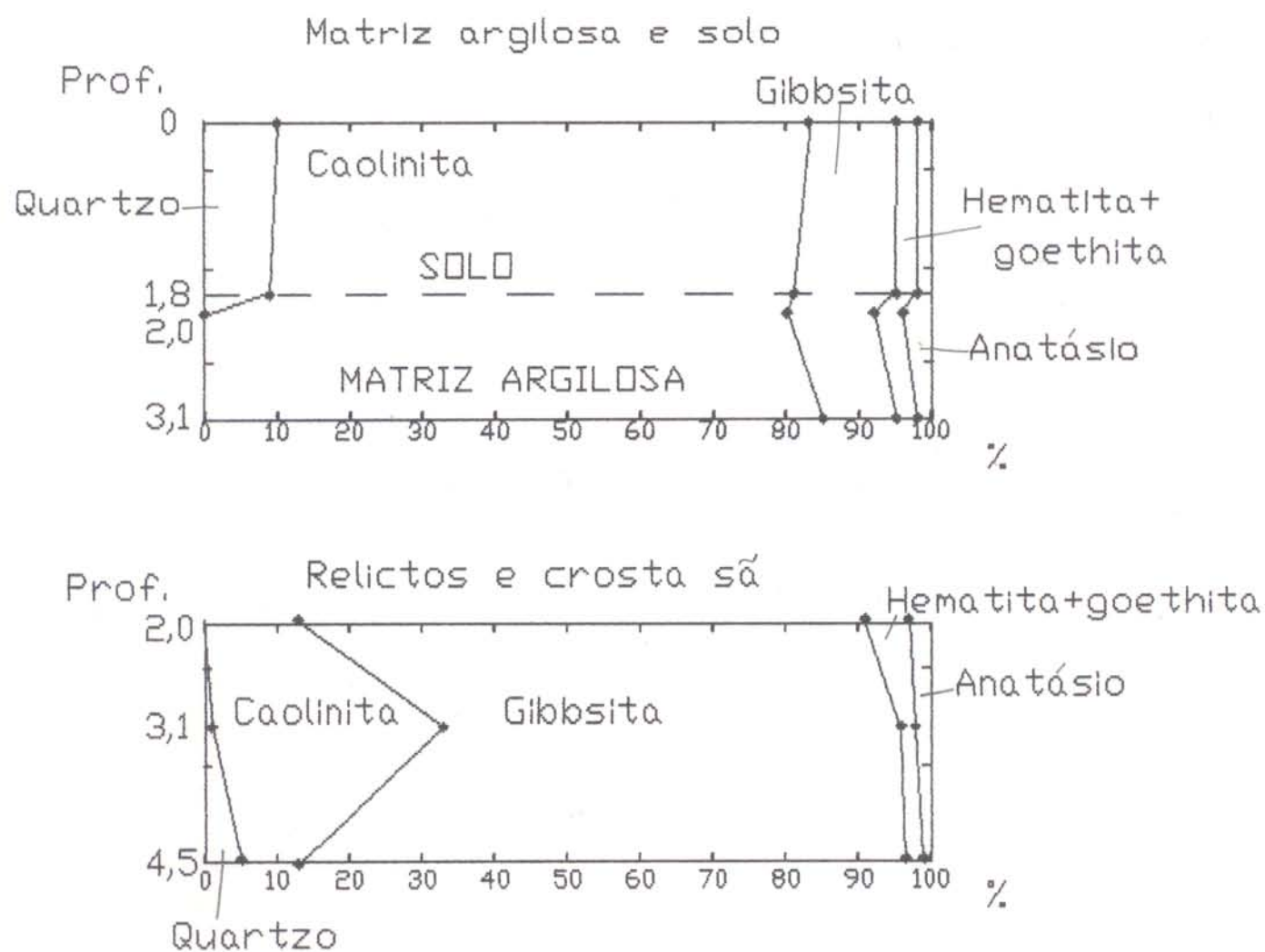


Figura 5.8: Composição mineralógica do perfil de Camoá

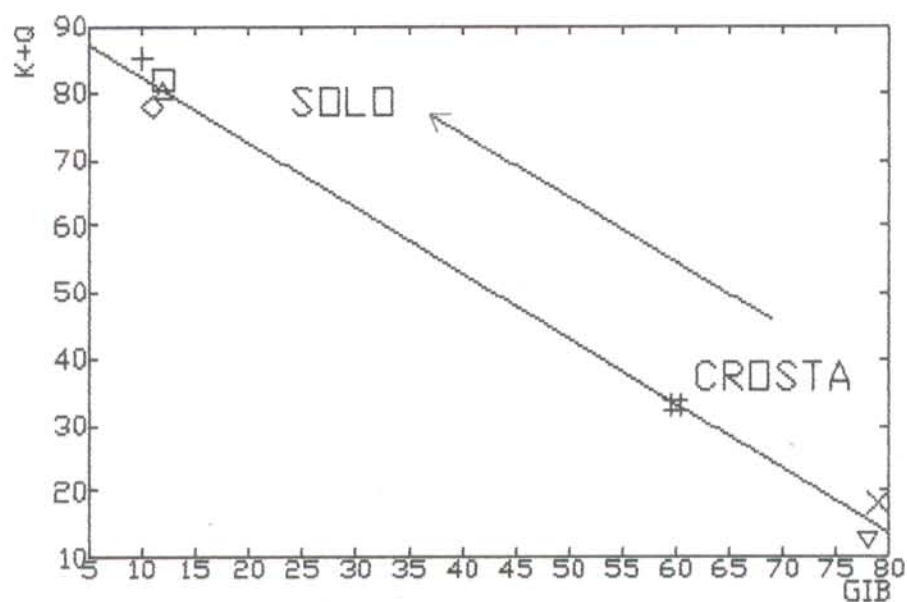
(Figura 5.9). Isto mostra que a transformação da crosta leva à formação e concentração de caolinita no solo. GRUBB (1979), HERNANLSTEENS (1982) e SUGDEN (1984), observaram uma diminuição gradativa no teor de gibbsita e aumento no de caolinita entre a crosta nodular e o solo, em perfis similares desenvolvidos sobre crostas aluminosas na região de Trombetas. No perfil de Camoaí essa variação não foi observada devido, provavelmente, a pouca espessura do solo.

Não foi possível o cálculo dos moles % de $AlOOH$ na goethita devido ao baixo teor desse mineral no perfil. Contudo, a cor ocre do solo pode ser atribuída à presença de Al-goethita, mineral típico de solos tropicais (DAVEY et al. 1975) e, por analogia, aos perfis de N5 e Igarapé Bahia.

5.4 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

5.4.1 - Composição Química Geral

O perfil de Camoaí é constituído apenas de SiO_2 e Al_2O_3 , que juntamente com a PF perfazem, no mínimo, 92% da sua composição total (Tabela 5.2).



- SOLO
- ◇ SOLO (1,8m)
- △ CROSTA INTemperizada (2,0m)
- △ Matriz argilosa
- ▽ Relicto
- △ CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada (3,1m)
- + Matriz argilosa
- # Relicto
- X CROSTA SÃ

Figura 5.9: Correlação da gibbsita (GIB) versus caolinita+quartzito (K+Q) no perfil de Camoá

Tabela 5.2: Composição química do perfil de Camoai (% em peso).

HORIZONTE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ _T	FeO	TiO ₂	PF	TOTAL
SOLO	43,52	36,39	3,41	0,29	1,12	17,49	101,93
SOLO(1,8m)	39,89	35,09	3,36	0,29	1,87	21,39	101,60
CROSTA INTENPERIZADA(2,0m)							
Matriz argilosa	37,93	40,34	4,20	0,07	2,87	15,28	100,62
Relicto de crosta	5,94	57,87	6,12	0,07	1,61	28,12	99,66
CROSTA PARCIALMENTE INTENPERIZADA(3,1m)							
Matriz argilosa	38,35	38,76	3,76	0,21	1,23	16,93	99,03
Relicto de crosta	18,29	54,18	1,52	0,07	1,18	26,21	101,38
CROSTA Sã(4,5m)	11,22	57,49	0,73	0,14	1,36	27,90	98,70

T teor total; (0,3m) profundidade em relação ao topo do perfil

Os teores de Al₂O₃ e PF são mais elevados na crosta sã (respectivamente 58% e 28%) e decrescem para o solo (respectivamente 36% e 17%), representando a distribuição da gibbsita no perfil. Os teores de SiO₂, que representam a caolinita e, secundariamente, o quartzo, são mais elevados na matriz argilosa e nos solos (Figura 5.10).

A crosta sã e seus relictos nos horizontes sobrepostos têm pequena variação química, com exceção da SiO₂ e Fe₂O₃. Apesar dessa variação os seus aspectos texturais e mineralógicos indicam que os relictos são de fato restos da crosta sã, apesar da presença mais abundante dos nódulos ferruginosos na crosta intemperizada, nódulos estes responsáveis pelos teores mais elevados em Fe₂O₃. Do mesmo modo a composição química similar entre a matriz argilosa e o solo mostra uma origem comum para esses dois materiais. Os teores mais elevados em SiO₂ são consequência da maior contaminação dos relictos da crosta parcialmente intemperizada pela matriz argilosa que preenche os poros.

A semelhança química entre a crosta sã e os relictos e entre

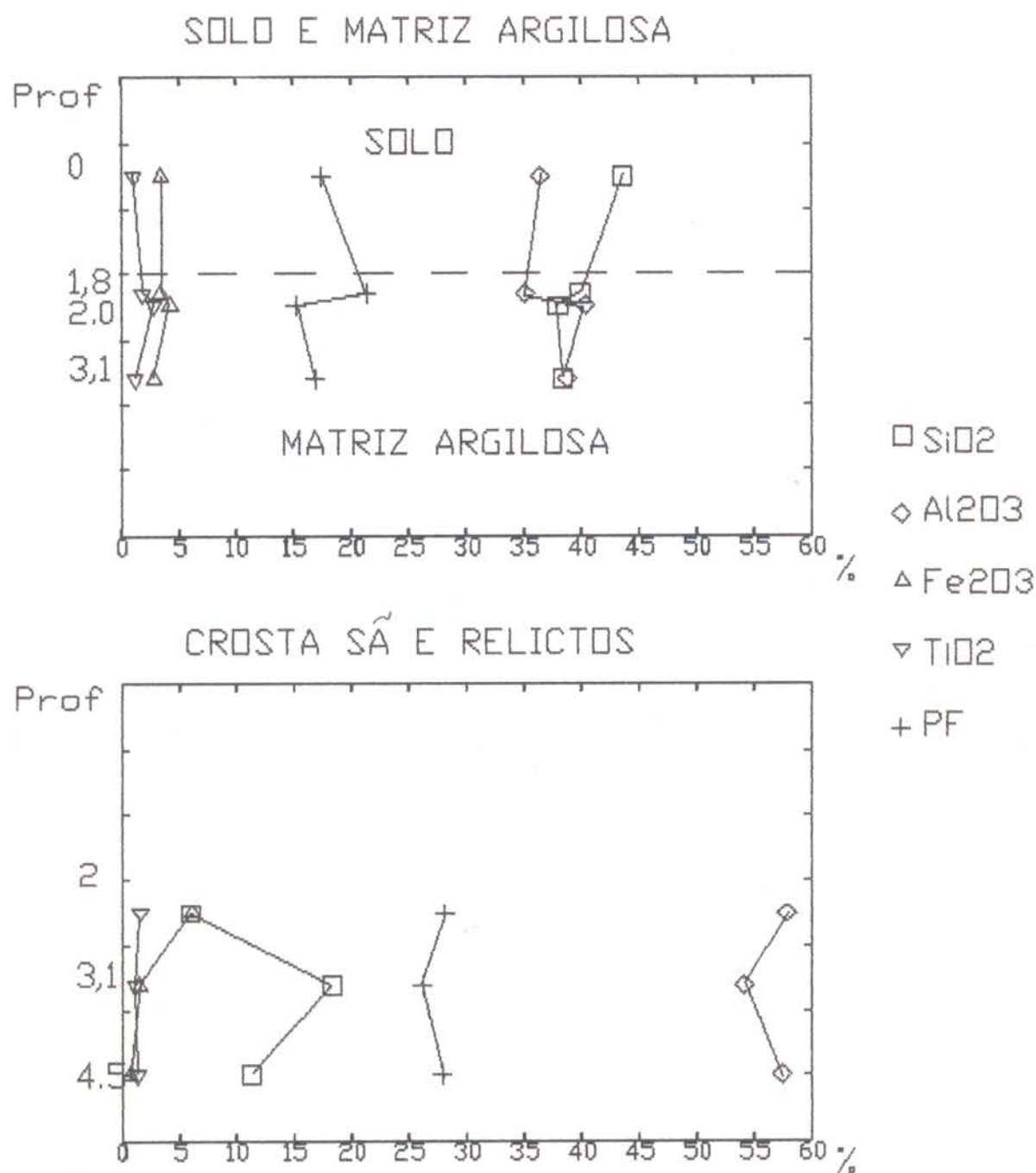


Figura 5.10: Distribuição da composição química por horizontes do perfil de Camoá

a matriz argilosa e o solo é comprovada pelo paralelismo das suas curvas de distribuição (Figura 5.11). Essas curvas mostram também que a transformação da crosta para o solo se dá com acentuada modificação química, tal como observado nos perfis de N5 e Igarapé Bahia, mas com aumento de SiO_2 e diminuição de Al_2O_3 , em uma relação linear inversa ao longo do perfil (Figura 5.12). Os baixos teores de Fe_2O_3 não permitiram estabelecer a correlação negativa $\text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$, como observada em N5 e Igarapé Bahia.

O diagrama SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 (Figura 5.13) mostra que o intemperismo se dá em direção ao membro SiO_2 . Assim, a transformação da crosta sã para o solo leva a uma perda acentuada de Al_2O_3 e acúmulo de SiO_2 . A relação entre SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 , que é inversa à observada durante o intemperismo, deve-se à composição peculiar da crosta, com elevado teor de Al_2O_3 . Portanto, o processo de transformação da crosta sã em um material argiloso e o acúmulo de caolinita e quartzo no topo do perfil é compatível com o processo intempérico e, portanto, correlacionável aos de N5 e Igarapé Bahia, que derivam de crostas com elevado teor de Fe_2O_3 .

5.4.1.1 - Composição Química dos Componentes que Constituem a Crosta e seus Relictos nas Crostas

Nos relictos da crosta parcialmente intemperizada (seção AA'- Figura 5.14a) os teores de Al_2O_3 são mais elevados no fácies rosado (em torno de 65% ou seja, quase 100% de gibbsita), diminuindo para o fácies creme (entre 51% e 60%) e ainda mais para a matriz argilosa (entre 40% e 50%), que preenche os poros e

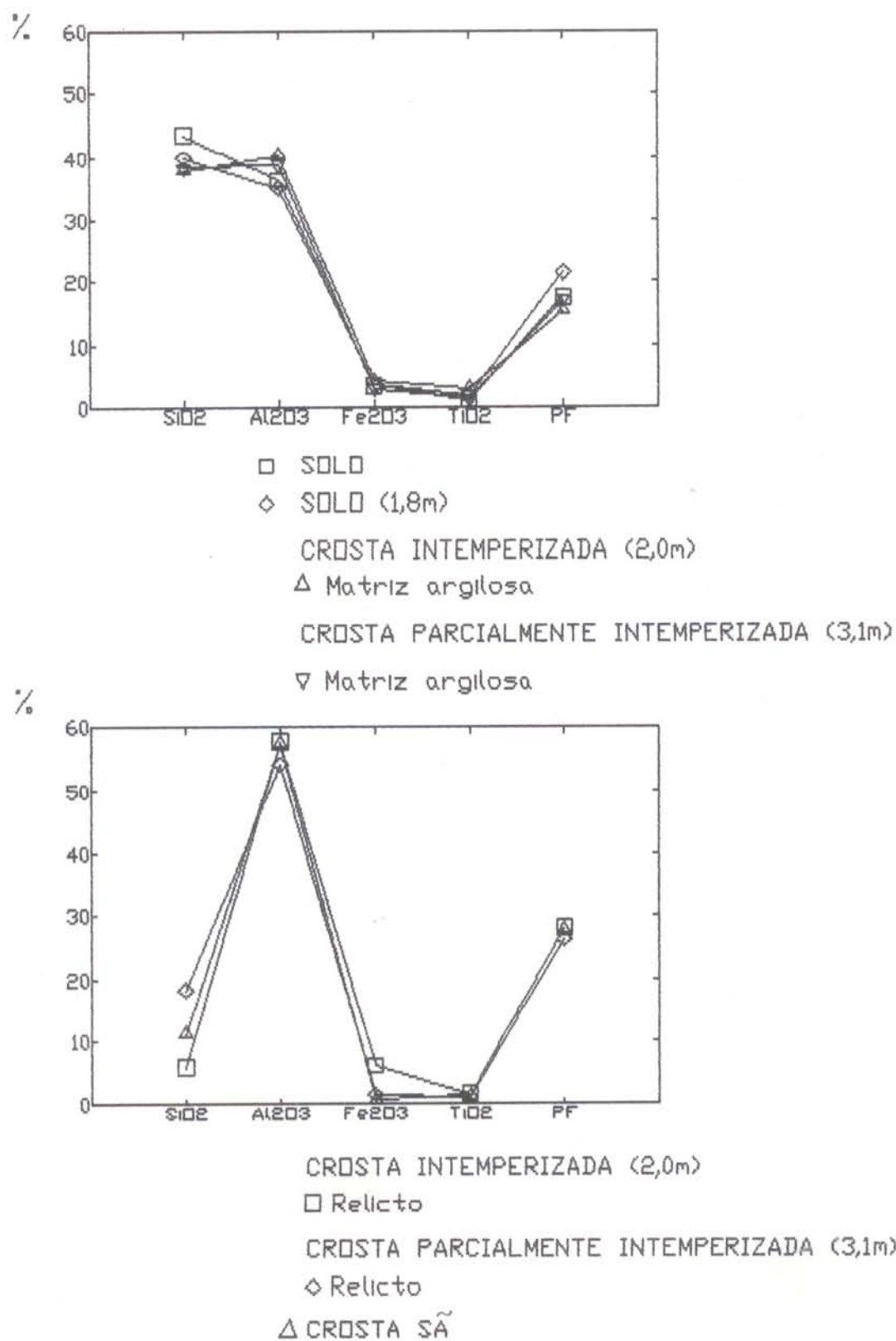
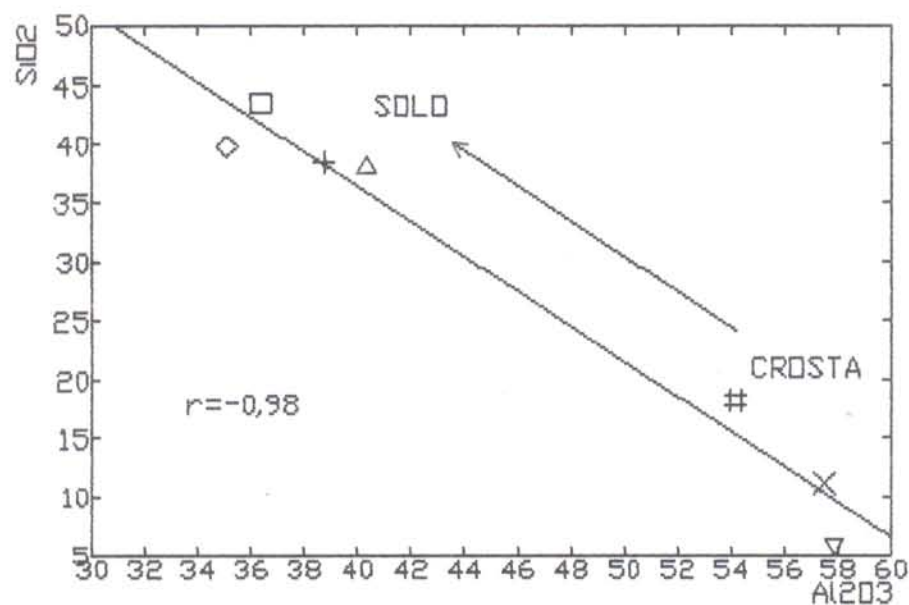
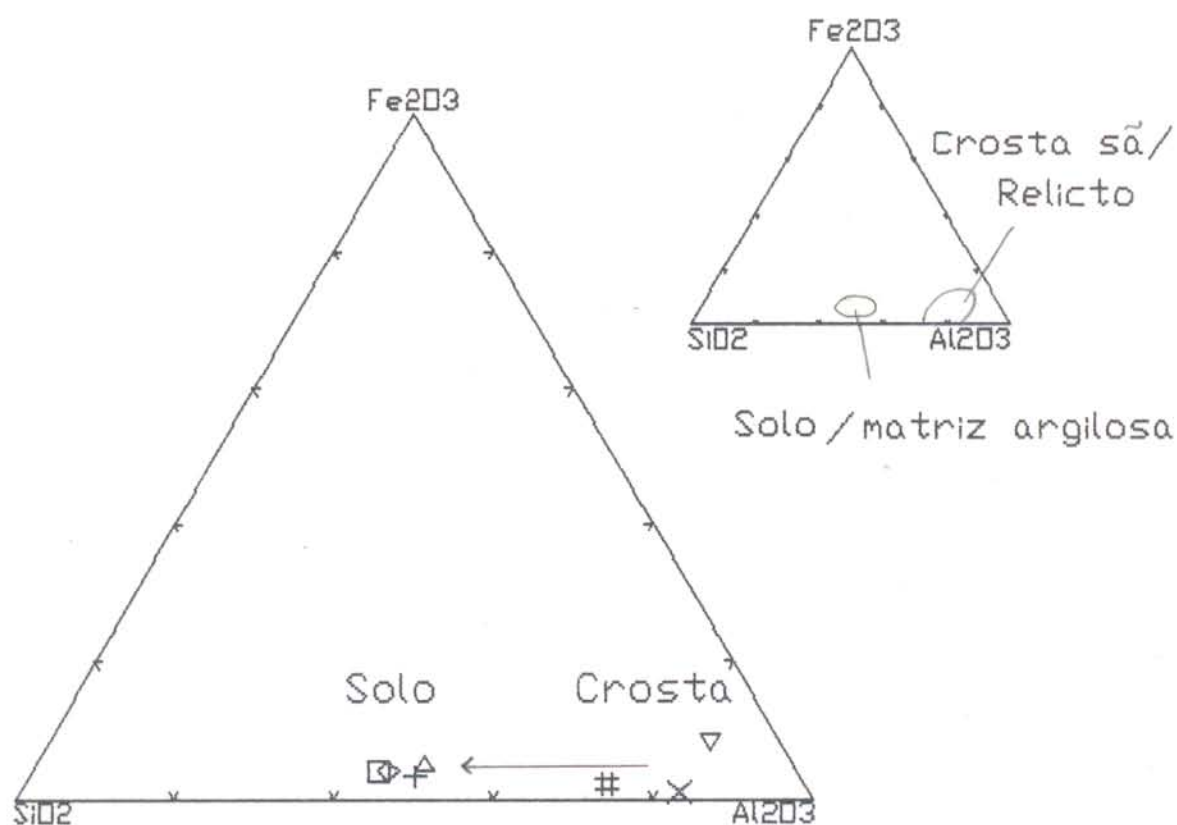


Figura 5.11: Distribuição da composição química do perfil de Camoá



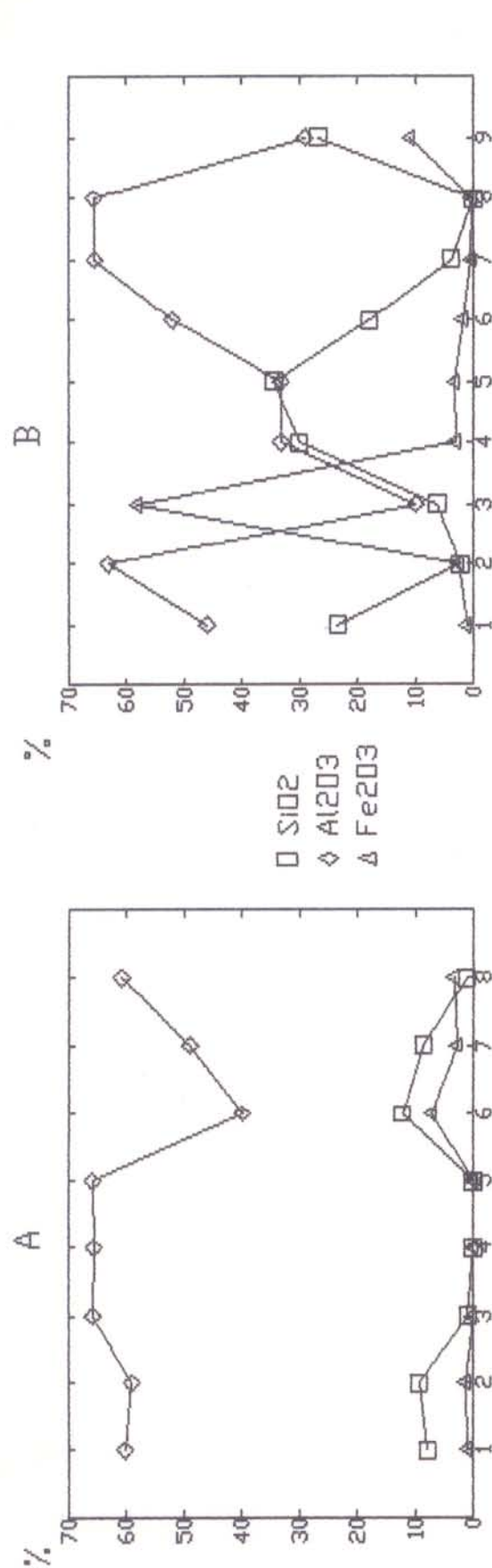
- SOLO
- ◇ SOLO (1,8m)
- △ CROSTA INTemperizada (2,0m)
- △ Matriz argilosa
- ▽ Relicto
- △ CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada (3,1m)
- + Matriz argilosa
- # Relicto
- X CROSTA SÃ

Figura 5.12: Correlação SiO_2 e Al_2O_3 no perfil de Camoá



- SOLO
- ◇ SOLO (1,8m)
- CROSTA INTEMPERIZADA (2,0m)
 - Δ Matriz argilosa
 - ▽ Relicto
- CROSTA PARCIALMENTE INTEMPERIZADA (3,1m)
 - + Matriz argilosa
 - # Relicto
- X CROSTA SÃ

Figura 5.13: Diagrama $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ do perfil de Camoá



Crستا Parcialmente Intemperizada

Crستا Intemperizada

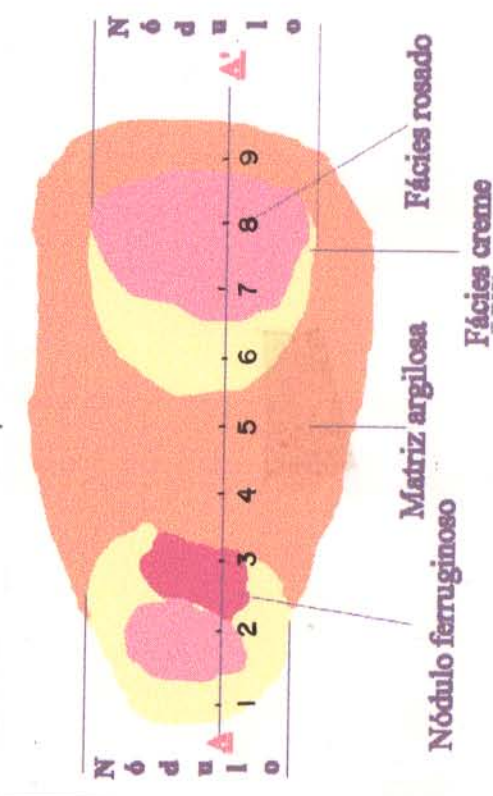
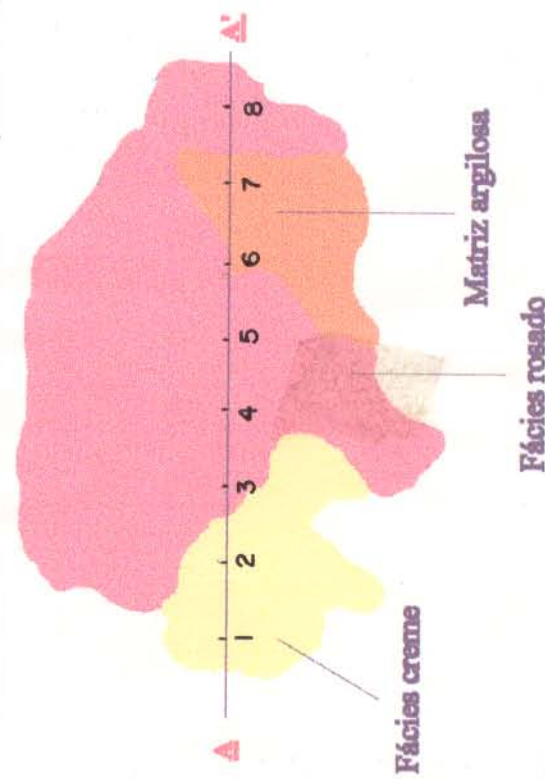


Figura 5.14: Distribuição de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ obtidos por microsonda relíctos do perfil de Camoá

fissuras. Os teores de SiO_2 aumentam de 0,6% para 12% nessa mesma direção, correspondendo à formação de caolinita e ao decréscimo de gibbsita do fácies rosado para a matriz argilosa.

Na seção BB' (Figura 5.14b), mostrando um relicto da crosta intemperizada, o nódulo do fácies rosado apresenta composição química similar à da seção AA'. O fácies creme é mais rico em SiO_2 e menos aluminoso, o que corresponde a um aumento no teor de caolinita, assemelhando-se à composição da matriz argilosa da seção AA'. A matriz argilosa da seção BB' é ainda mais silicosa e menos aluminosa que a matriz da seção AA'. Ou seja, o relicto do horizonte mais alterado reflete também um aumento de caolinita às expensas de gibbsita. O nódulo ferruginoso apresenta 58% de Fe_2O_3 e menos de 10% de SiO_2 e Al_2O_3 . Os teores de Fe_2O_3 , um pouco mais elevados no fácies creme (1,81%) que no rosado (<1%), indicam que o material analisado no fácies rosado é gibbsita microcristalina e não criptocristalina onde o manchamento por oxi-hidróxidos de Fe é maior (Figura 5.4).

Observa-se portanto, em escala de detalhe, um aumento crescente no teor de SiO_2 do fácies rosado em direção à matriz argilosa, e entre fácies semelhantes nos relictos da crosta parcialmente intemperizada e da intemperizada. O fácies creme representa o estágio intermediário dessa transformação, tendendo a ser mais rico em SiO_2 e mais pobre em Al_2O_3 que o fácies rosado, conforme observado por BLACK et al. (1984) e BARDOSSY & ALEVA (1990) em material similar na região de Trombetas. Assim, os nódulos do fácies rosado e o plasma internodular creme podem ser considerados como resultantes de um único processo de desaluminização da crosta e, correlacionáveis aos pisólitos de

degradação de TARDY (1993).

5.4.2 - Elementos-traço

Os teores dos elementos-traço no perfil de Camoaí são apresentados na tabela 5.3. O V, Cr, Zr, Ga, Y e Pb apresentam teores 1 a 2 vezes superiores à média crustal enquanto os demais estão abaixo. A baixa concentração nesses elementos é uma característica de crostas aluminosas e solos aluminosos derivados de rochas sedimentares similares (VALETON, 1972; BARDOSSY & ALEVA, 1990 e TRUCKEMBRODT et al, 1991).

Tabela 5.3: Concentração dos elementos-traço no perfil de Camoaí (em ppm).

HORIZONTE	V	Cr	Ni	B	Mo	Zr	Ga	Y	Sc	Mn	Cu	Pb
SOLO	265	132	34	(10	5	240	44	54	45	56	3	63
SOLO(1,8m)	138	160	35	12	(5	200	45	47	12	55	4	70
CROSTA INTENPERIZADA(2,0m)												
Matriz argilosa	200	120	25	(10	(5	760	38	18	8	100	8	(20
Relicto de crosta	220	420	30	12	(5	540	50	42	7	14	(2	(20
CROSTA PARCIALMENTE INTENPERIZADA(3,1m)												
Matriz argilosa	36	118	29	(10	(5	79	46	11	(5	39	3	67
Relicto de crosta	64	160	19	(10	(5	152	44	35	12	14	(2	54
CROSTA Sã(4,5m)	64	148	27	11	(5	88	39	20	(5	14	2	289
MÉDIA CRUSTAL	135	100	75	10	1,5	165	15	33	22	900	55	13

(0,3m) profundidade em relação ao topo do perfil

A distribuição dos elementos-traço ao longo do perfil (Figura 5.15), da crosta sã para seus relictos nos horizontes sobrejacentes, mostra que:

- 1- Pb diminui de teores.
- 2- Mn mantém teores constantes entre a crosta sã e os relictos.
- 3- Ga e Y aumentam e V, Mn, Cr e Zr aumentam muito mais.

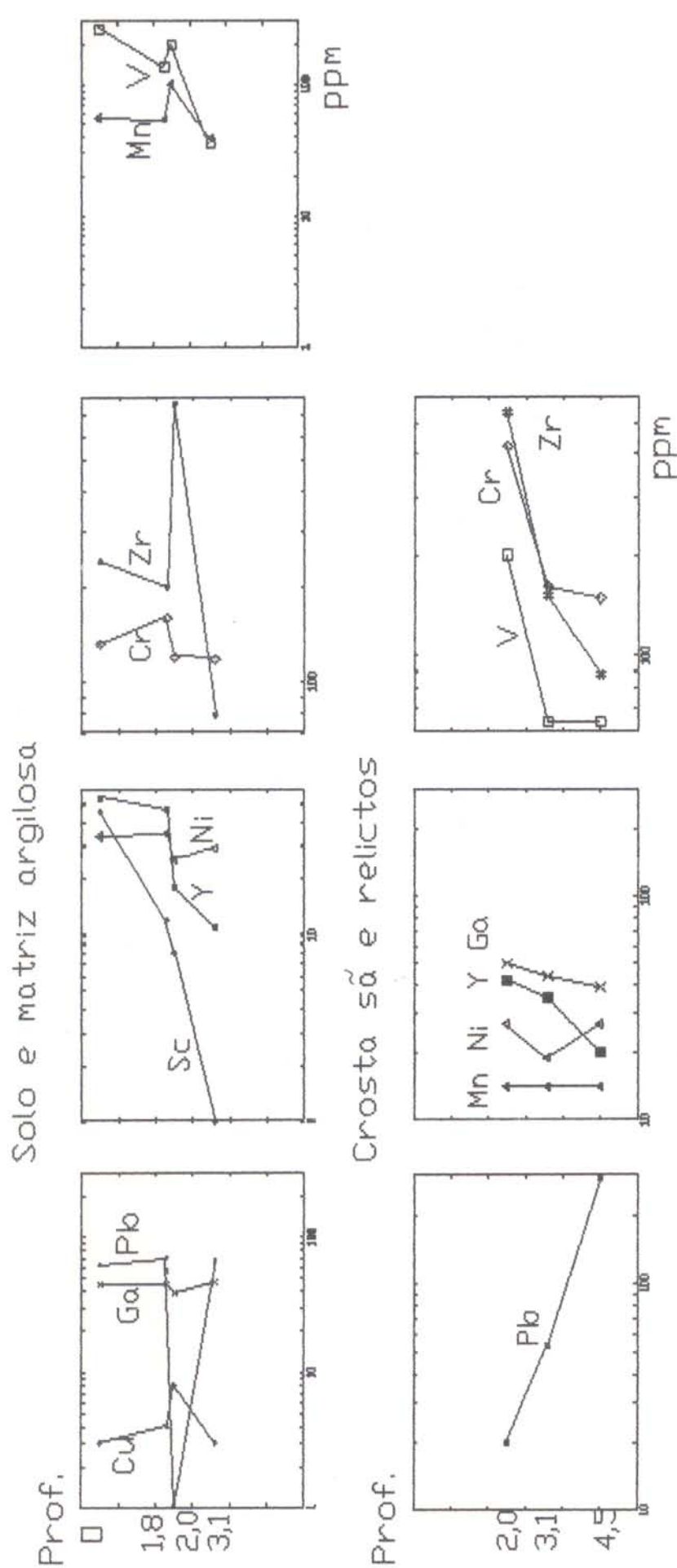


Figura 5.15: Distribuição dos elementos-traço por horizontes no perfil de Camoal

Isso indica que os relictos experimentaram modificações durante o intemperismo, da mesma forma como detectado no metapelito lateritizado do Igarapé Bahia.

Com relação à matriz argilosa e o solo somente o V, Cr, Ni, Y, Sc e em parte o Zr aumentam de teor para o topo do perfil (Figura 5.15). Os demais elementos tem distribuição irregular.

A ausência de um padrão marcante na distribuição dos elementos-traço no perfil de Camoáí deve-se a sua baixa concentração ao longo do perfil. Contudo, o comportamento equivalente do V, Cr, Zr e Y, tanto da crosta sã para os relictos como da matriz para o solo, indica que esses materiais sofreram o mesmo processo.

Quando se compara a crosta sã e relictos com a respectiva matriz argilosa e solo (Figura 5.16) nota-se que o padrão das curvas divergem somente no teor de Sc e Mn e, em parte, de V, com teores mais elevados no material mais fino havendo, portanto, uma similaridade química entre os materiais do perfil. Essa similaridade se estende para as curvas entre o fácies rosado, o nódulo ferruginoso e o fácies creme (Figura 5.17), o que reforça a filiação química entre os materiais que constituem o perfil de Camoáí, apesar da composição mineralógica e da composição química geral (óxidos maiores) serem muito diferente.

A maior concentração de Zr no solo do que na crosta sã, provavelmente associada ao mineral zircão, também é observada nos perfis de N5 e Igarapé Bahia. Os teores mais elevados em Mn nos solos indicam a provável associação desse elemento com a matéria orgânica, na forma de complexos organo-metálicos (NEWMAN & BROWN, 1987) e/ou na goethita (SCHELLMANN, 1983; MANCEAU &

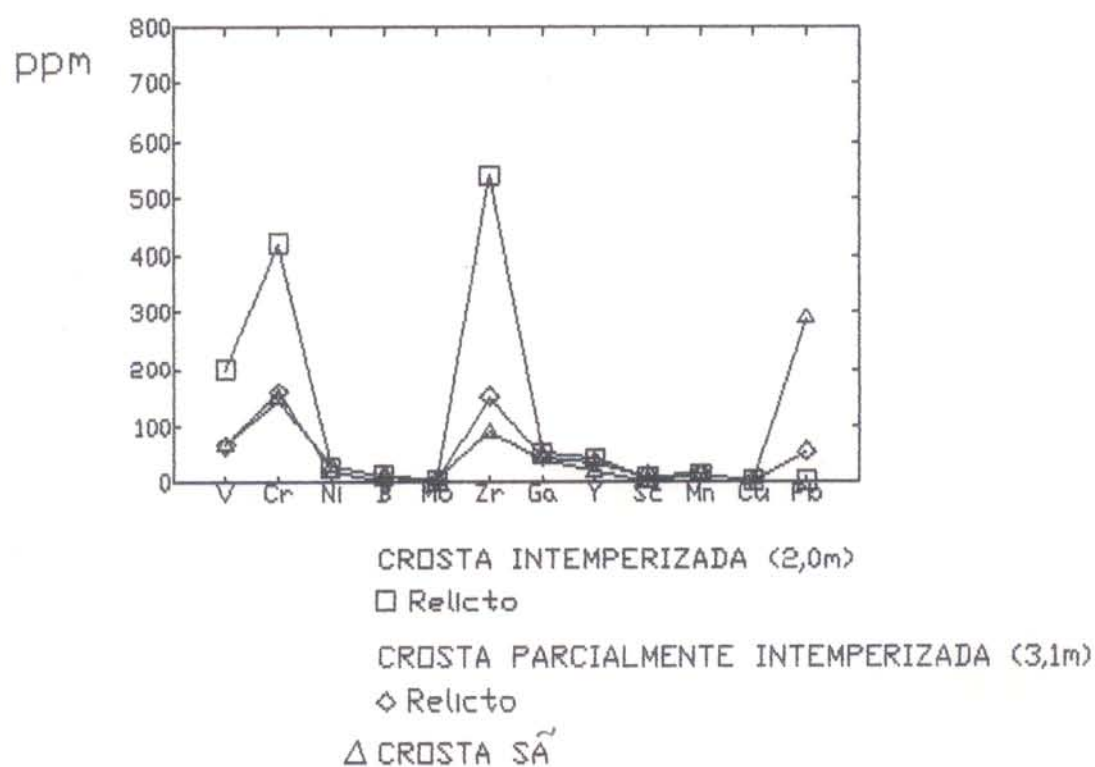
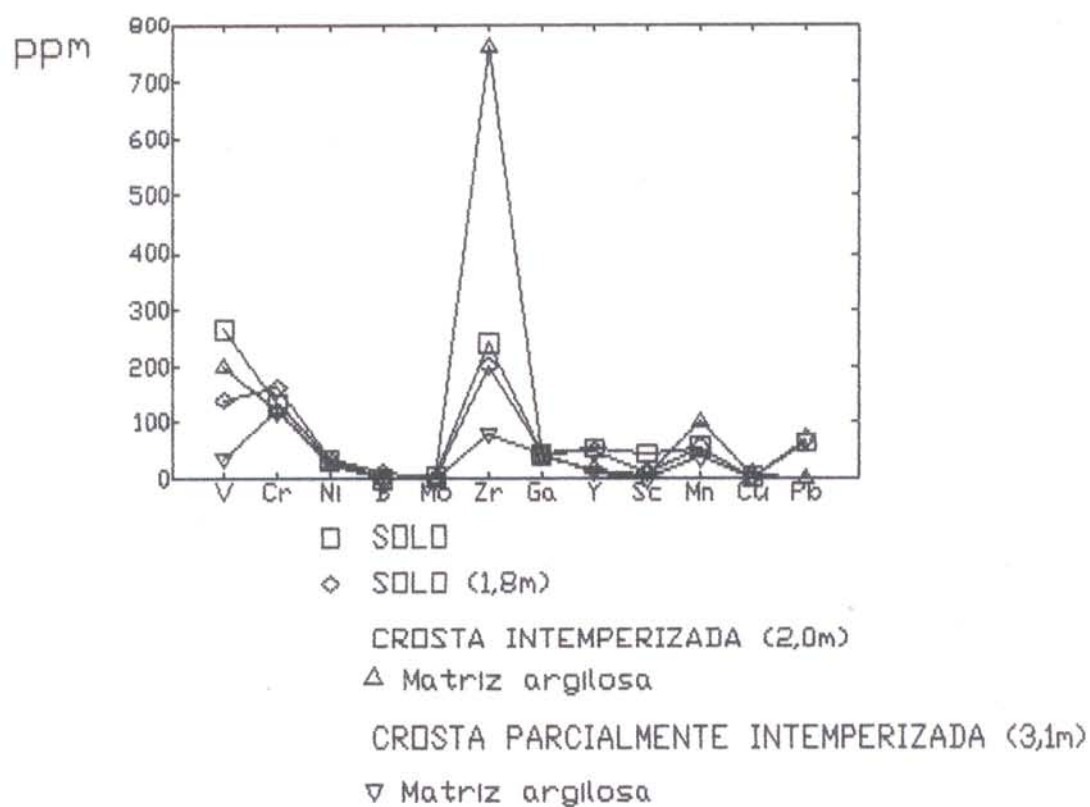


Figura 5.16: Distribuição dos elemento-traço entre os materiais do perfil de Camoá

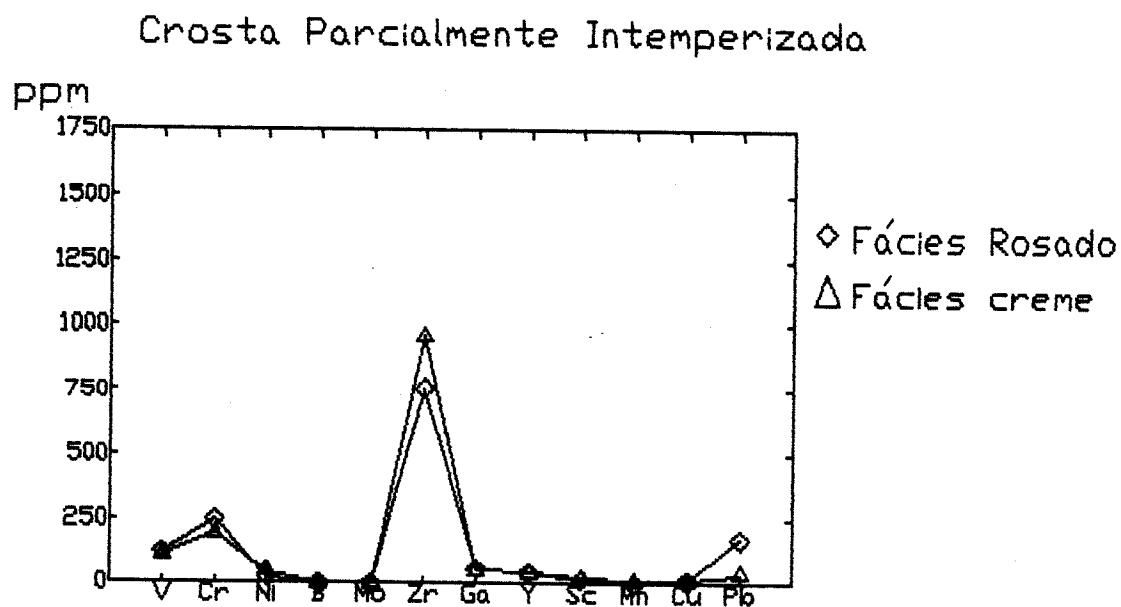
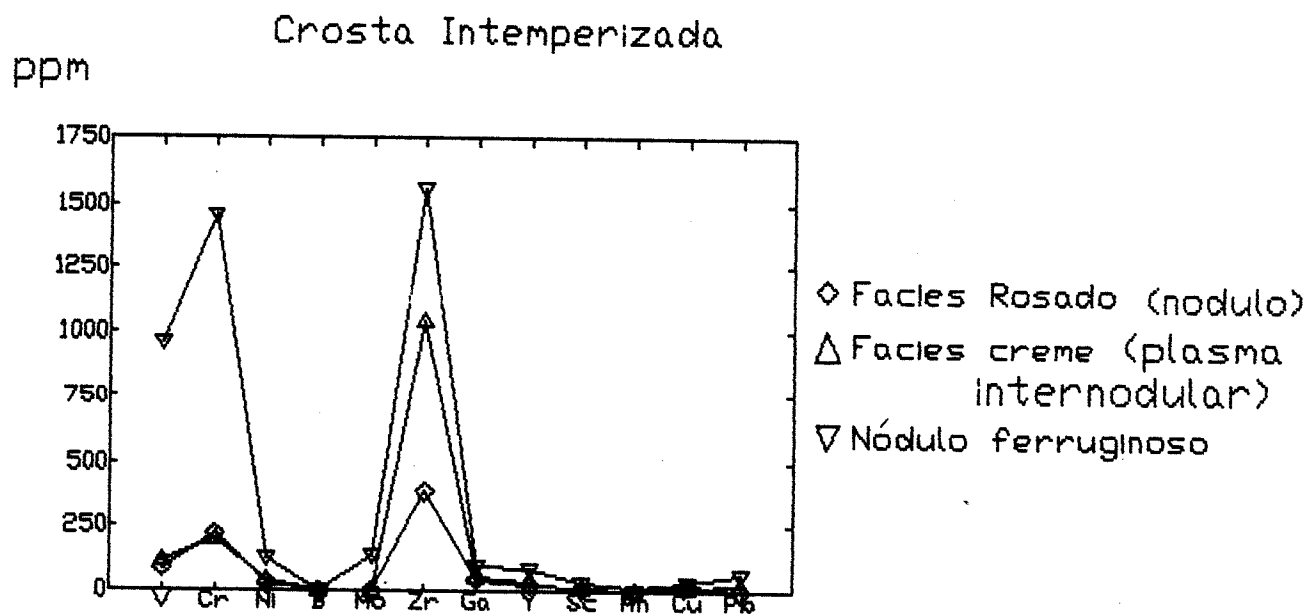


Figura 5.17: Distribuição dos elementos-traço nos materiais que constituem os relictos do perfil de Camoá

CALAS, 1986; CORNELL, 1988 e SCHWERTMANN et al. 1989).

No diagrama V-Ni-Zr (Figura 5.18) o campo da crosta sã e dos relictos se superpõe parcialmente ao da matriz argilosa enquanto o do solo se afasta do vértice do Zr indicando fraca diferenciação do perfil em relação a esses elementos. No diagrama V-Ni-Mn a sequência de evolução do perfil leva ao enriquecimento de Mn.

5.4.2.1 - Elementos Terras Raras

As concentrações dos ETR no perfil de Camoá (Tabela 5.4) mostram o domínio dos ETRL sobre os ETRP com valores similares à inferiores à média crustal, tendo os ETRL, assim como nos perfis anteriores, maior variação de teor.

Tabela 5.4: Concentração dos elementos terras raras no perfil de Camoá (em ppm).

HORIZONTES	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Lan/Smn
SOLO(0,3m)	23,45	45,21	15,80	1,48	0,31	1,49	2,07	0,44	1,29	1,42	0,19	10,00
SOLO(1,8m)	35,63	67,17	28,37	2,47	0,47	2,24	3,21	0,70	2,15	2,36	0,33	9,10
CROSTA INTemperizada(2,0)												
Matriz argilosa	42,42	68,83	35,01	2,75	0,50	2,85	5,38	1,28	4,43	5,73	0,84	9,71
Relicto de crosta	14,82	26,35	13,65	1,09	0,21	0,82	1,78	0,44	1,58	1,89	0,26	8,59
CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada(3,1m)												
Matriz argilosa	39,94	60,84	12,06	2,18	0,44	0,47	3,67	0,83	2,69	3,32	0,47	11,56
Relicto de crosta	46,84	52,46	13,56	2,16	0,39	2,04	2,94	0,69	2,51	3,13	0,46	13,64
Média crustal	30,00	60,00	28,00	6,00	1,20	5,40	3,00	1,20	2,80	3,00	0,50	

(0,3m) profundidade em relação ao topo do perfil

Com relação aos relictos os teores são mais elevados na crosta parcialmente intemperizada, assemelhando-se à distribuição da SiO₂ (Figura 5.10) e ao Pb (Figura 5.15), exceto o Nd, com teores similares. Na matriz argilosa os ETR concentram-se mais

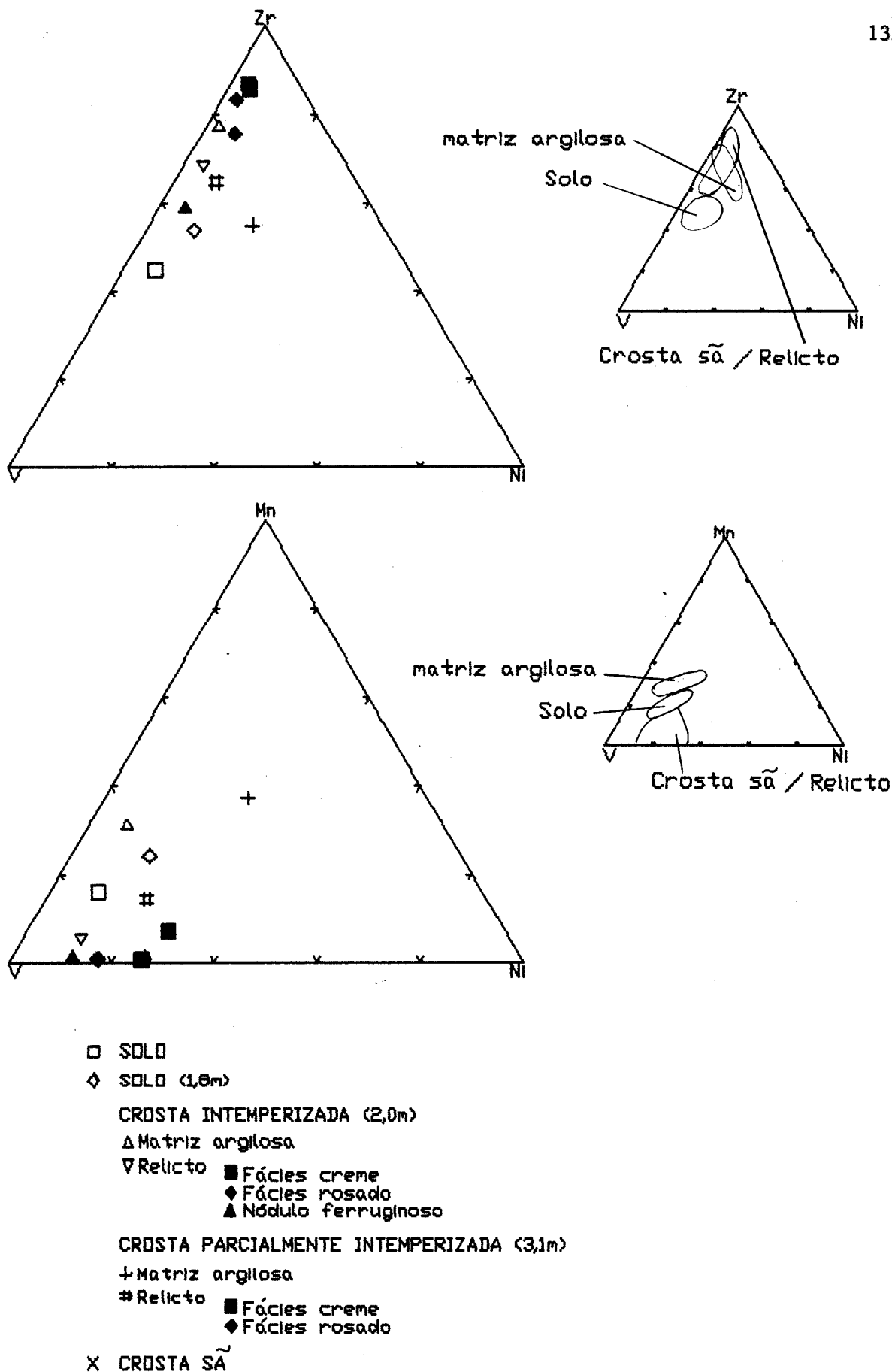


Figura 5.18: Diagramas V-Ni-Zr e V-Ni-Mn no perfil de Camoá

na crosta intemperizada diminuindo desta para o solo (Figura 5.19), em correlação ao TiO_2 (Figura 5.10) e ao Cu (Figura 5.15).

As curvas de fracionamento dos ETR normalizados em relação aos condritos (Figura 5.20) mostram marcante anomalia de Eu e forte depleção em ETRL e enriquecimento em ETRP, padrão que se assemelha a N5 e difere um pouco do perfil do Igarapé Bahia, refletindo a natureza diversa do substrato. A persistência do padrão ao longo do perfil contribui para ressaltar a interdependência entre os diversos materiais do perfil.

A normalização dos ETR pelo relicto da crosta parcialmente intemperizada (Figura 5.21) mostra enriquecimento em Nd, desenvolvendo anomalia positiva nesse elemento. Os ETRP se enriquecem nas matrizes e se empobrecem no solo.

A tendência de diminuição dos ETR, principalmente dos leves, no topo dos perfis, mostra a mobilidade dos ETR, similar à observada nos perfis de N5 e Igarapé Bahia.

5.5 BALANÇO DE MASSA E CONCLUSÕES

No balanço de massa do perfil de Camoá (Tabela 5.5) foram considerados a crosta sã e o TiO_2 como referência, do mesmo modo que nos perfis anteriores.

Da tabela 5.5 pode-se observar que:

- 1- Al e Pb são lixiviados
- 2- Si, Fetotal, V, Zr e Mn são enriquecidos ao longo do perfil.

Os demais elementos não apresentam um padrão constante. Esses dois grupos podem representar respectivamente a decomposição da gibbsita na cominuição da crosta aluminosa e a formação da caolinita e goethita na matriz argilosa e no solo.

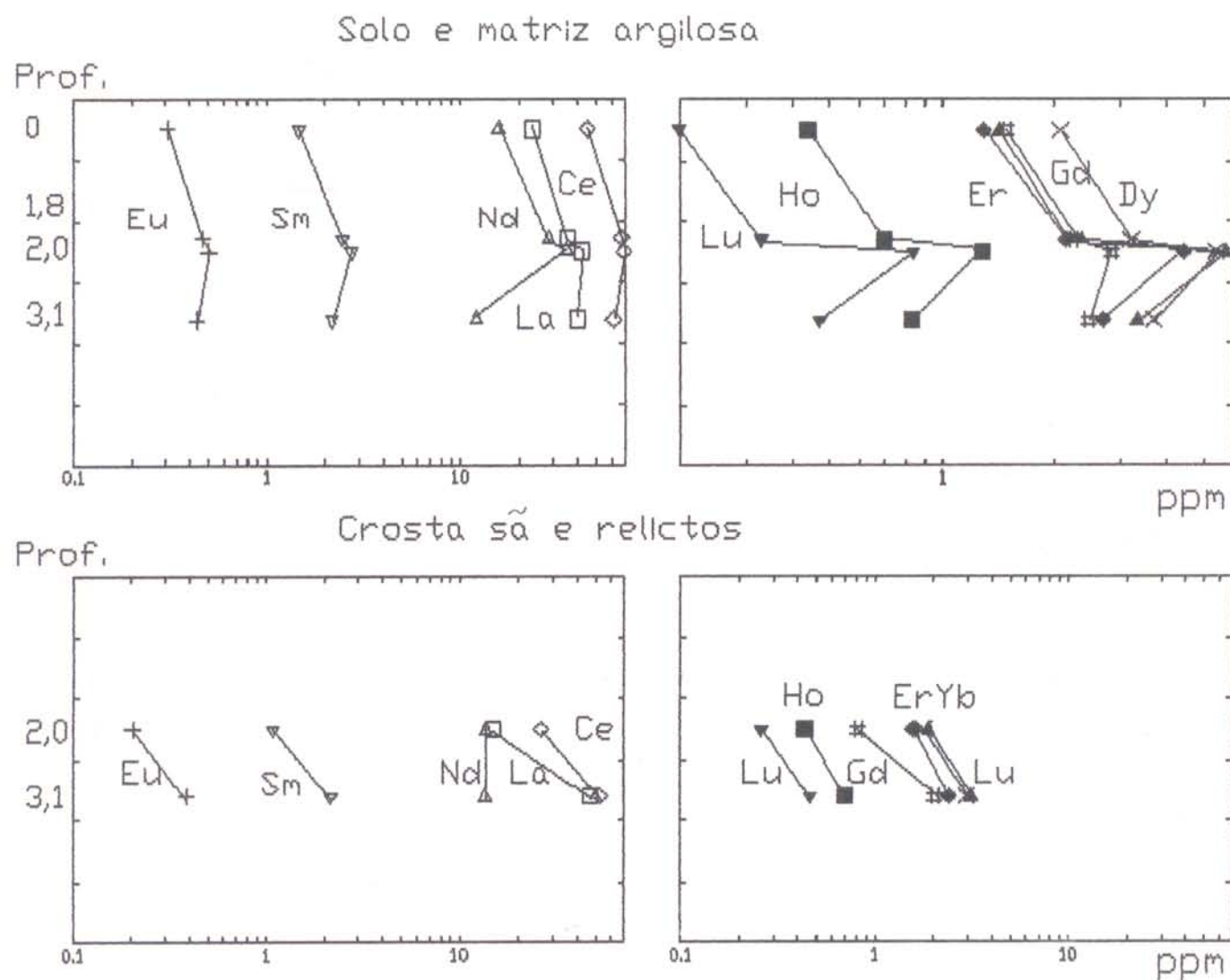


Figura 5.19: Distribuição dos ETR por horizontes
no perfil de Camoal

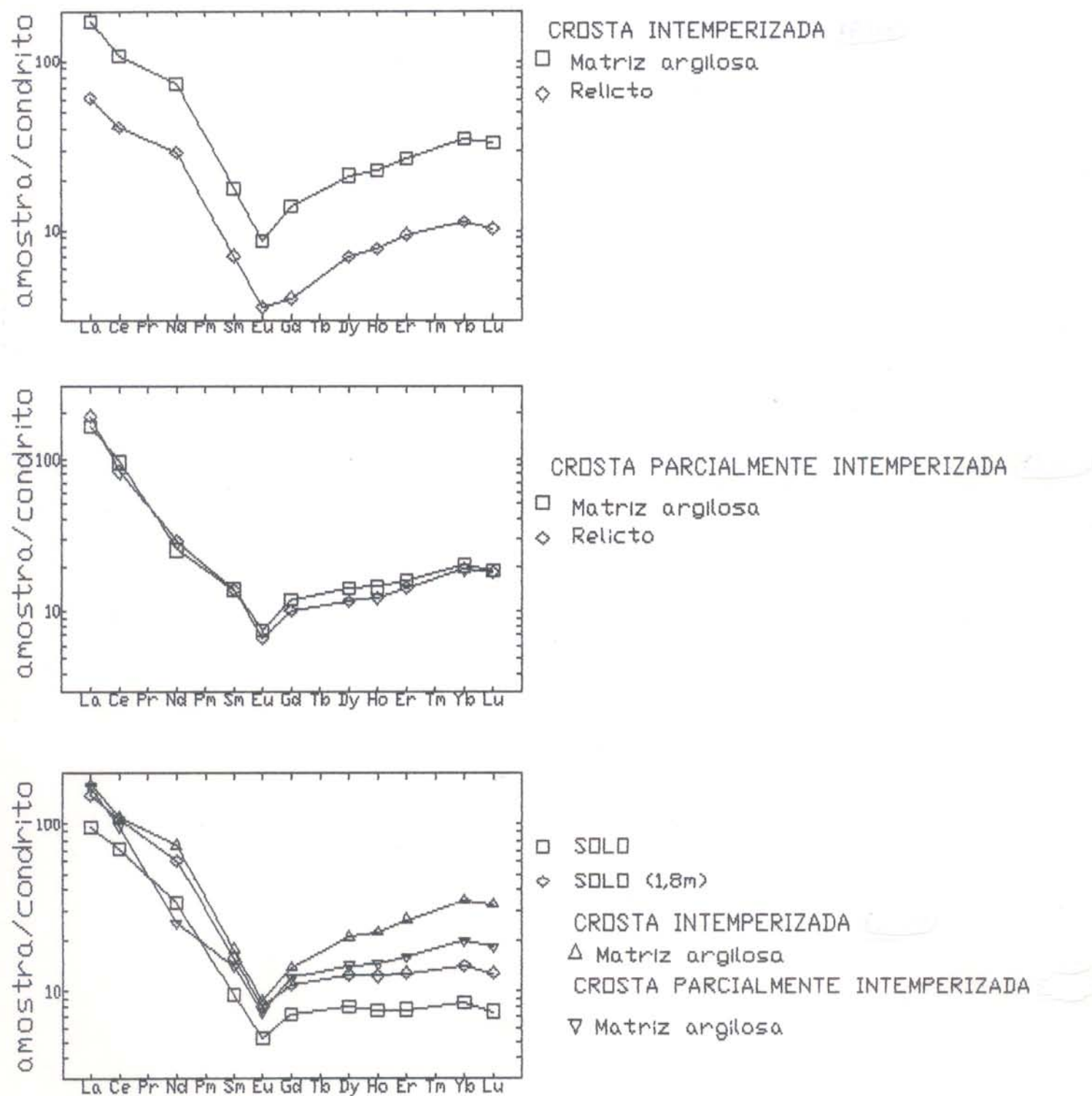
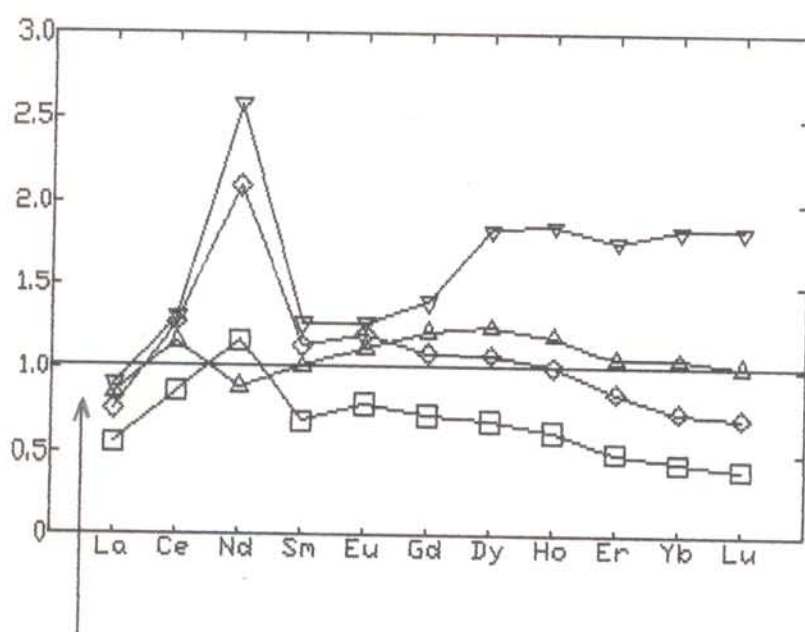


Figura 5.20: Normalização dos ETR em relação aos condritos no perfil de Camoá



Relicto da crosta parcialmente intemperizada

□ SOLO

◇ SOLO (1,8m)

CROSTA INTEMPERIZADA (2,0m)

Δ Matriz argilosa

CROSTA PARCIALMENTE INTEMPERIZADA (3,1m)

▽ Matriz argilosa

Figura 5.21: Normalização dos ETR em relação ao relicto da crosta parcialmente intemperizada no perfil de Camoá

Tabela 5.5: Balanço de massa do perfil de Camoaí.

HORIZONTE	LIXIVIADOS		INGUEIS		ENRIQUECIDOS	
	>90Z	90Z A 40Z	<40Z	10Z A 10Z	<40Z	40Z A 90Z
SOLO		Pb	Al, PF	Cr	Cr, Ga, MV	Ni, Cu
						Si, Fetotal, Fe2+ V, Zr, Y, Mn
SOLO		Al, PF Zr, Pb,	Cr, Ni MV	Ni	Cu	Fe2+, V, Y
						Si, Fetotal, Mn
CROSTA INTemperizada						
Matriz argilosa		Al, Fe2+, PF, Cr, Ni, Ga, Y	MV			Si, V Cu
						Fetotal, Zr, Mn
Relicto		Si, Fe2+	Al, PF Mn, Ni, MV	Ga		Y
						Fetotal, V, Zr Cr
CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada						
Matriz argilosa	Mn	Pb	Al, PF V, Cr, Y	Zr	Ga, Ni, MV	Fe2+, Cu
						Si, Fetotal
Relicto		Pb, Fe2+ Si	Ni	Al, PF,	V, Cr Ga, Mn, MV	
						Fetotal, Zr, Y

MV - modificação de volume

A modificação volumétrica (MV) mostra uma expansão de volume da crosta sã para a crosta parcialmente intemperizada devido ao fraturamento crescente da crosta sã e ao preenchimento por material iluvial. Há um colapso da estrutura da crosta intemperizada, em consequência da total desagregação do material, de modo similar a N5 e Igarapé Bahia. O colapso está associado à intensa lixiviação de Al (68%) neste horizonte, devido à dissolução da gibbsita. A expansão de 26% no topo do solo deve-se ao enriquecimento mais acentuado em Si, na forma de caolinita e, secundariamente, de quartzo, que se enriquece residualmente. A ação das raízes também é mais intensa neste horizonte, tornando-o mais friável e poroso levando a expansão

do volume.

Assim, a lixiviação de Al e Pb e o enriquecimento em Si, Fetotal, V, Zr e Mn da crosta são e dos relictos para a matriz argilosa-solo, levou à individualização de horizontes de um modo similar aos perfis de N5 e Igarapé Bahia.

6 - PERFIL INTEMPÉRICO SOBRE CROSTA LATERÍTICA SÍLICO-FERRUGINOSA IMATURA - OUTEIRO E MOSQUEIRO

6.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS

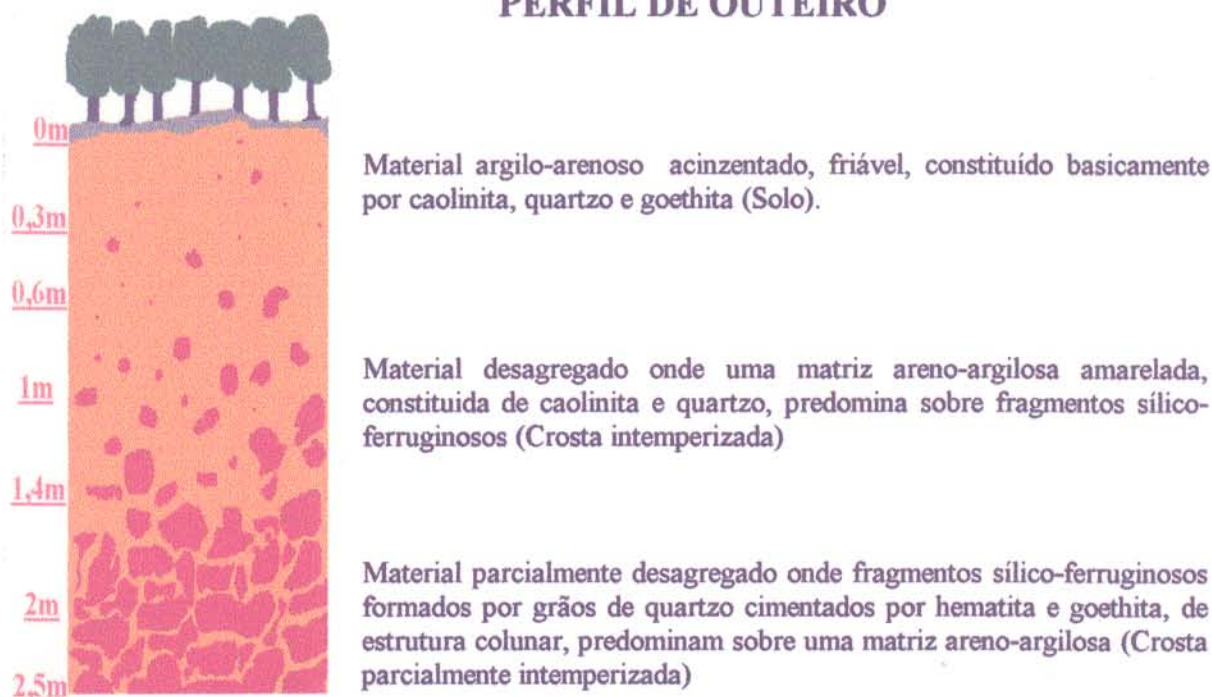
Os solos dos perfis de Outeiro e Mosqueiro se desenvolveram sobre crostas sílico-ferruginosas imaturas, derivadas da lateritização das rochas sedimentares da Formação Barreiras (COSTA et al, 1991b). Essas crostas são menos evoluídas que as crostas dos perfis de N5, Igarapé Bahia e Camoáí.

Para o estudo da relação genética entre a crosta e o solo é apresentada, na figura 6.1, a estruturação da porção superior dos dois perfis, compreendendo a crosta sílico-ferruginosa e o solo.

A crosta sílico-ferruginosa do perfil de Outeiro apresenta coloração avermelhada e textura micro-porosa, formada por grãos de quartzo cimentados por hematita, goethita e caolinita (Figura 6.2). Mostra uma estruturação colunar típica, encontrando-se parcialmente desagregada e formando fragmentos com 10 a 20 cm de diâmetro, constituindo uma **crosta parcialmente desagregada**. Preenchendo as suas fraturas, fissuras e poros há uma matriz areno-argilosa de aspecto terroso, de cor amarelada. Os fragmentos dessa crosta diminuem gradualmente de tamanho em direção ao topo do perfil. Deste modo, a matriz argilosa amarelada passa a predominar sobre os fragmentos até formar a **crosta desagregada** que evolui para o **solo**, onde os fragmentos são raros e milimétricos. Os primeiros centímetros da camada de solo são ricos em matéria orgânica e apresentam coloração acinzentada.

O perfil de Mosqueiro assemelha-se ao de Outeiro, com a

PERFIL DE OUTEIRO



PERFIL DE MOSQUEIRO



Figura 6.1: Perfis de alteração das crostas sílico-ferruginosas de Outeiro e Mosqueiro



Figura 6.2: Fragmentos colunares da crosta porosa de Duteiro.



Figura 6.3: Aspecto da crosta sã, porosa de Mosqueiro.



Figura 6.4: Aspecto mosqueado da base do solo do perfil de Mosqueiro onde se identificam o material argiloso cinzento manchado por óxi-hidróxido de ferro (2,3m).



Figura 6.5: Aspecto mosqueado da porção intermediária do solo de Mosqueiro onde se identifica o material amarelado manchado por óxi-hidróxido de ferro (1,5m).

diferença de que a crosta sílico-ferruginosa não está fragmentada, formando uma crosta sã (Figura 6.1). Apresenta também textura porosa, constituída por grãos de quartzo cimentados por hematita, goethita e caolinita (Figura 6.3). Sobre essa crosta, e em contato abrupto, assenta-se o horizonte de solo, formado na sua base por um material areno-argiloso cinzento. É constituído por caolinita e quartzo, manchado por óxi-hidróxidos de Fe (Figura 6.4 e 6.5), assemelhando-se ao mosqueamento de horizontes argilosos sotopestos à crostas lateríticas similares (COSTA, 1988 e COSTA et al. 1991a). Essas manchas tornam-se difusas em direção ao topo do perfil, com o conjunto adquirindo uma tonalidade amarelada que passa a acizentado devido à maior presença de matéria orgânica, de modo semelhante ao perfil de Outeiro.

Em Outeiro, a passagem gradual da crosta parcialmente desagregada para a desagregada e solo, além da semelhança entre seus fragmentos e a crosta sã de Mosqueiro, permitem associar estes perfis aos anteriores aqui estudados, apresentando os horizontes denominações similares, embora derivados de crosta imatura. A crosta sã representa a rocha-mãe do perfil, sendo o solo o produto final.

6.2 CARACTERÍSTICAS MICROMORFOLÓGICAS

6.2.1 - Crosta Sã (Perfil de Mosqueiro)

A crosta sã é constituída por grãos de quartzo subarredondados a angulosos, corroídos e fraturados, cimentados por um plasma ferruginoso marrom-avermelhado, por vezes preto

(Figura 6.6), formado por hematita, goethita e caolinita. Localmente ocorre plasma goethítico fibro-radial, vermelho-alaranjado, formando finas faixas concêntricas.

6.2.2 - Crosta Parcialmente Intemperizada (Perfil de Outeiro)

Os relictos de estrutura colunar têm as mesmas características texturais e mineralógicas da crosta sã (Figura 6.7). A matriz areno-argilosa é homogênea, criptocristalina, constituída por caolinita, goethita e hematita, com grãos de quartzo corroídos.

6.2.3 - Crosta Intemperizada (Perfil de Outeiro)

Os relictos, com diâmetro inferior a 5cm, apresentam forma subarredondada, completamente imersos na matriz areno-argilosa. São formados por grãos de quartzo cimentados por um plasma ferruginoso marrom-avermelhado a preto, tal como na crosta sã. A matriz areno-argilosa é similar a do horizonte sotoposto.

6.2.4 - Solo

Os solos nos dois perfis são formados por um plasma areno-argiloso amarelado, de textura microagregada, onde se encontram grãos de quartzo corroídos e fraturados, manchados por óxi-hidróxios de ferro.

6.2.5 - Sequência de Alteração da Crosta Sã até os Solos

O desmantelamento da crosta de Outeiro, a individualização de relictos, que diminuem de tamanho em direção ao solo à medida que aumenta a proporção da matriz areno-argilosa (Figura 6.7), e

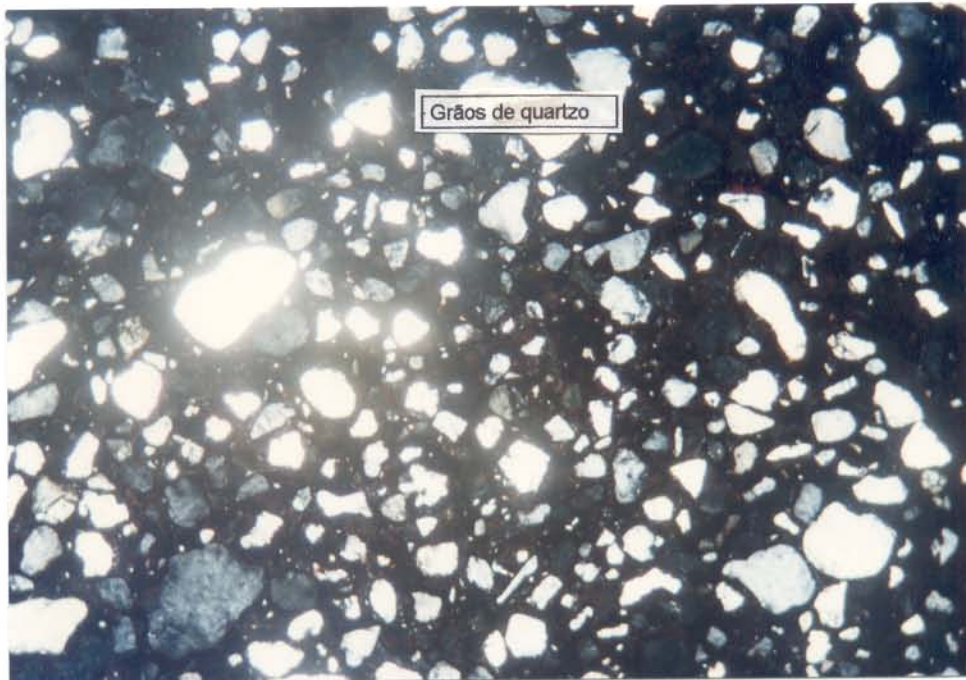


Figura 6.6: Crosta sã de Mosqueiro constituída por grãos de quartzo sub-arredondados a angulosos cimentados por plasma ferruginoso preto. $1\text{cm}=0,7\text{mm}$.

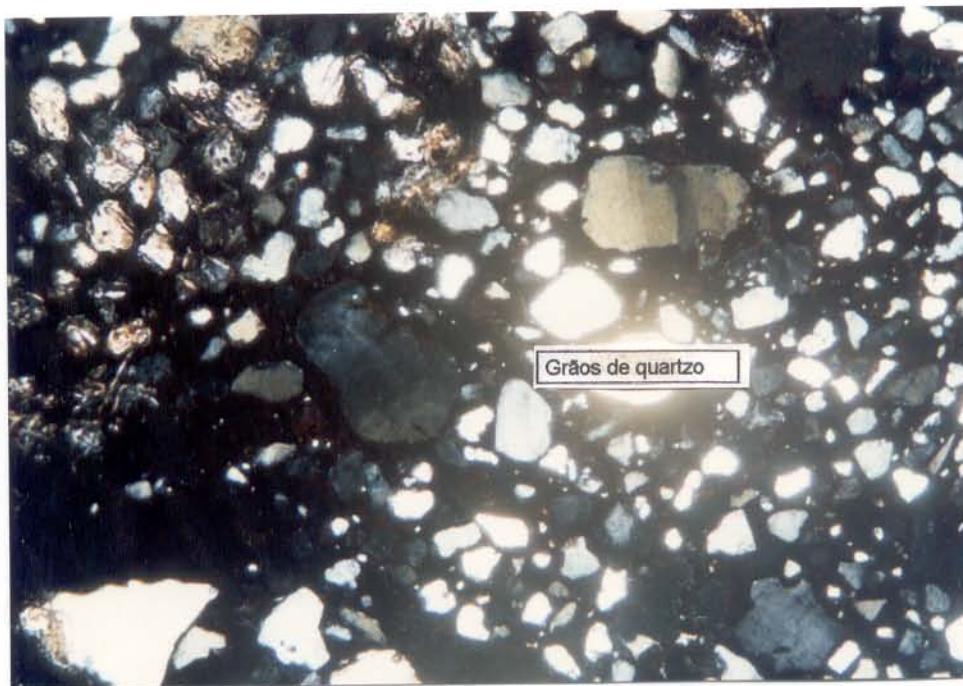


Figura 6.7: Relictos da crosta parcialmente intemperizada de Outeiro formados por grãos de quartzo cimentados por plasma ferruginoso preto. $1\text{cm}=0,7\text{mm}$.

apesar do contato abrupto da crosta com o solo em Mosqueiro, permite, com base nas características texturais e mineralógicas preliminares, correlacionar estes perfis aos de N5, Igarapé Bahia e Camoá. Apenas a matriz e os solos são mais arenosos, em decorrência da maior abundância de quartzo de granulometria média, e por serem menos ferruginosos.

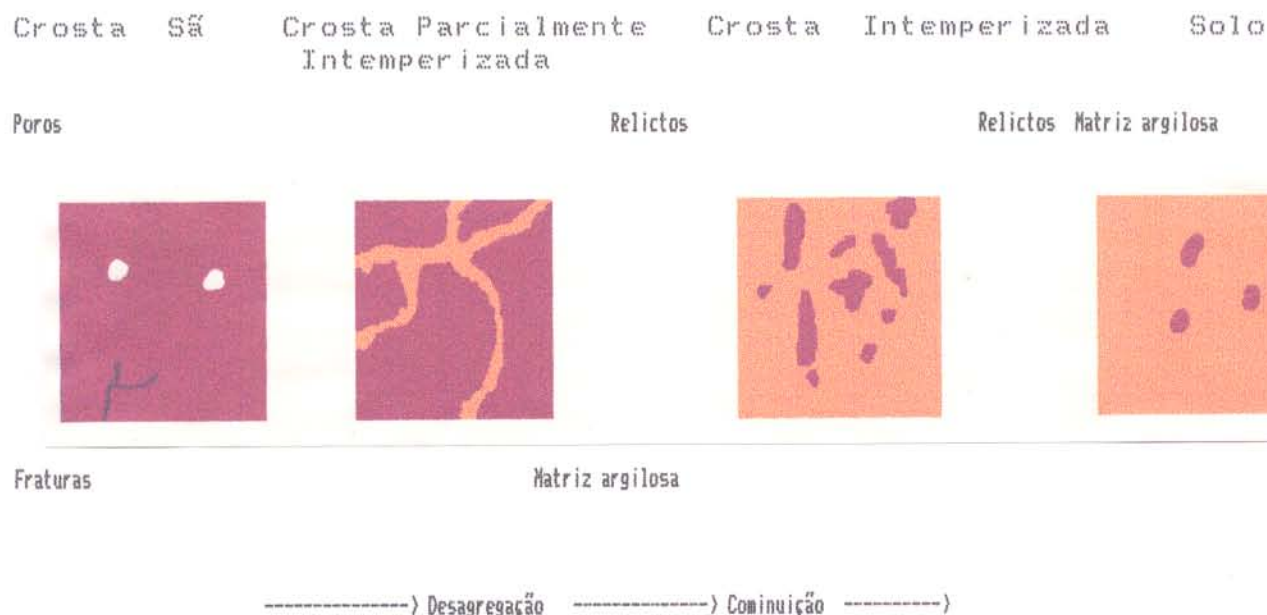


Figura 6.8: Sequência esquemática de intemperismo da crosta em direção ao solo em Outeiro e Mosqueiro, com base na estruturação do perfil e nos aspectos micromorfológicos

6.3 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

Os perfis de alteração das crostas sílico-ferruginosas de Outeiro e Mosqueiro tem uma composição mineralógica essencialmente a base de quartzo, caolinita, hematita e goethita, além de traços de anatásio. A matriz areno-argilosa e os solos contém principalmente quartzo e caolinita, enquanto as crostas e seus relictos são formados por quartzo, caolinita e hematita+goethita (Tabela 6.1).

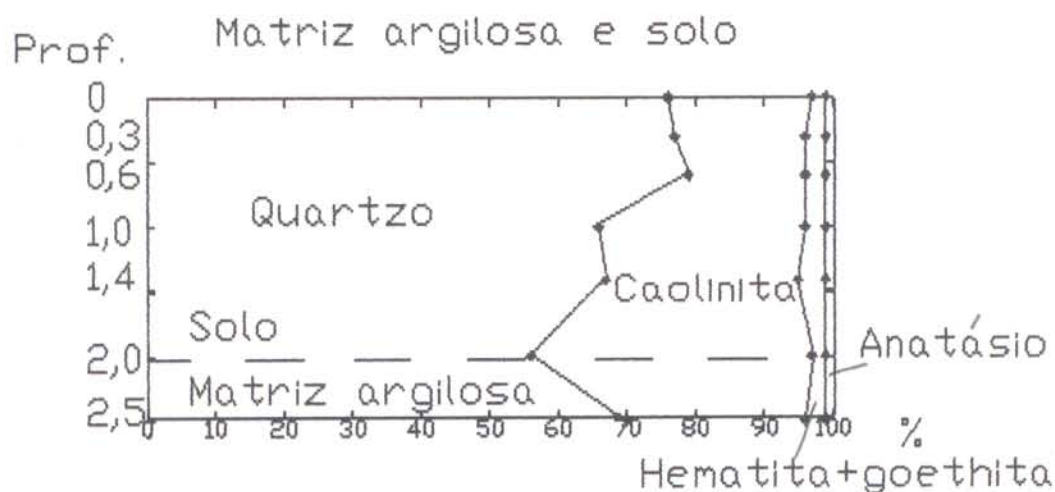
Tabela 6.1: Composição mineralógica dos perfis de Outeiro e Mosqueiro (% em peso).

HORIZONTE	Quartzo	Caolinita	Hematita+Goethita	Anatásio
PERFIL DE OUTEIRO				
SOLO CINZA	76	21	2	(1
SOLO AMARELO(0,3m)	76	20	2	1
(0,6m)	78	18	2	1
(1,0m)	65	31	2	1
(1,4m)	66	29	3	1
CROSTA INTENPERIZADA(2,0m)				
Matriz argilosa(a)	57	40	2	(1
Relicto da crosta(a)	61	18	19	1
CROSTA PARCIALMENTE INTENPERIZADA(2,5m)				
Matriz argilosa(b)	70	26	2	1
Relicto da crosta(b)	60	12	26	1
PERFIL DE MOSQUEIRO				
SOLO CINZA	74	22	2	1
SOLO AMARELO(0,60m)	67	25	6	1
(0,80m)	49	44	5	1
(1,15m)	49	43	6	1
(1,50m)	44	45	9	1
(2,30m)	52	43	4	(1
CROSTA Sã (2,80m)	42	27	20	(1

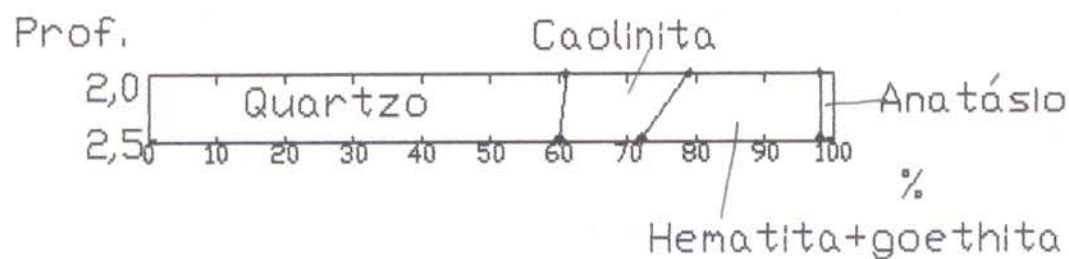
Ao longo dos dois perfis (Figura 6.9), da base para o topo, observa-se a diminuição dos teores de hematita+goethita e o aumento de quartzo. A caolinita aumenta da crosta sã e relictos para a matriz argilosa e diminui desta para os solos amarelos e ainda mais para os solos cinza (Figura 6.9). O teor de anatásio praticamente não varia e a gibbsita está ausente.

Da mesma forma que no intemperismo das crostas dos perfis maduros, na alteração dos perfis imaturos de Mosqueiro e Outeiro os relictos são mineralogicamente similares à crosta subjacente, enquanto a matriz argilosa assemelha-se aos solos. A grande

PERFIL DE DUTEIRO



Relictos



PERFIL DE MOSQUEIRO

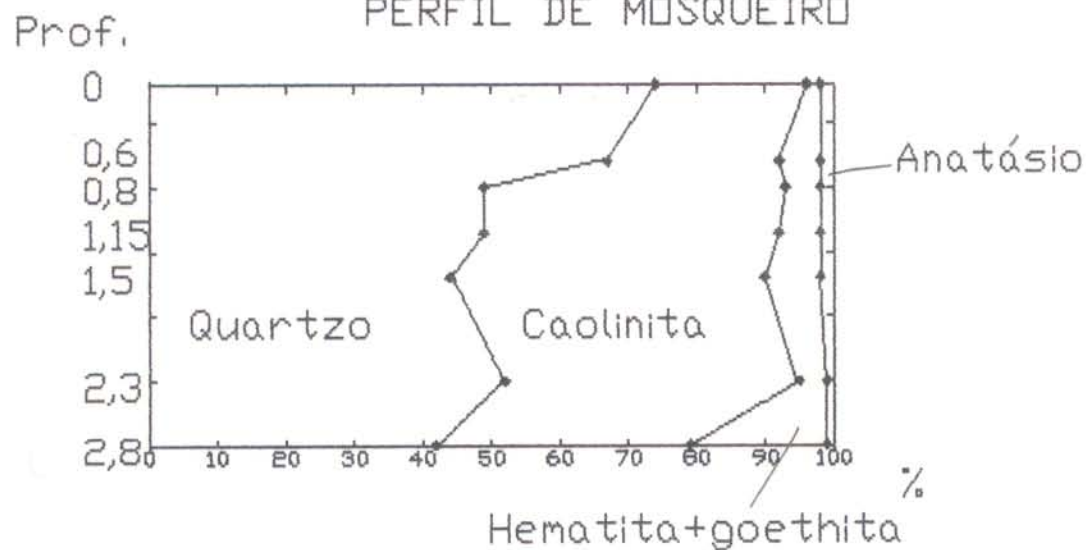


Figura 6.9: Composição mineralógica dos perfis de Duteiro e Mosqueiro

abundância de quartzo, tanto nas crostas, relictos, matrizes argilosas e solos mostra a interrelação entre os solos e as crostas subjacentes. Nos solos cinza a diminuição no teor de caolinita e aumento de quartzo em relação ao amarelo indica um processo de podzolização superficial. O mesmo processo foi observado por LUCAS (1988) em perfis lateríticos na região de Manaus, onde a estrutura microagregada do solo amarelo é destruída, gerando um solo arenoso e friável.

Nos perfis de Outeiro e Mosqueiro a alteração da crosta leva a um aumento nas concentrações de quartzo e caolinita e diminuição de hematita+goethita (Figura 6.10) que, portanto, se correlacionam negativamente.

6.3.1 - Conteúdo de Alumínio nas Goethitas

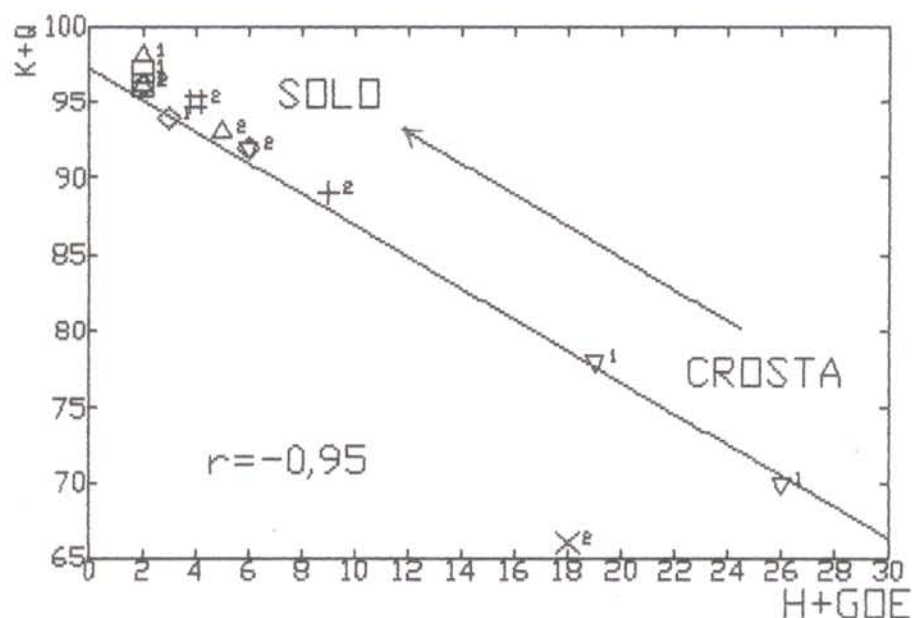
A determinação do teor de $AlOOH$ em goethitas só foi possível em amostras da crosta sã e dos relictos do perfil de Outeiro, já que a goethita apresenta concentrações muito baixas na matriz areno-argilosa e no solo, dificultando a identificação das reflexões específicas para determinação do teor de $AlOOH$.

A goethita da crosta contém 11 moles % de $AlOOH$, que é praticamente o mesmo teor dos relictos (9 moles % de $AlOOH$). Essa é mais uma evidência que demonstra a origem dos relictos a partir da crosta. Esses teores são similares aos obtidos na crosta de N5 e do Igarapé Bahia.

6.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

6.4.1 - Composição Química Geral

Os perfis de Outeiro e Mosqueiro são compostos



1 - Perfil de Duteiro

2 - Perfil de Mosqueiro

□ SOLO CINZA
 ◇ SOLO AMARELO
 △ MATRIZ ARGILOSA
 ▽ RELICTO DA CROSTA

□ SOLO CINZA
 ◇ SOLO AMARELO (0,6m)
 △ SOLO AMARELO (0,8m)
 ▽ SOLO AMARELO (1,15m)
 + SOLO AMARELO (1,5m)
 # SOLO AMARELO (2,3m)
 X CROSTA SÃ

Figura 6.10: Correlação hematita+goethita(H+GOE) e caolinita+quartzito (K+Q) nos perfis de Duteiro e Mosqueiro

principalmente por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , que incluindo a PF, corresponde a 98% do total (Tabela 6.2).

Tabela 6.2: Composição química dos perfis de Outeiro e Mosqueiro (% em peso).

HORIZONTE	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3 _T	FeO	TiO ₂	PF	TOTAL
PERFIL OUTEIRO							
SOLO CINZA	84,48	8,42	1,81	0,21	0,37	4,39	99,47
SOLO AMARELO(0,3m)	85,01	8,02	1,93	0,32	1,03	3,66	99,65
(0,6m)	88,25	7,32	2,03	0,21	0,98	3,30	101,88
(1,0m)	81,40	12,26	2,00	0,36	1,23	4,92	101,81
(1,4m)	76,77	11,33	3,43	0,25	1,28	5,76	98,57
CROSTA INTEMPERIZADA(2.0m)							
Matriz argilosa	75,84	16,22	1,91	0,07	0,34	5,32	99,63
Relicto da crosta	65,83	7,36	19,32	0,28	1,40	4,72	98,63
CROSTA PARCIALMENTE INTEMPERIZADA(2.5m)							
Matriz argilosa	83,15	10,20	1,91	0,07	0,71	2,94	98,91
Relicto da crosta	64,75	4,97	26,38	0,21	0,71	2,94	99,75
PERFIL DE MOSQUEIRO							
SOLO CINZA	83,65	8,68	2,43	0,21	0,68	4,92	100,36
SOLO AMARELO (0,60m)	80,15	10,16	5,74	0,07	0,59	5,10	101,74
(0,80m)	68,66	17,26	5,36	0,14	0,73	6,90	98,91
(1,15m)	68,85	16,94	5,67	0,14	0,56	6,56	98,58
(1,50m)	64,57	17,81	8,58	0,07	0,62	6,96	98,54
(2,30m)	71,40	16,82	4,14	0,14	0,46	5,68	98,50
CROSTA Sã (2,80m)	53,14	9,36	31,10	0,07	0,30	4,83	98,73

T= teor total

(0,1m) profundidade em relação ao topo do perfil

Ao contrário dos demais perfis estudados os de Outeiro e Mosqueiro se caracterizam pelos teores muito mais elevados de SiO_2 (53% a 88%), que aumentam da crosta para as matrizes argilosas e solos. Por outro lado, os teores de Al_2O_3 , que também aumentam dos relictos e da crosta para a matriz argilosa, decrescem desta para os solos, refletindo a distribuição da caolinita. Os teores de Fe_2O_3 e TiO_2 , relacionados à

hematita+goethita e anatásio, respectivamente, diminuem da crosta para a matriz argilosa e para os solos (Figura 6.11).

A crosta sílico-ferruginosa sã de Mosqueiro e os relictos de crosta idêntica de Outeiro apresentam composições químicas (Tabela 6.2) e padrões das curvas semelhantes (Figura 6.12), reforçando a origem dos relictos a partir das crostas. A matriz areno-argilosa e o solo dos dois perfis também são quimicamente semelhantes entre si (Tabela 6.2 e Figura 6.12).

A figura 6.13 mostra que a transformação da crosta até os solos se dá com a sua desferrificação, acompanhada de acúmulo de SiO_2 (quartzo e caolinita) e empobrecimento em Al_2O_3 . A desferrificação da crosta para o solo, embora não linear, ressalta a correlação negativa com a SiO_2 (Figura 6.14). Os teores mais elevados em SiO_2 são consequência do acúmulo de quartzo de granulação grossa na crosta, que dificulta a sua dissolução.

Os dados obtidos mostram, portanto, que o intemperismo se dá com perda de Fe_2O_3 e Al_2O_3 e acúmulo de SiO_2 , de modo análogo ao observado na evolução de perfis similares na África (LECOMTE, 1988; COLIN & LECOMTE, 1988; LECOMTE & COLIN, 1989) e em Manaus (LUCAS, 1988). Essa transformação diferencia-se da ocorrente em N5 e Igarapé Bahia, pelos teores mais baixos em Fe_2O_3 e mais elevados em SiO_2 , gerando solos amarelados ao invés de avermelhados.

6.4.2 - Elementos-traço

Apenas o V, B, Zr e Y atingem valores acima da média crustal, os demais estão abaixo desta média. As crostas e seus

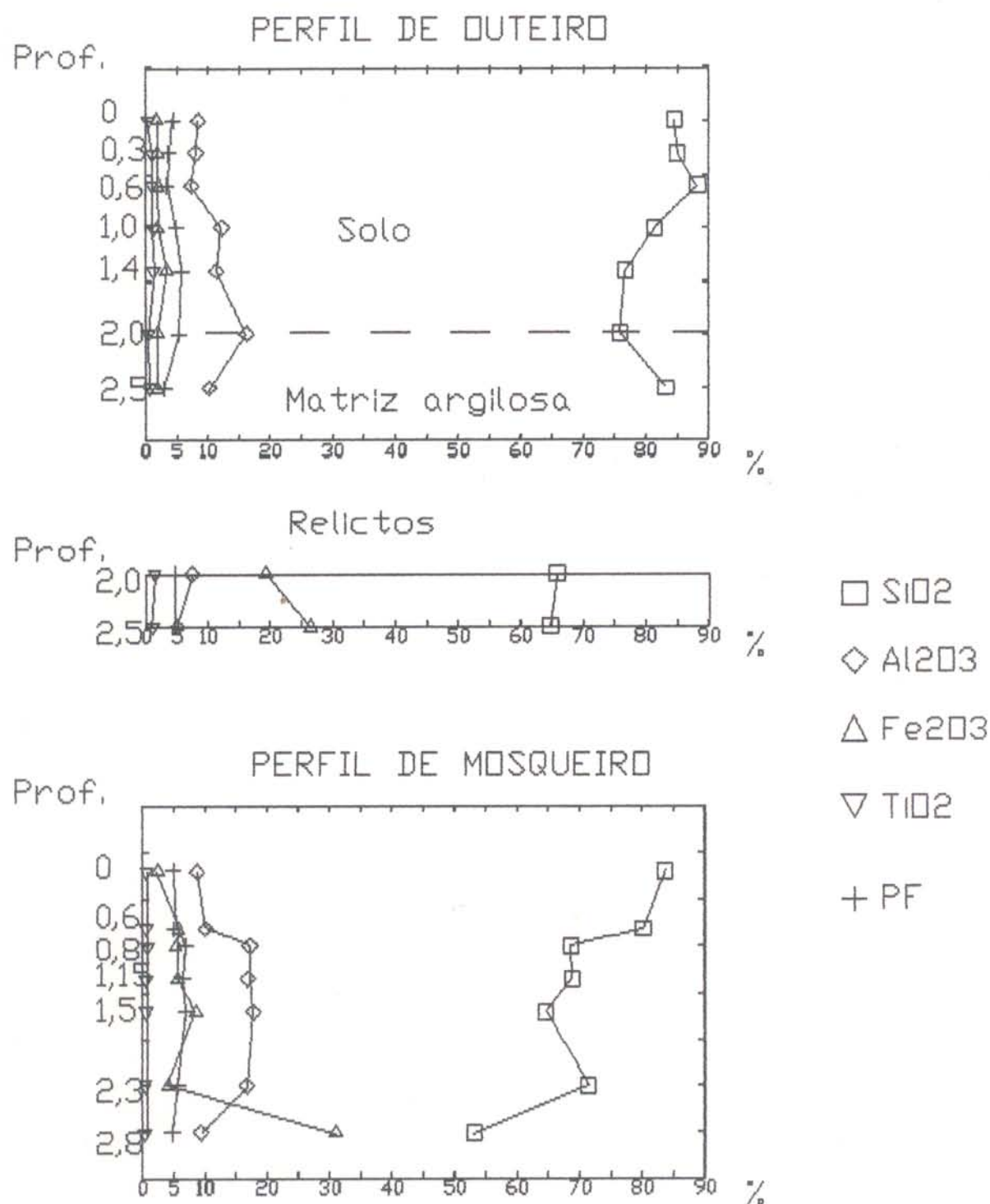
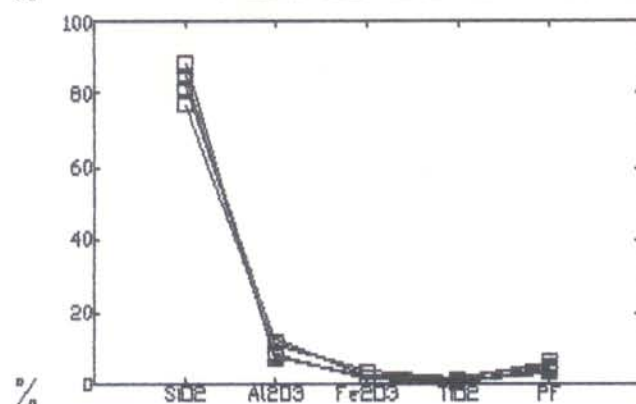
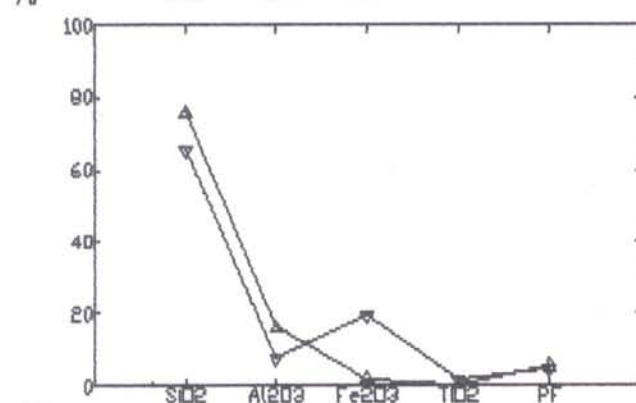


Figura 6.11: Distribuição da composição química por horizontes nos perfis de Duteiro e Mosqueiro

PERFIL DE DUTEIRO



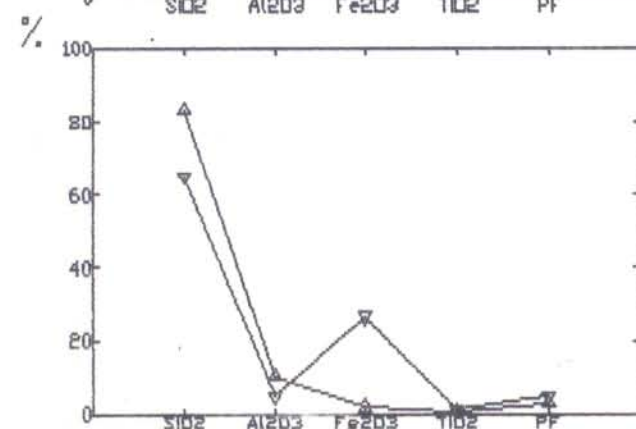
SOLO



CROSTA INTEMPERIZADA

△ Matriz argilosa

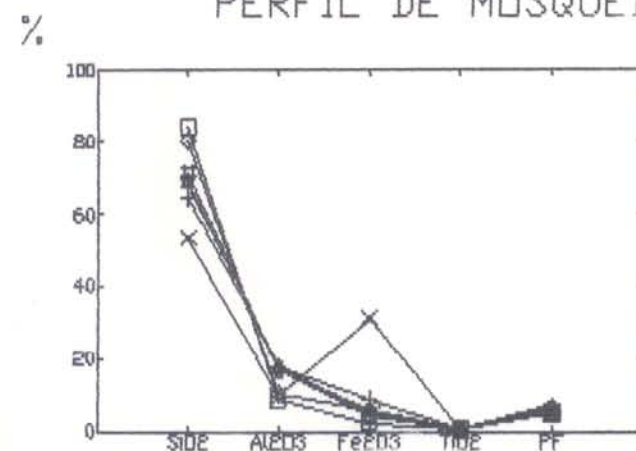
▽ Relicto

CROSTA PARCIALMENTE
INTEMPERIZADA

△ Matriz argilosa

▽ Relicto

PERFIL DE MOSQUEIRO



□ SOLO CINZA

◇ SOLO AMARELO (0,6m)

△ SOLO AMARELO (0,8m)

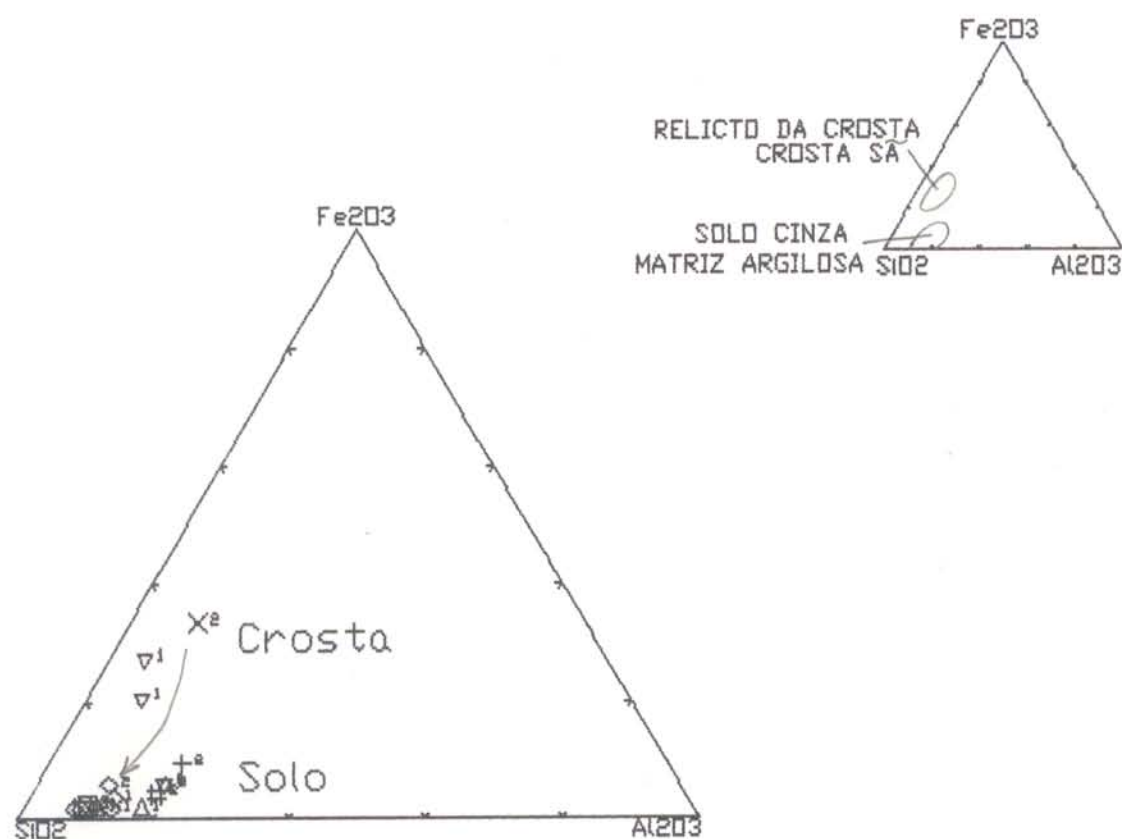
▽ SOLO AMARELO (1,15m)

+ SOLO AMARELO (1,5m)

SOLO AMARELO (2,3m)

X CROSTA SÃ

Figura 6.12: Distribuição da composição química dos perfis de Duteiro e Mosqueiro



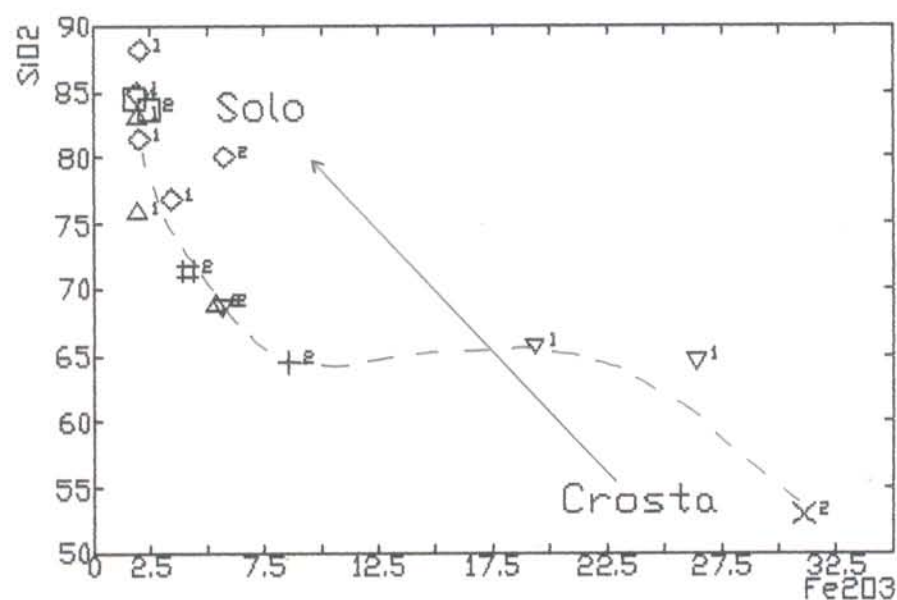
1 - PERFIL DE DUTEIRO

- SOLO CINZA
- ◇ SOLO AMARELO
- △ MATRIZ ARGILOSA
- ▽ RELICTO DA CROSTA

2 - PERFIL DE MOSQUEIRO

- SOLO CINZA
- ◇ SOLO AMARELO (0,6m)
- △ SOLO AMARELO (0,8m)
- ▽ SOLO AMARELO (1,15m)
- + SOLO AMARELO (1,5m)
- # SOLO AMARELO (2,3m)
- X CROSTA SÃ

Figura 6.13: Diagrama $SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3$ dos perfis de Duteiro e Mosqueiro



1 - PERFIL DE DUTEIRO

2 - PERFIL DE MOSQUEIRO

□ SOLO CINZA
 ◇ SOLO AMARELO
 △ MATRIZ ARGILOSA
 ▽ RELICTO DA CROSTA

□ SOLO CINZA
 ◇ SOLO AMARELO (0,6m)
 △ SOLO AMARELO (0,8m)
 ▽ SOLO AMARELO (1,15m)
 + SOLO AMARELO (1,5m)
 # SOLO AMARELO (2,3m)
 X CROSTA SÁ

Figura 6.14: Correlação Fe_2O_3 e SiO_2 nos perfis de Duteiro e Mosqueiro

relictos contém os teores mais elevados de V, Cr e Pb, enquanto o Zr, B e Mn concentram-se na matriz argilosa e solos.

Tabela 6.3: Concentração dos elementos-traço nos perfis de Outeiro e Mosqueiro (ppm).

HORIZONTE	V	Cr	Ni	B	Mo	Zr	Ga	Y	Sc	Nb	Cu	Pb
PERFIL DE OUTEIRO												
SOLO CINZA	44	49	18	120	<5	1640	15	18	5	75	7	46
SOLO AMARELO(0,3m)	70	30	8	66	<5	142	16	18	<5	37	2	22
(0,6m)	45	40	10	66	<5	114	18	10	<5	38	<2	22
(1,0m)	69	64	15	58	<5	116	22	48	<5	39	2	32
(1,4m)	86	96	16	64	<5	132	26	27	<5	34	3	48
CROSTA INTemperizada(2,0m)												
Matriz argilosa(a)	96	72	42	92	<5	1440	12	<10	19	100	11	<20
Relicto da crosta(a)	480	138	16	42	6	106	28	23	<5	29	3	54
CROSTA PARCIALMENTE INTemperizada(2,5m)												
Matriz argilosa(b)	148	51	24	92	<5	1240	8	66	7	90	7	<20
Relicto da crosta(b)	500	240	24	67	8	160	40	45	12	39	6	67
PERFIL DE MOSQUEIRO												
SOLO CINZA	182	42	<2	80	<5	1240	15	53	13	5	<2	<5
SOLO (0,60m)	330	39	4	56	<5	1600	16	71	15	12	2	9
(0,80m)	138	62	5	63	<5	800	22	66	16	11	6	17
(1,15m)	152	68	5	60	<5	880	18	62	16	7	33	18
(1,50m)	190	88	7	60	<5	560	20	60	18	4	2	26
(2,30m)	300	68	4	65	<5	640	19	56	14	3	<2	14
CROSTA Sã (2,80m)	1000	94	15	38	<5	164	22	38	20	9	4	39
MÉDIA CRUSTAL	135	100	75	10	1,5	165	15	33	22	900	55	33

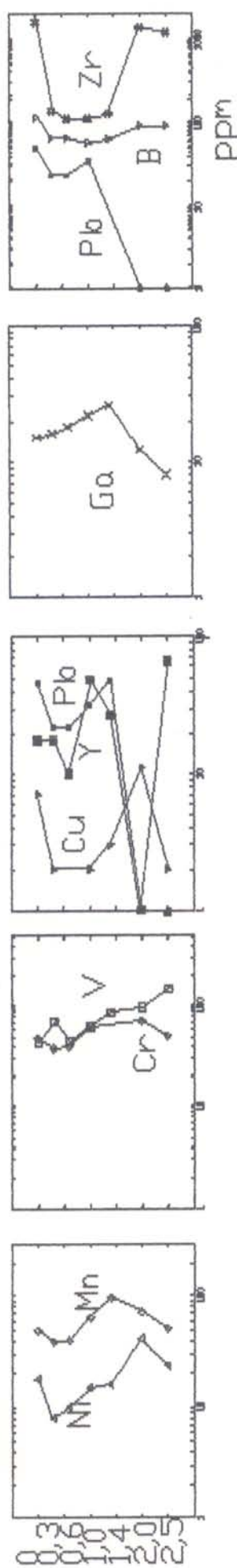
Não se observa diferença marcante entre os teores dos elementos-traço nos dois perfis, contudo a sua distribuição (Figura 6.15) mostra que:

1 - Zr, B e Mn aumentam de teor das crostas para os solos em um padrão similar a SiO₂ (Figura 6.15). Esses elementos alojam-se provavelmente na estrutura do zircão, turmalina, estauroлита, rutilo e andaluzita, acessórios comuns nas rochas sedimentares que deram origem à crosta dos perfis de Outeiro e Mosqueiro.

PERFIL DE DUTEIRO

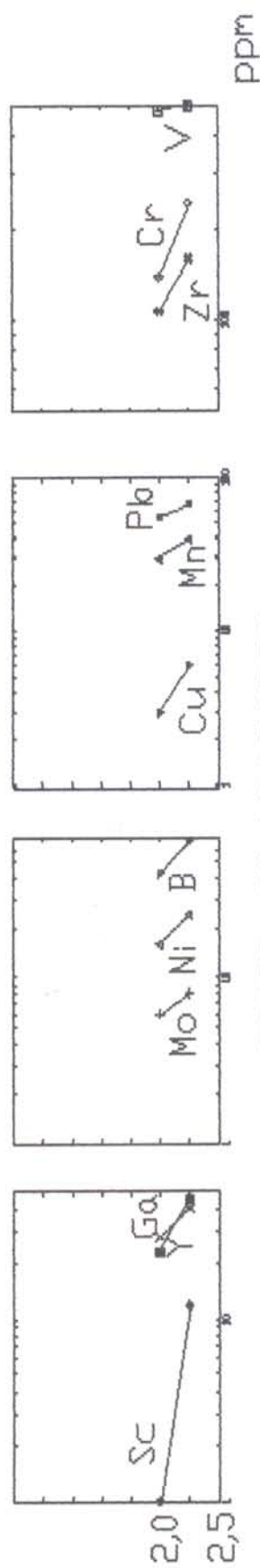
Matriz argilosa e solo

Prof.



Relictos

Prof.



PERFIL DE MOSQUEIRO

Prof.

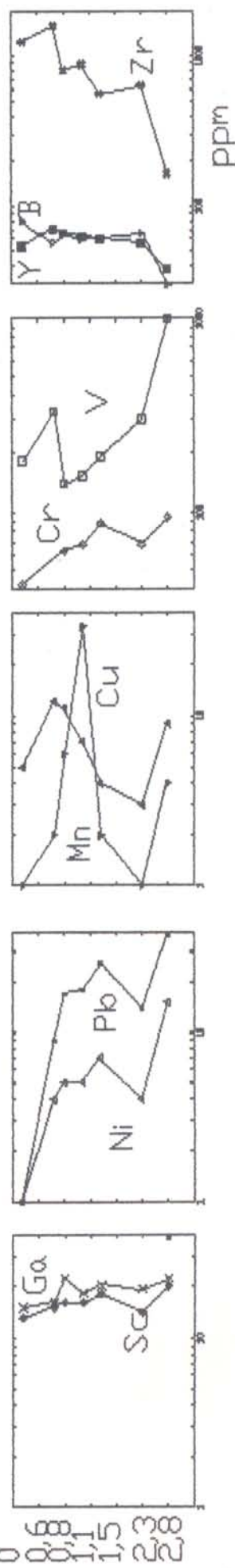


Figura 6.15: Distribuição dos elementos-traço nos horizontes dos perfis de Duteiro e Mosqueiro

2 - V, Cr, Ga, Sc e Pb, com teores em geral mais elevados na crosta sã e nos relictos, diminuem para a matriz areno-argilosa e o solo e, portanto, correlacionáveis ao Fe₂O₃ (Figura 6.11), indicando possível substituição isomórfica na estrutura da goethita (GERTH, 1990) ou por oclusão.

Nota-se ainda que o Cr, Ni, Zr, Mn, Cu e Pb aumentam de teor do solo amarelo para o cinza, enquanto esses elementos, mais o Y e V, diminuem no perfil de Mosqueiro, apresentando, portanto, comportamentos diferenciados frente à podzolização.

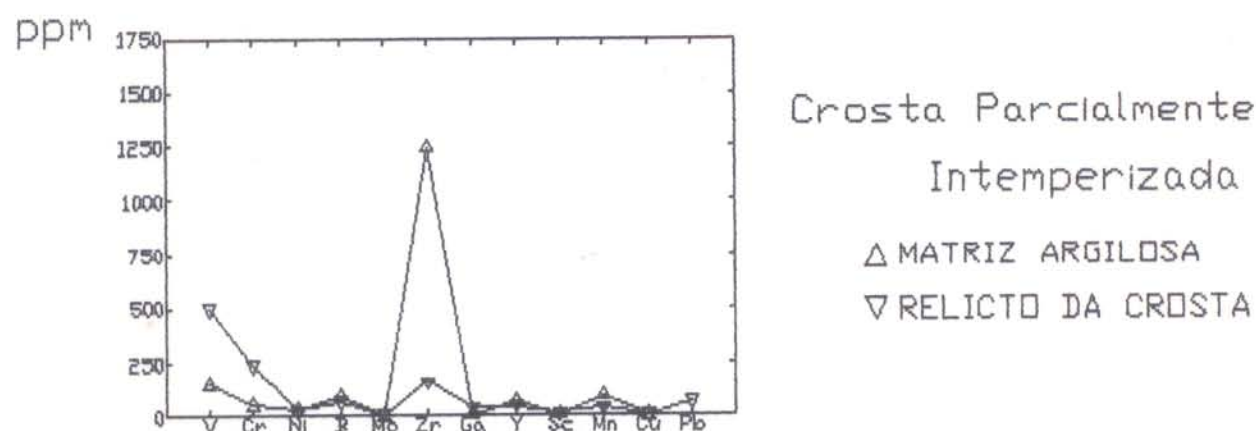
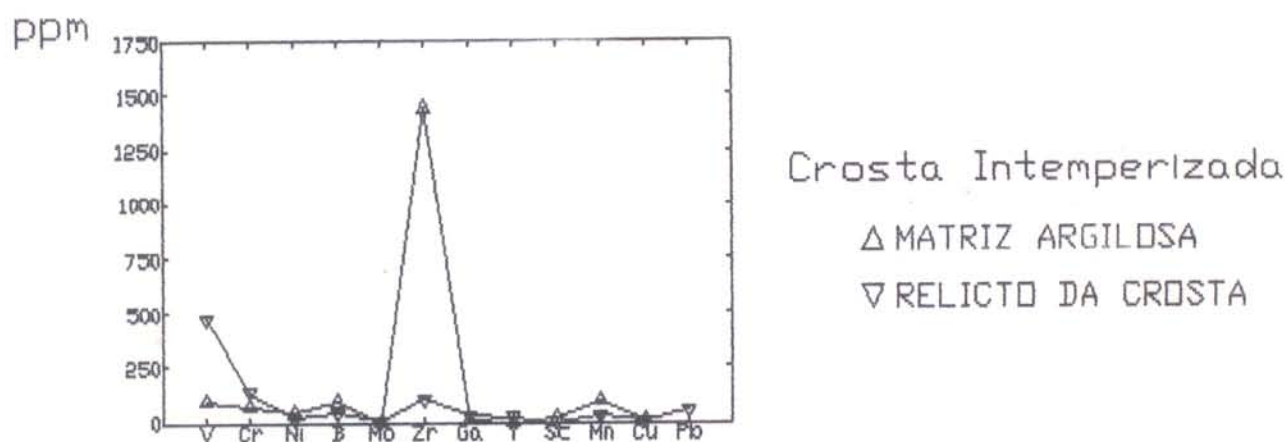
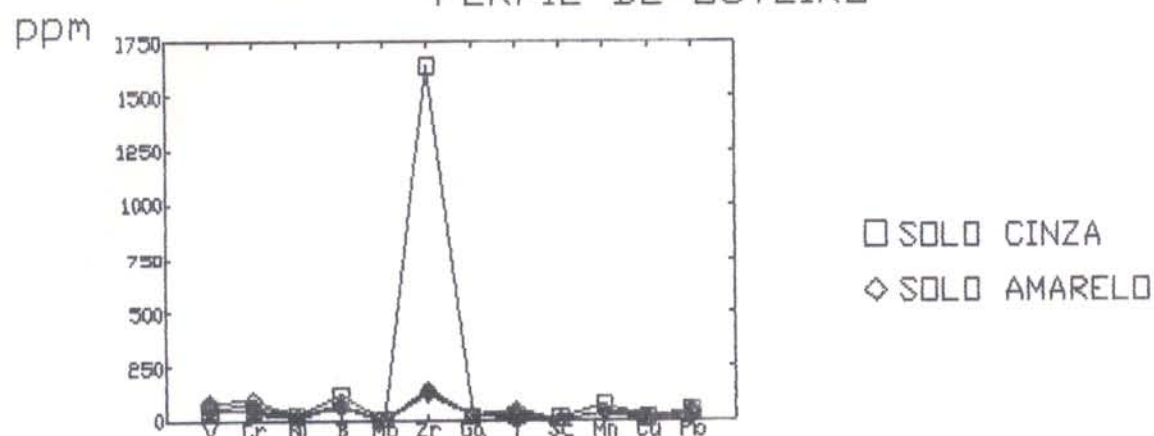
Quando comparadas as curvas da crosta sã e relictos com a matriz argilosa e solo, nos dois perfis, tem-se um padrão contrastante entre elas (Figura 6.16), somente nos teores mais elevados em V e Cr na crosta e relictos e de Zr na matriz argilosa e solo. Esse padrão se repete quando comparadas entre si as manchas vermelhas, brancas e amarelas (Figura 6.17) encontradas na base do horizonte de solo Mosqueiro. Assim é possível associar as manchas vermelhas, com teores mais baixos de V e Cr, a restos da crosta e as brancas e amarelas, com concentração mais elevadas em Zr, ao solo. As manchas são resultantes do mosqueamento da base do solo.

Há portanto uma diluição dos teores de V, Cr, Ga, Sc e Pb, relacionados à hematita e Fe₂O₃ e, portanto, à crosta sã e relictos, e uma concentração de Zr, B e Mn no solo, de modo similar ao observado em N5 e Igarapé Bahia, como mostram os diagramas da figura 6.18.

6.4.2.1 - Elementos Terras Raras

Os ETR nos perfis de Outeiro e Mosqueiro (Tabela 6.4)

PERFIL DE DUTEIRO



PERFIL DE MOSQUEIRO

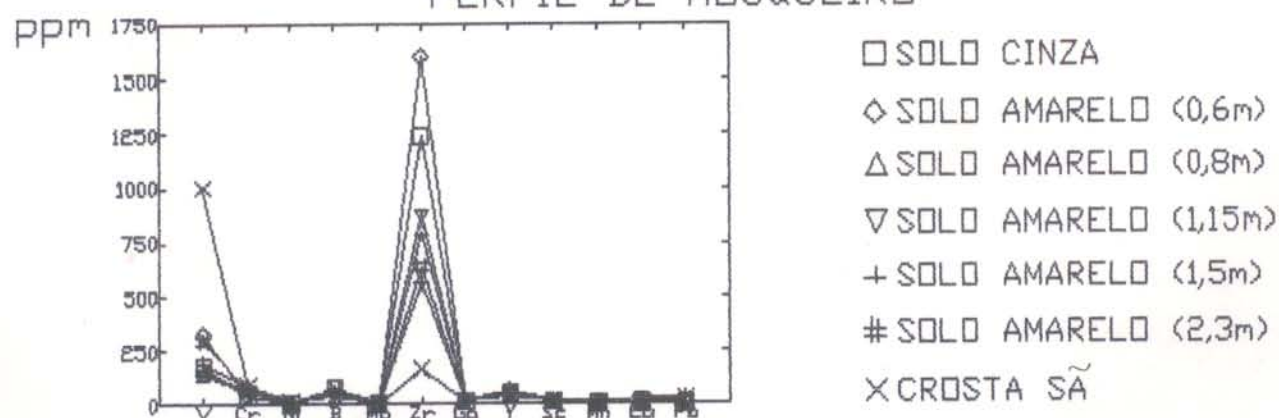


Figura 6.16: Distribuição dos elementos-traço nos perfis de Duteiro e Mosqueiro

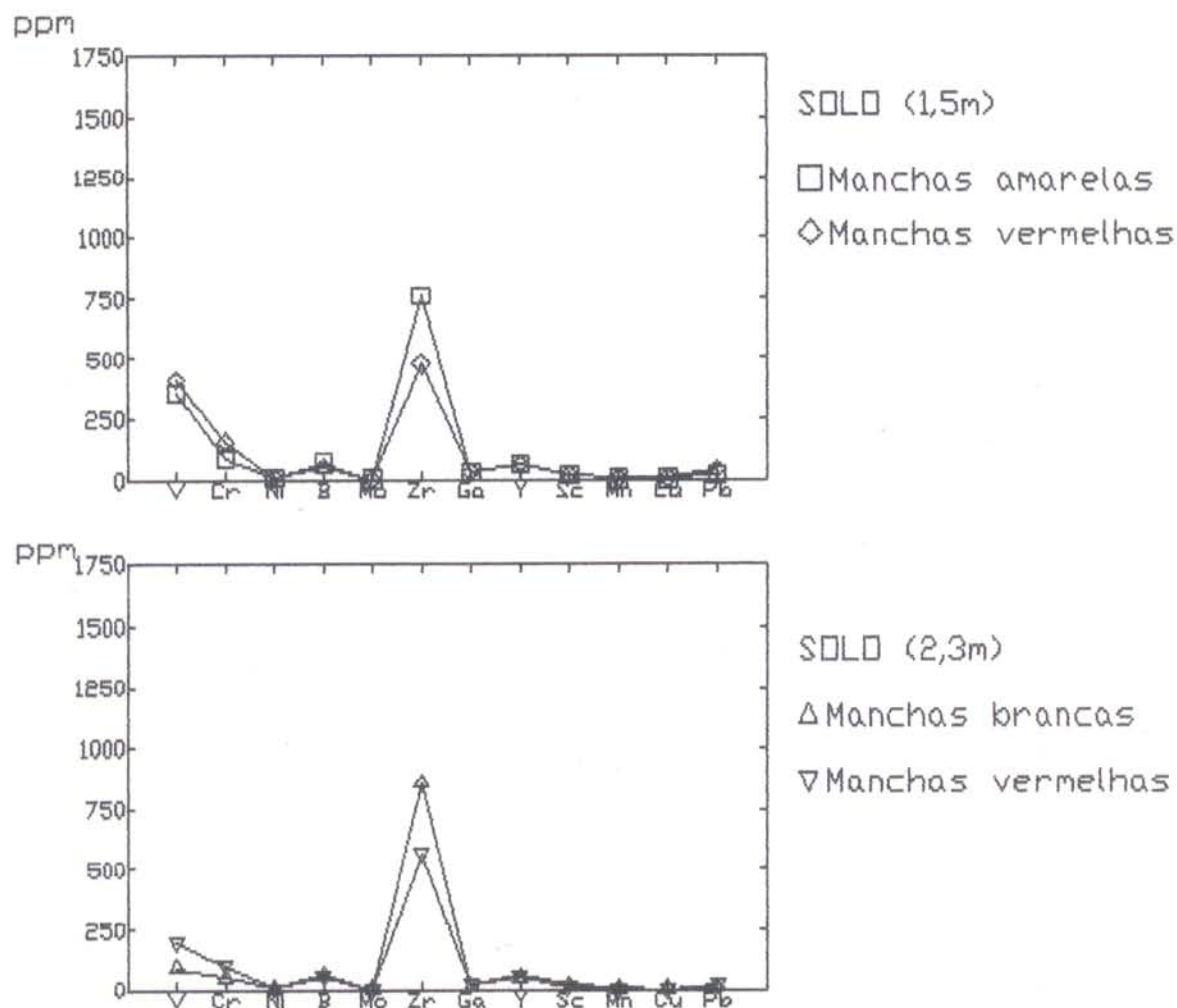
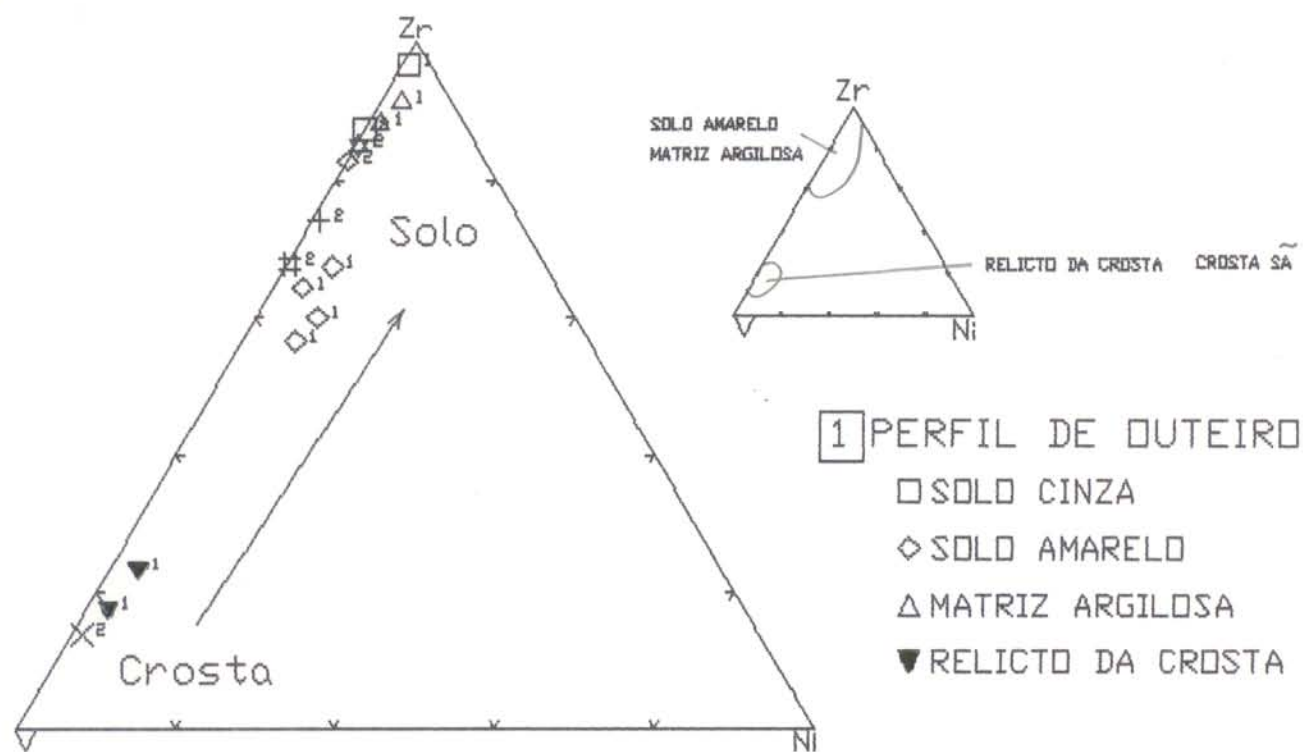
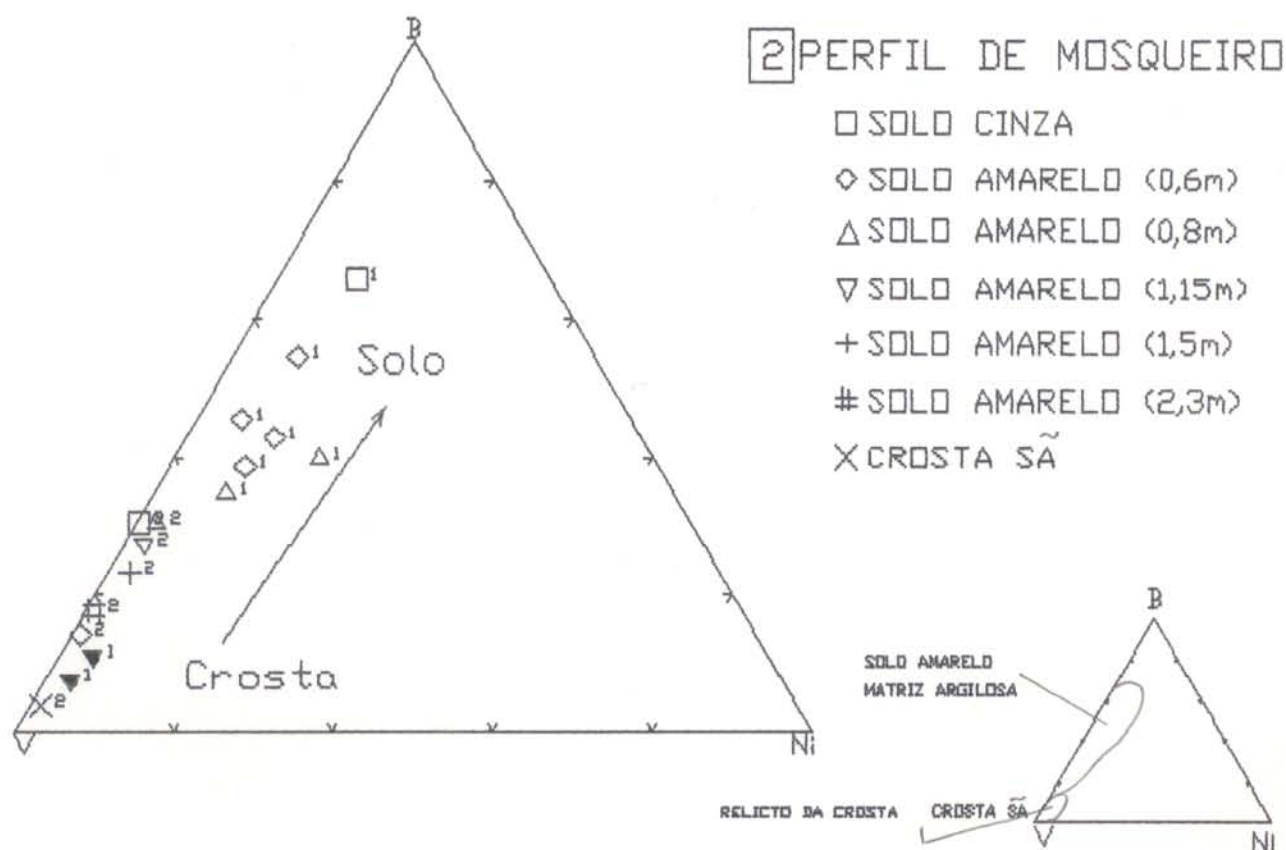


Figura 6.17: Distribuição dos elementos-traço nas manchas do solo de Mosqueiro



1 PERFIL DE DUTEIRO

- SOLO CINZA
- ◇ SOLO AMARELO
- △ MATRIZ ARGILOSA
- ▼ RELICTO DA CROSTA



2 PERFIL DE MOSQUEIRO

- SOLO CINZA
- ◇ SOLO AMARELO (0,6m)
- △ SOLO AMARELO (0,8m)
- ▽ SOLO AMARELO (1,15m)
- + SOLO AMARELO (1,5m)
- # SOLO AMARELO (2,3m)
- X CROSTA SA

Figura 6.18: Diagramas V-Ni-Zr e V-Ni-B nos perfis de Duteiro e Mosqueiro

apresentam-se com teores inferiores a média crustal. Como nos perfis anteriores, as concentrações dos ETRL são mais elevadas e dispersas que as dos ETRP.

Tabela 6.4: Concentração dos elementos terras raras nos perfis de Outeiro e Mosqueiro (em ppm)

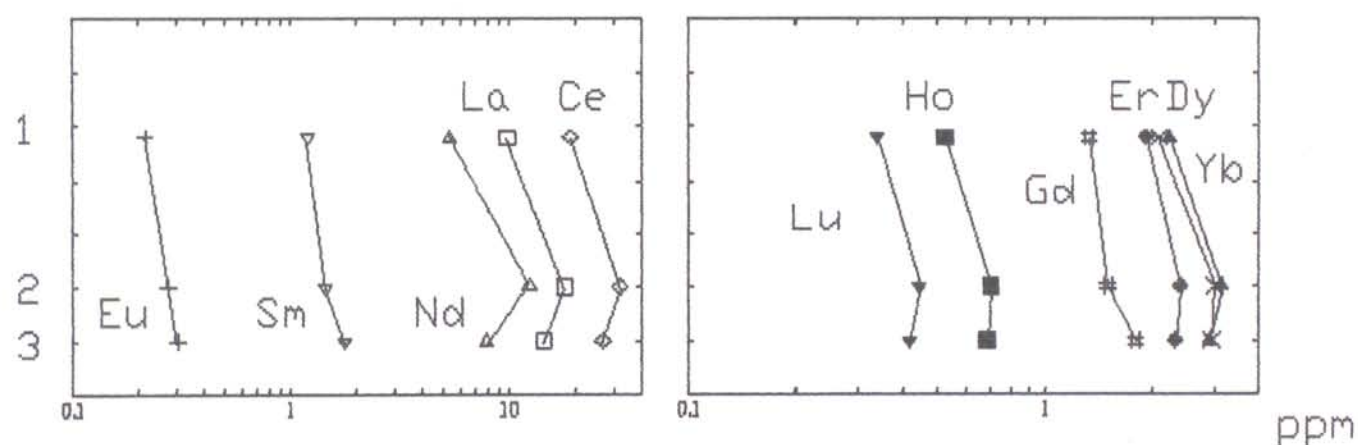
HORIZONTE	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Lan/Smn
PERFIL DE OUTEIRO												
SOLO AMARELO(0,6m)	9,76	18,84	5,34	1,20	0,22	1,33	2,10	0,52	1,93	2,25	0,34	5,14
CROSTA INTENPERIZADA(2,0m)												
Matriz argilosa	17,87	31,69	12,31	1,44	0,28	1,50	3,01	0,71	2,41	3,14	0,45	7,82
Relicto da crosta	14,31	26,52	7,89	1,77	0,31	1,80	2,95	0,69	2,34	2,92	0,42	5,08
PERFIL DE MOSQUEIRO												
SOLO CINZA	15,77	33,29	12,10	2,76	0,46	2,54	4,37	1,02	3,49	3,94	0,59	3,60
SOLO (0,80m)	26,33	50,32	18,25	3,77	0,60	2,90	3,88	0,92	3,20	3,27	0,48	4,40
(1,50m)	28,24	51,29	17,14	3,21	0,50	2,14	2,33	0,54	1,84	1,68	0,26	5,53
CROSTA Sã (2,80m)	10,88	20,56	6,76	1,27	0,22	0,92	0,92	0,21	0,73	0,65	0,13	5,40
MÉDIA CRUSTAL	30,00	60,00	28,00	6,00	1,20	5,40	3,00	1,20	2,80	3,00	0,50	

(0,1m) profundidade em relação ao topo do perfil

Ao longo do perfil de Outeiro os teores de todos os ETR diminuem do relicto para o solo amarelo, correlacionando-se ao Fe2O3 (Figura 6.11). Contudo o La, Ce, Nd, Dy, Er, e Yb apresentam teores mais elevados na matriz argilosa do que na crosta (Figura 6.19). Em Mosqueiro todos os ETR aumentam da crosta para o solo amarelo e diminuem deste para o solo cinza, assemelhando-se à distribuição do Al2O3 (Figura 6.11) e do Zr e B (Figura 6.15). O Ho, Yb e Lu, ao contrário, aumentam gradativamente até o solo cinza (Figura 6.19).

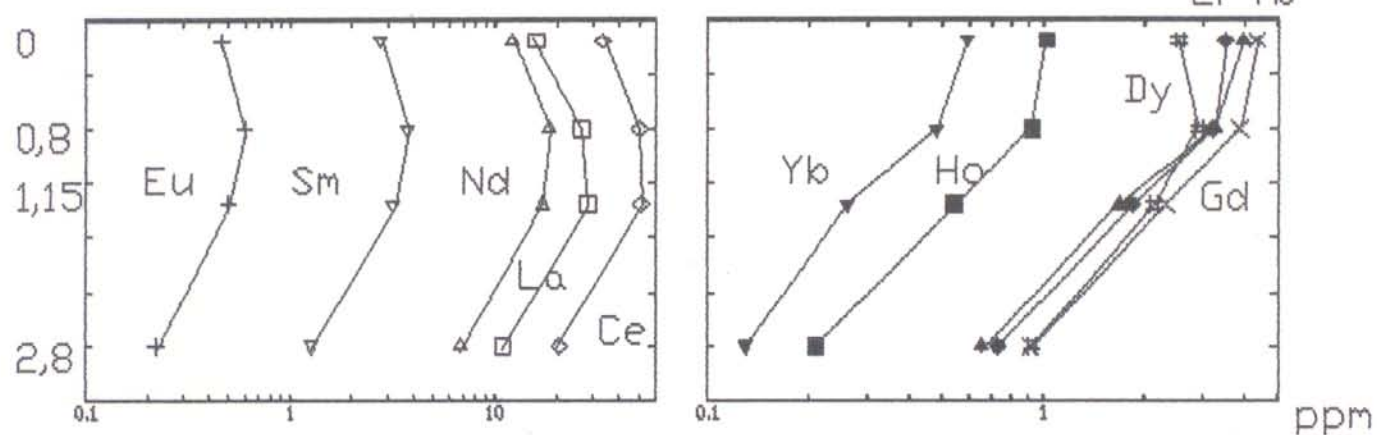
O paralelismo das curvas normalizadas, fracionamento entre os ETRL e os ETRP com depleção mais acentuada entre os ETRL (Lan/Smn - Tabela 6.4) e anomalia negativa em Eu (Figura 6.20),

PERFIL DE DUTEIRO



Prof.

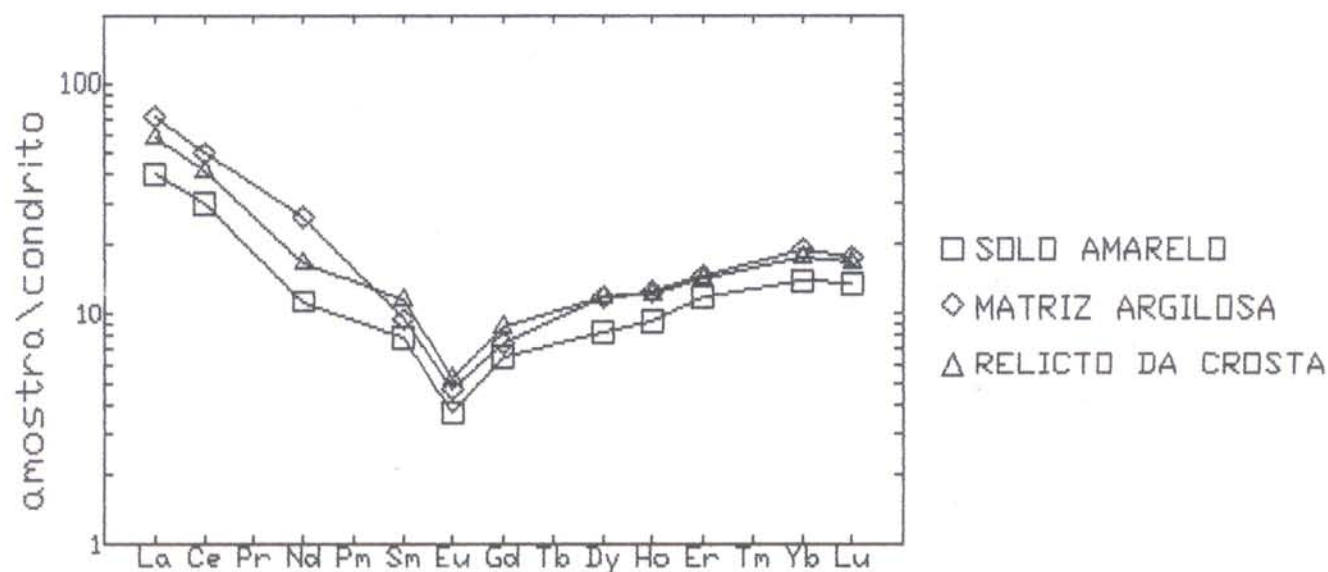
PERFIL DE MOSQUEIRO



- 1 - Solo amarelo (0,6m)
- 2 - Matriz argilosa (2,0m)
- 3 - Relicto da crosta intemperizada

Figura 6.19: Distribuição dos ETR por horizontes nos perfis de Duteiro e Mosqueiro

PERFIL DE DUTEIRO



PERFIL DE MOSQUEIRO

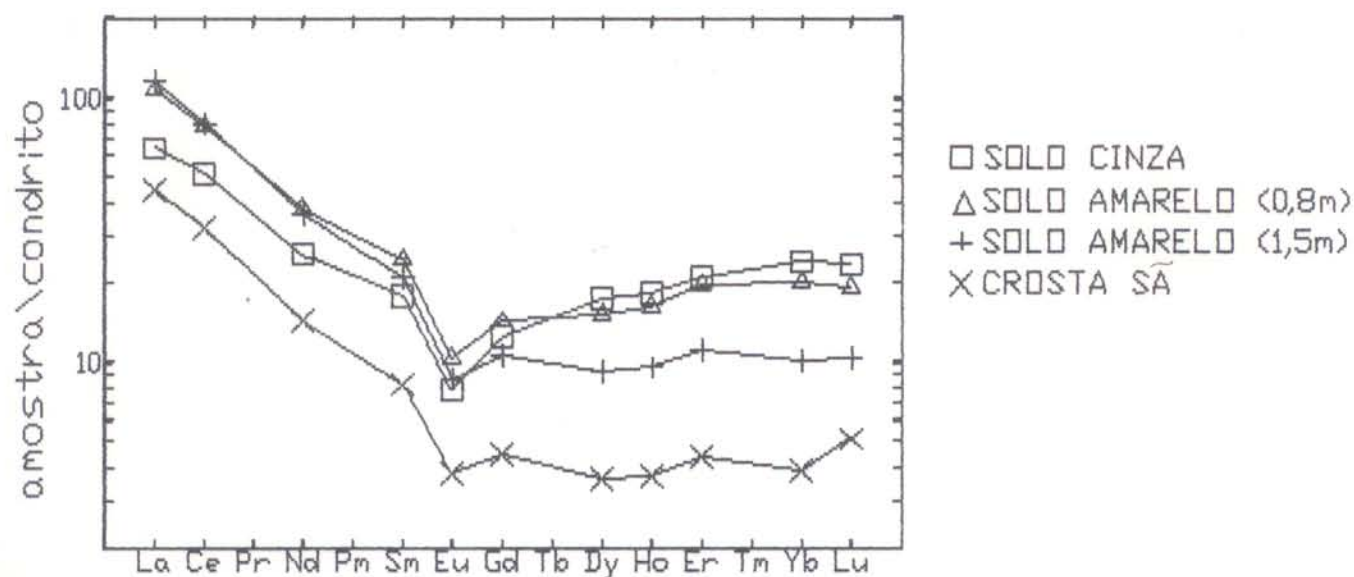


Figura 6.20: Normalização dos ETR em relação aos condritos nos perfis de Duteiro e Mosqueiro

indicam a afinidade química entre crosta, relictos, matriz argilosa e solo nos dois perfis, em um padrão similar ao de N5 e Camoáí.

A normalização da matriz areno-argilosa e solo, em relação ao relictos e crosta são, mostram padrões diferentes para os dois perfis (Figura 6.21). O de Outeiro tem desenvolvimento de anomalia positiva em Nd, de modo similar ao perfil de Camoáí, enquanto que no solo há depleção em relação ao relictos, não havendo fracionamento dos ETR. No perfil de Mosqueiro os ETRP apresentam padrão irregular, com depleção crescente dos ETRL em relação aos ETRP no topo do perfil, assemelhando-se ao perfil de N5 e Igarapé Bahia.

6.5 BALANÇO DE MASSA E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que no perfil de Outeiro os elementos se dividem em dois grupos (Tabela 6.5):

1- Fe total, V, Cr, Ni, Ga, Y, Cu, Pb e ETR são lixiviados em direção ao solo amarelo, representando a decomposição da hematita em consequência da cominuição das crostas. O Ni, Cu e Pb se enriquecem no solo cinza, indicando associação desses elementos com a matéria orgânica mais abundante nesse material;

2- Si, Al, B, Zr e Mn são enriquecidos formando a matriz areno-argilosa e o solo.

O perfil de Mosqueiro mostra lixiviação de todos os elementos, exceto o Zr (Tabela 6.5), o que correlaciona este perfil ao do Igarapé Bahia e o diferencia do perfil de Outeiro, correlacionável ao perfil de N5. A incoerência entre os padrões dos dois perfis está relacionada à variação na composição das

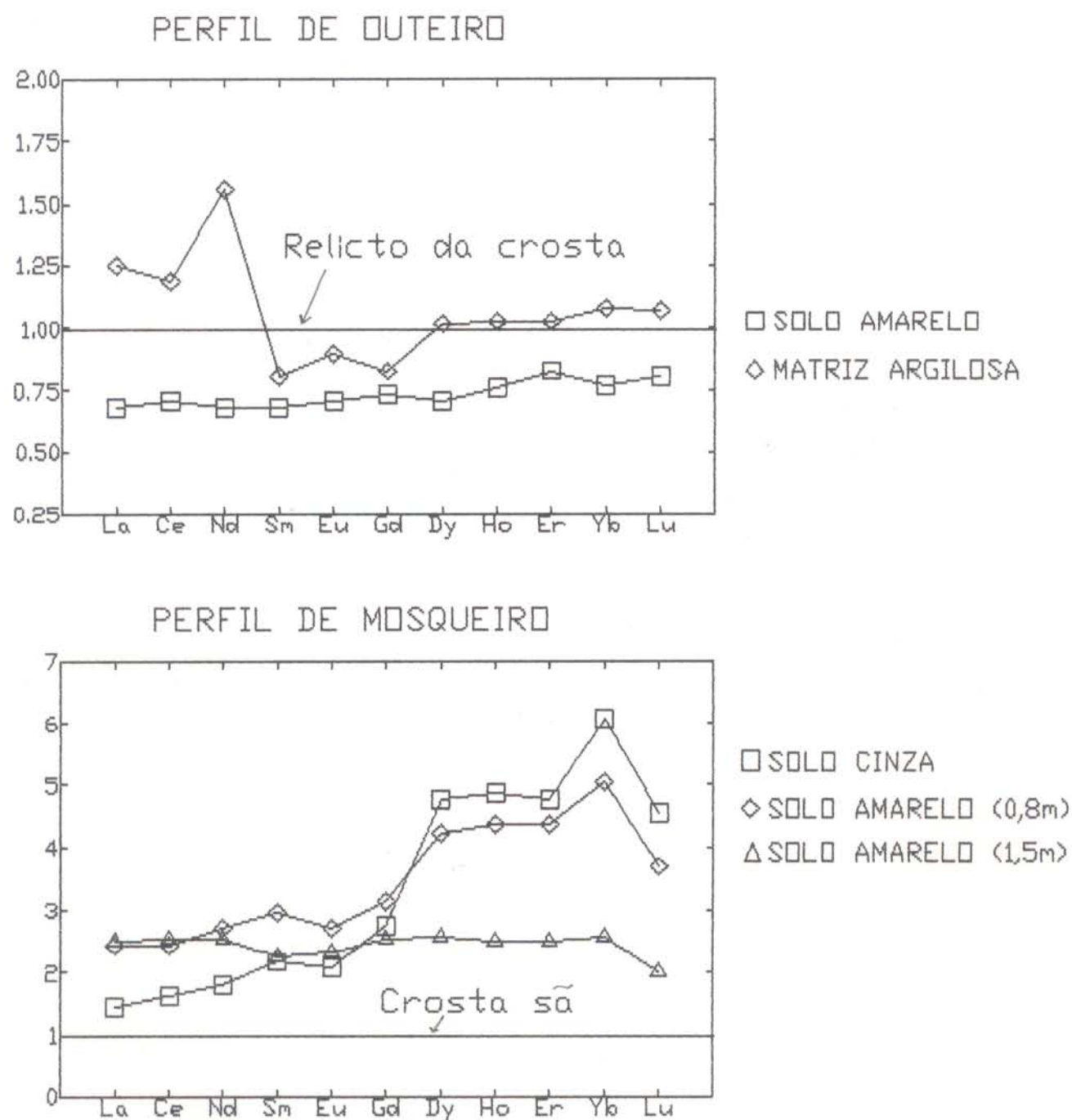


Figura 6.21: Normalização dos ETR em relação aos relictos e a crosta sa nos perfis de Duteiro e Mosqueiro

crostas. A maior variação ocorre nos teores de TiO_2 , mais erráticos no perfil de Outeiro, representando, provavelmente, a heterogeneidade litológica da rocha-mãe que deu origem à crosta laterítica.

Tabela 6.5: Balanço de massa dos perfis de Outeiro e Mosqueiro

HORIZONTES	LIXIVIADOS			IMOBILIZADOS		ENRIQUECIDOS	
	190Z	90Z A 40Z	<40Z	10Z A 10Z	<40Z	40Z A 90Z	190Z
PERFIL DE OUTEIRO							
SOLO CINZA(0,1M)		Fetotal, V	Cr		Ga	Y	Si, Al, Fe2+ PF, Ni, B, Zr, Mn Cu, Pb, MV
SOLO AMARELO(1)(0,3M)	Fetotal	V, Cr, Ni, Ga, Y, Cu, Pb		PF	Si, Al Mn, B, MV		Zr
(2)		Fetotal, Fe2+, V Cr, Ni, Ga, Y Pb, ETR		PF	Al, B, Zr Mn, MV		Si
(3)	Fetotal	V, Cr, Ga, Pb	Ni, B,	Si, PF B, Mn MV	Fe2+ Zr, Y		Al
(4)		Fetotal, V, Cr, Cu	Fe2+, Ni B, Ga, Y Mn, Pb,	Si, MV	PF, Zr		Al
CROSTA INTENPERIZADA							
Matriz argilosa		Fetotal	Fe2+, V	Ga, Dy, Eu Ho, Er, Yb, Lu	Cr		Si, Al, PF Ni, B, Zr, Mn, Cu, MV
CROSTA PARCIALMENTE INTENPERIZADA							
Matriz argilosa		Fetotal, V, Cr, Ga	Sm, Gd	Eu, Dy, Ho, Er Yb, Lu	La, Ce, Nd, Dy Ho, Er, Yb, Lu	Si, Fe2+, Ni, Nd, MV	Al, PF, B, Zr, Y, Mn, Cu

(0,1m) profundidade em relação ao topo do perfil

continuação da tabela 6.5

HORIZONTES	LIXIVIADOS		IMOBILIZADOS		ENRIQUECIDOS	
	>90Z	90Z A 40Z	<40Z	10Z A 10Z	<40Z	40Z A 90Z
PERFIL DE MOSQUEIRO						
SOLO CINZA(0,15M)	Fetotal V, Cr	Al, PF Ga, Sc, Mn	Si Y, MV	B	Fe2+	Zr
SOLO(0,60M)	Fetotal V, Cr, Ni	Al, Fe2+, PF Ga, Sc, Cu, Pb	Si B, Y, Mn, MV		Y	Zr
(0,80M)	Fetotal V, Cr, Ni	Si, PF Ga, Sc, Mn, Pb	B, Y, Cu MV		Al, Fe2+	Zr
(1,15M)	V	Fetotal Cr, Ni, Ga, Sc Mn, Pb	Si, PF B, Y, MV	Al, Fe2+		Zr, Cu
(1,50M)	V	Si, Fetotal, Fe2+ Cr, Ni, Ga, Sc Mn, Cu, Pb	PF B, Y, MV	Al		Zr
(2,30M)	Fetotal	V, Cr, Ni, Ga Sc, Mn, Pb	Si, PF B, Y, MV		Al, Fe2+	Zr

(0,1m) profundidade em relação ao topo do perfil

A modificação volumétrica (MV) do perfil de Duteiro (Tabela 6.5) mostra expansão de volume associada à desagregação dos relictos causada pela dissolução da hematita e lixiviação do Fe_2O_3 , além do enriquecimento em SiO_2 e Al_2O_3 , na forma de quartzo e caolinita na matriz argilosa e solo. No perfil de Mosqueiro a lixiviação de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 levou diretamente ao colapso no volume do solo em relação à crosta. No solo cinza superficial a parcial descaolinização do solo, pela ação da matéria orgânica, promove o enriquecimento ainda mais acentuado em quartzo, formando um podzol. Tem-se, portanto, uma modificação mineralógica e química similar a verificada nos processos intempéricos, de modo que o solo, com sua forte afinidade geoquímica com a crosta, é o resultado final desse processo.

7 - PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DAS CROSTAS EM SOLOS

7.1 - ESTRUTURAÇÃO DOS PERFIS EM HORIZONTES

Os dados obtidos mostram que há uma transformação gradativa no perfis estruturando-o em horizontes: crosta sã, crosta parcialmente intemperizada, crosta intemperizada e solo (Figura 7.1), podendo a crosta sã estar ausente, como no perfil do Igarapé Bahia e Outeiro, ou o solo assentar-se diretamente sobre a crosta sã, como em Mosqueiro.

Observa-se um processo crescente de fissuramento e fraturamento da crosta o que leva ao aumento na sua porosidade, e propiciando a percolação de soluções que intensificam seu concrecionamento e desagregação, gerando relictos (Figura 7.1a e b). O processo evolui formando córtex e nódulos (Figura 7.1c) que são gradativamente cominuídos até seu total desaparecimento. Concomitante à cominuição dos nódulos tem-se, ao longo das fissuras e fraturas, a neoformação de um material argiloso a areno-argilosos que aumenta de proporção até formar um solo (Figura 7.1d), em um processo residual similar ao observado por NAHON et al. (1979), DIDIER et al. (1985), NAHON (1991), BARDOSSY & ALEVA (1990), BILONG et al. (1992), BITTON & VOLKOFF (1993), BEAUVAIS & COLIN (1993), BEAUVAIS & TARDY (1993) e TARDY (1993), na formação de solos a partir da pedogênese e desagregação de crostas lateríticas, em ambientes de clima úmido com cobertura de floresta.

O perfil tende assim a se estruturar em horizontes, em um processo de diferenciação vertical onde cada estágio representa

**Crostas ferro-
aluminosas e
sílico-
ferruginosas**

**Crostas
aluminosas**

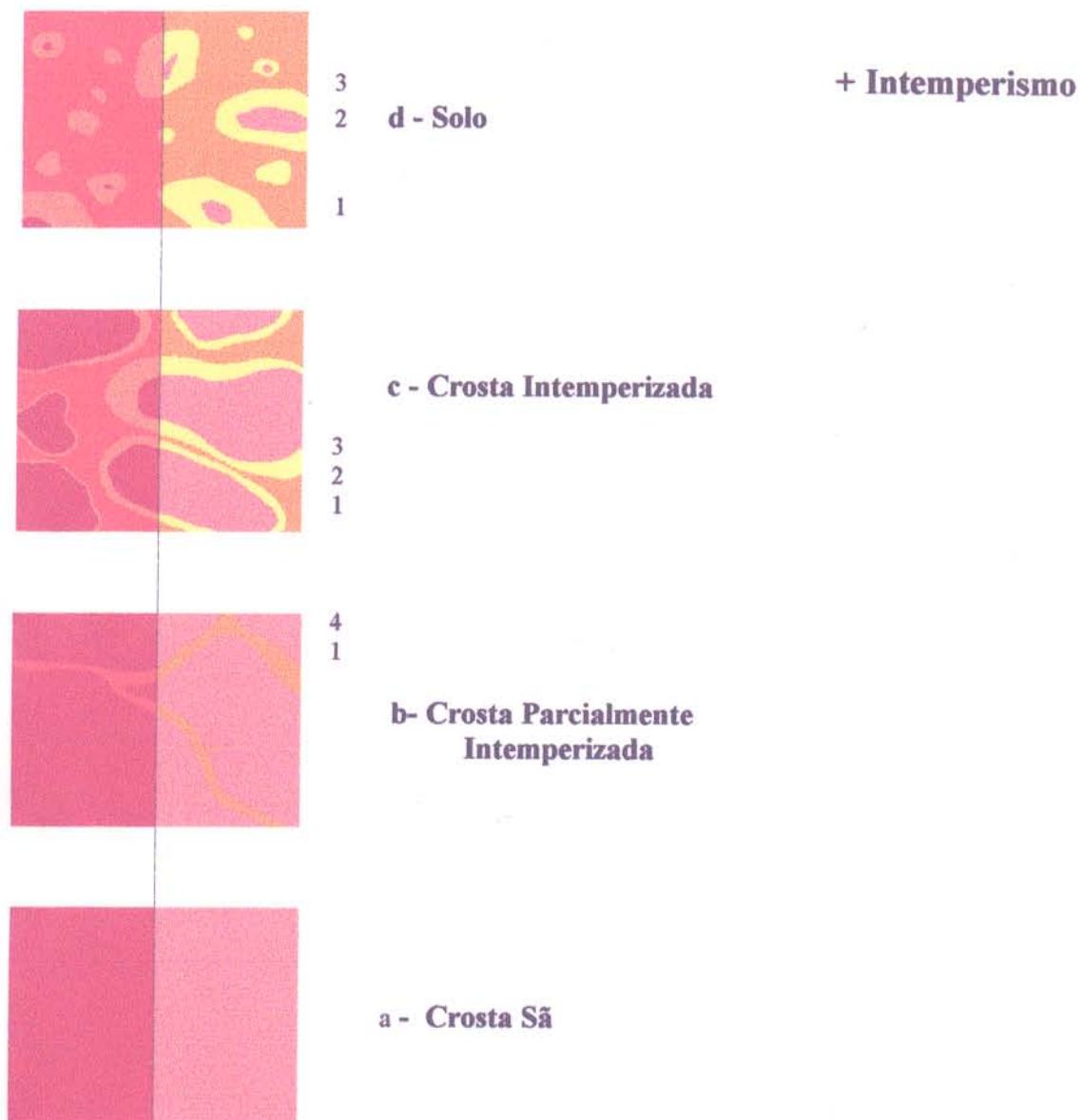


Figura 7.1: Esquema de transformação textural dos perfis de alteração estudados: 1 - Matriz argilosa; Nódulos: 2 - Borda, 3 - Núcleo; 4 - Relictos

uma maior transformação em relação à crosta, que está em desequilíbrio físico e químico (LEPRUN, 1979; BILONG et al. 1992; BEAUVAIS & TARDY, 1993 e BITTON & VOLKOFF, 1993). Desse modo, o material argiloso a areno-argiloso neoformado, que se encontra em fase de constante evolução, representa a busca do reequilíbrio do sistema às novas condições de porosidade e a percolação de soluções.

A quebra no equilíbrio das crostas é atribuída aos efeitos conjugados de umidade, ação biológica e decomposição da matéria orgânica, com produção de ácidos orgânicos. Esses efeitos, mais intensos quanto mais próximos da superfície, levam a um decréscimo no pH e Eh (BARDOSSY & ALEVA, 1990 e YARIV & CROSS, 1979). Em ambientes de clima úmido e quente, propícios ao desenvolvimento de florestas tropicais, a percolação de soluções é maior, agindo intensamente sobre rochas formadas a maiores profundidades (crostas aluminosas) ou em climas mais secos (crostas ferro-aluminosas e sílico-aluminosas) e, portanto, em desequilíbrio com essas condições. Esses processos atuam não só sobre crosta lateríticas, mas sobre qualquer tipo de rocha. Rochas anteriormente em equilíbrio, quando submetidas a esses efeitos, vão sofrer alterações envolvendo processos de dissolução de minerais e neoformação de outros, que perduram até que o equilíbrio seja alcançado nas novas condições. A espessura do perfil de solo vai depender da espessura da crosta, da taxa de lixiviação, do clima, dos processos erosivos e de inversão do relevo superimpostos e do tempo geológico.

A dissolução de minerais por ácidos orgânicos se dá de três modos (WELCH & ULLMAN, 1993): 1- Geração de prótons que atacam o

oxigênio da superfície do mineral, quebrando a ligação oxigênio-metal, promovendo a reação de dissolução; 2- formação de complexos organo-metálicos em solução, 3- ataque direto à ligação oxigênio-cátion dos minerais. Desse modo formam-se espécies complexas de ferro e alumínio (Fe^{3+} , Fe^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, HFeO , Al^{3+} , AlO_2^- , H_2AlO_3^- e combinações desses íons com CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- , N_2 , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} e Cl^-), que são normalmente lixiviados.

7.2 - TRANSFORMAÇÕES MINERALÓGICAS E QUÍMICAS

Nos perfis de N5 e Igarapé Bahia a desferrificação, da base para o topo do perfil, é intensa (Figura 3.9, 4.12), em consequência da dissolução quase que total da hematita (Figura 7.2). Parte do ferro dissolvido se precipita como Al-goethita (Figura 7.3), com proporções crescentes de AlOOH na sua estrutura, como foi constatado nos itens 3.3.1 e 4.3.1 e outra parte é lixiviada, levando à destruição da crosta e individualização de relictos, que evoluem para nódulos até sua total dissolução.

A intensa lixiviação do ferro ao longo do perfil, provavelmente na forma de Fe^{3+} (NEWMAN & BROWN, 1987), leva a um acréscimo linear no teor de Al_2O_3 no solo (Figuras 3.9 e 4.12), devido a maior abundância de gibbsita em detrimento da caolinita que predomina na crosta. Esse padrão foi observado por NAHON et al. (1979), DIDIER et al. (1985), BEAUVAIS & COLIN (1993), TARDY (1993), BEAUVAIS & TARDY (1993) e BITTON & VOLKOFF (1993) na desagregação de crostas e formação de solos na África. Contudo, a

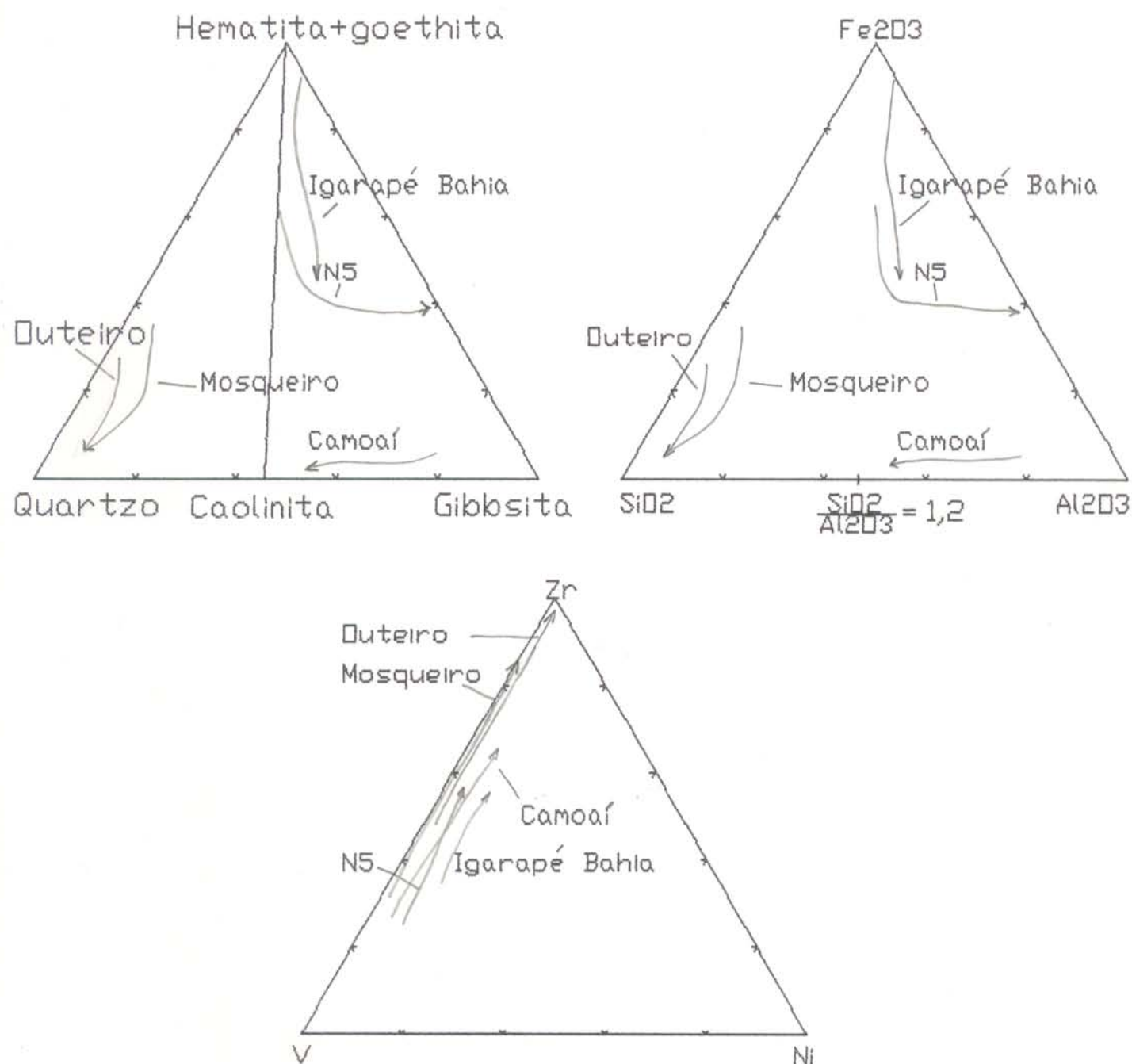
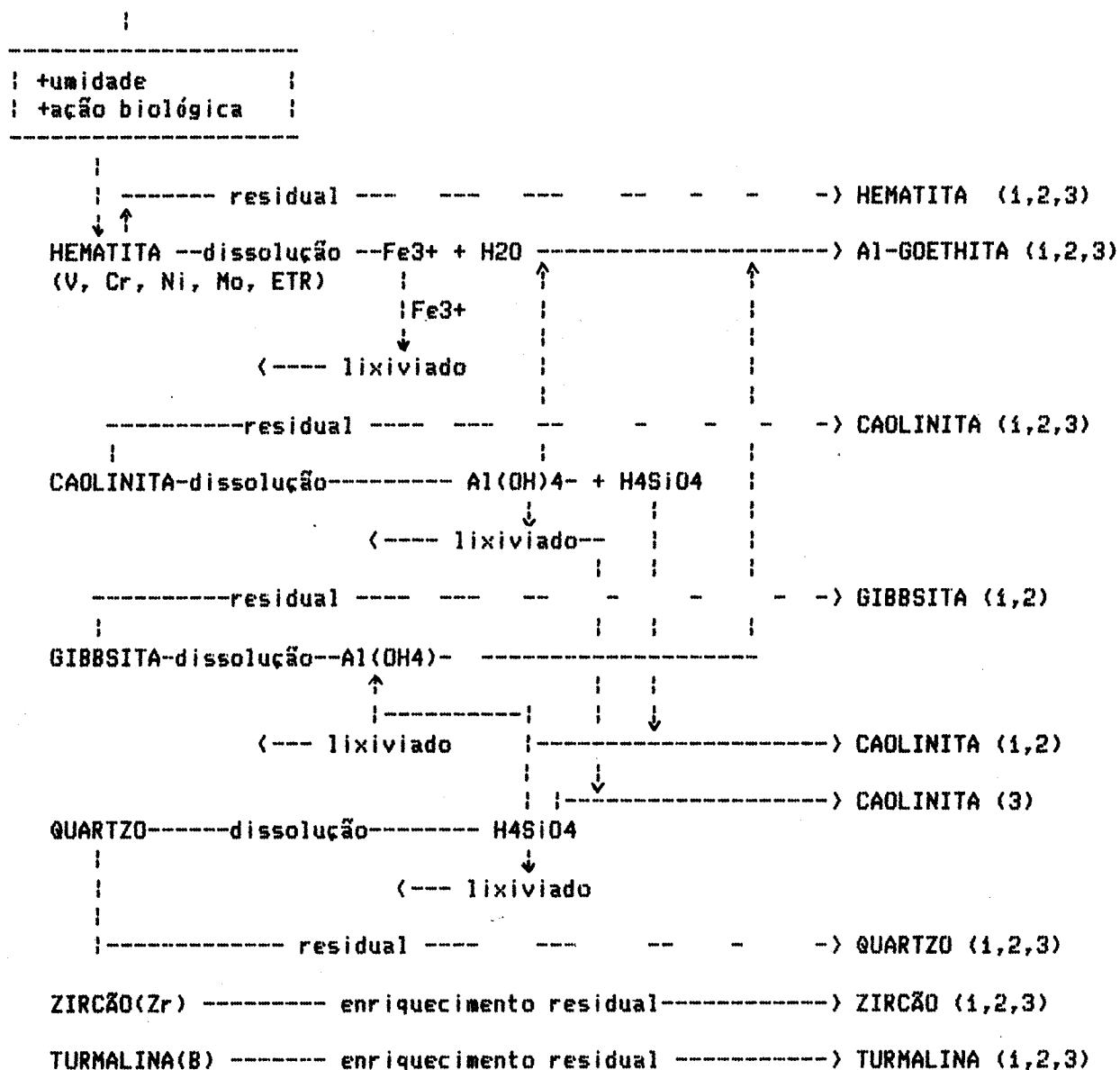


Figura 7.2: Diagramas quartzo-gibbsita-hematita+goethita, SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃ e V-Ni-Zr dos perfis estudados

CROSTA Sã ----- Intemperismo crescente ----- SOLOS



- 1- Perfis de N5 e Igarapé Bahia
2- Perfil de Camoá
3- Perfis de Outeiro e Mosqueiro

Figura 7.3: Evolução esquemática mineralógico-geoquímica dos perfis estudados.

presença de caolinita em fissuras e fraturas do plasma internodular gibbsítico da crosta parcialmente intemperizada de N5 e Igarapé Bahia indica que, além de herdada, a caolinita é neoformada de caolinita durante o intemperismo das crostas, enquanto a gibbsita é herdada da crosta e, portanto, residual no solo. O intemperismo de crostas ferro-aluminosas leva à dissolução de hematita, enriquecimento residual de gibbsita, devido a menor mobilidade do alumínio em relação ao ferro no intemperismo, e à neoformação de caolinita e goethita.

LUCAS (1988) e TARDY (1993) descrevem processos de neoformação de caolinita a partir da dissolução de gibbsita em ambientes ricos em sílica, que é proveniente da dissolução do quartzo herdado da crosta ou ainda por aporte externo, via decomposição de material vegetal (PERL'MAN, 1967 e ANDRADE et al. 1991). Esse processo pode se desenvolver em fissuras e fraturas, onde a circulação de soluções é mais abundante e a ação dos ácidos orgânicos, que tendem a dissolver a gibbsita (WELCH & ULLMAN, 1993 e BENEDETTI et al. 1994), aumenta em até 100 vezes a liberação de alumínio em relação a sílica, tornando a gibbsita instável e permitindo a neoformação de caolinita, em equilíbrio nesse ambiente. A instabilidade da gibbsita e o acúmulo de quartzo está ligado a uma podzolização incipiente do topo dos solos da Amazônia.

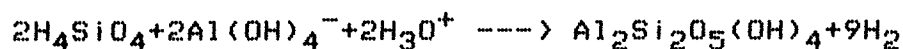
Nos perfis de Outeiro e Mosqueiro o processo de desferrificação das crostas sílico-ferruginosas é menos intenso que nos derivados de crostas ferro-aluminosas (Figura 7.2), pois os teores de Fe_2O_3 são menores. Devido à lixiviação do ferro tem-se o acúmulo de quartzo+caolinita (Figura 6.4), representado

pelo enriquecimento em SiO_2 (Figura 7.3) e formação de um solo amarelado, devido aos baixos teores de hematita reliquiar e formação de Al-goethita. A presença de caolinita no plasma internodular ferruginoso da crosta sugere que pelo menos parte da caolinita é residual no solo, bem como o quartzo, assemelhando-se ao comportamento da gibbsita nos perfis de N5 e Igarapé Bahia. A passagem do solo amarelado para cinza, com aumento no teor de quartzo, principalmente no perfil de Mosqueiro, indica podzolização do topo do perfil em consequência da degradação da caolinita devido a presença mais abundante de matéria orgânica. A podzolização nestes perfis é mais intensa que em N5 e Igarapé Bahia.

No perfil de Camoaí tem-se a desaluminização da crosta (Figura 7.2), com dissolução da gibbsita e a neoformação de caolinita (Figura 7.3), mostrando que a gibbsita está em desequilíbrio neste perfil, de modo similar a N5 e Igarapé Bahia. A dissolução de gibbsita e neoformação de caolinita é muito mais acentuada neste perfil que em N5 e Igarapé Bahia, demonstrando que o intemperismo foi mais intenso em Camoaí e que o nível de dissecação do relevo era provavelmente menor, não permitindo que a gibbsita fosse preservada. Desse modo pode-se considerar que o solo de N5 e Igarapé Bahia são paleosolos.

A relação linear negativa entre o SiO_2 e o Al_2O_3 (Figura 5.7), devida à dissolução da gibbsita e neoformação da caolinita ao longo do perfil de Camoaí, mostra um processo de enriquecimento em sílica, onde a sílica dissolvida (H_4SiO_4), proveniente da corrosão do quartzo ou aporte vegetal, reage com o

complexo $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ gerado na dissolução da gibbsita (WESOLOWSKI, 1992) na seguinte reação:



Assim, o processo de intemperismo gerado pela atividade orgânica tende a dissolver gibbsita, formando caolinita em equilíbrio com as condições mais ácidas, moderadamente oxidantes e mais abundantes em H_4SiO_4 , encontradas na superfície, que diferem das condições de formação da gibbsita. Essa transformação mineralógica é similar à observada por GRUBB (1983) em solos derivados de bauxitas no sul da África e por BARDOSSY (1983) nas Guianas. Com o acúmulo da matéria orgânica a caolinita também é dissolvida gerando solos arenosos.

A nível de elementos-traço, a transformação da crosta em matriz argilosa e finalmente em solo leva ao aumento no teor de Zr em todos os perfis (Figura 7.3), sendo acompanhado, ocasionalmente, por B e Mn e pela diminuição dos demais elementos-traço (V, Cr, Ni, Mo, Ga, Y, Sc, Cu, Mn, Pb e ETR), que estão inicialmente na estrutura da hematita na crosta, instável ao intemperismo. O comportamento desses elementos é similar ao observado na formação de solos residuais por ESSON (1983), SCHORIN & PUCHELT (1987), OLIVEIRA et al. (1988), DANI et al. (1989), MARKER et al. (1989), LECOMTE & COLIN (1989), HORBE (1991) e BEAUVAIS & COLIN (1993). A normalização dos ETR em relação à crosta ou a seus relictos mostra que na formação do solo os ETRL são geralmente mais lixiviados que os ETRP, indicando maior mobilidade desses elementos durante o intemperismo em condições tropicais úmidas e moderadamente oxidantes.

A tendência de acúmulo de Zr, além de caolinita e quartzo no topo dos perfis, indica que o processo de formação de solos foi similar nas cinco áreas estudadas, apesar das composições mineralógicas e químicas diferentes em cada perfil (Figuras 7.4; 7.5) e resultante de intensa lixiviação. Nota-se então que há atenuação na assinatura geoquímica das crostas para os solos, de modo que o solo diferencia-se cada vez mais destas, assemelhando-se ao observado por TARDY (1993) entre a composição da crosta laterítica e o horizonte argiloso sotoposto em perfis autóctones. Os solos gerados são geoquimicamente diferentes entre si.

Com base nos dados obtidos e nos de outros perfis onde o horizonte de solo se superpõe a crosta laterítica similares (KRONBERG et al, 1982; COLIN & LECOMTE 1988; LUCAS, 1988; LECOMTE, 1988; LECOMTE & COLIN, 1989; BOULANGÉ & CARVALHO, 1989; ANGÉLICA, 1991; TRUCKENBRODT et al, 1991; COSTA & COSTA, 1991; OLIVEIRA & VALENTE, 1991; BEAUVAIS & COLIN (1993), TARDY (1993), BEAUVAIS & TARDY (1993) e BITTON & VOLKOFF (1993) e SANTOS, 1994), pode-se definir o campo composicional (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3) dos solos resultantes do intemperismo dessas crostas (Figura 7.6). Esse campo, onde a maior parte dos horizontes saprolíticos e argilosos também se inserem, permite correlacionar a formação dos solos com os procesos de saprolitização e argilização que ocorrem durante o intemperismo/lateritização em condições de clima úmido.

7.3 - POPULAÇÕES GEOQUÍMICAS

A filiação do solo com a respectiva rocha-mãe (crostas

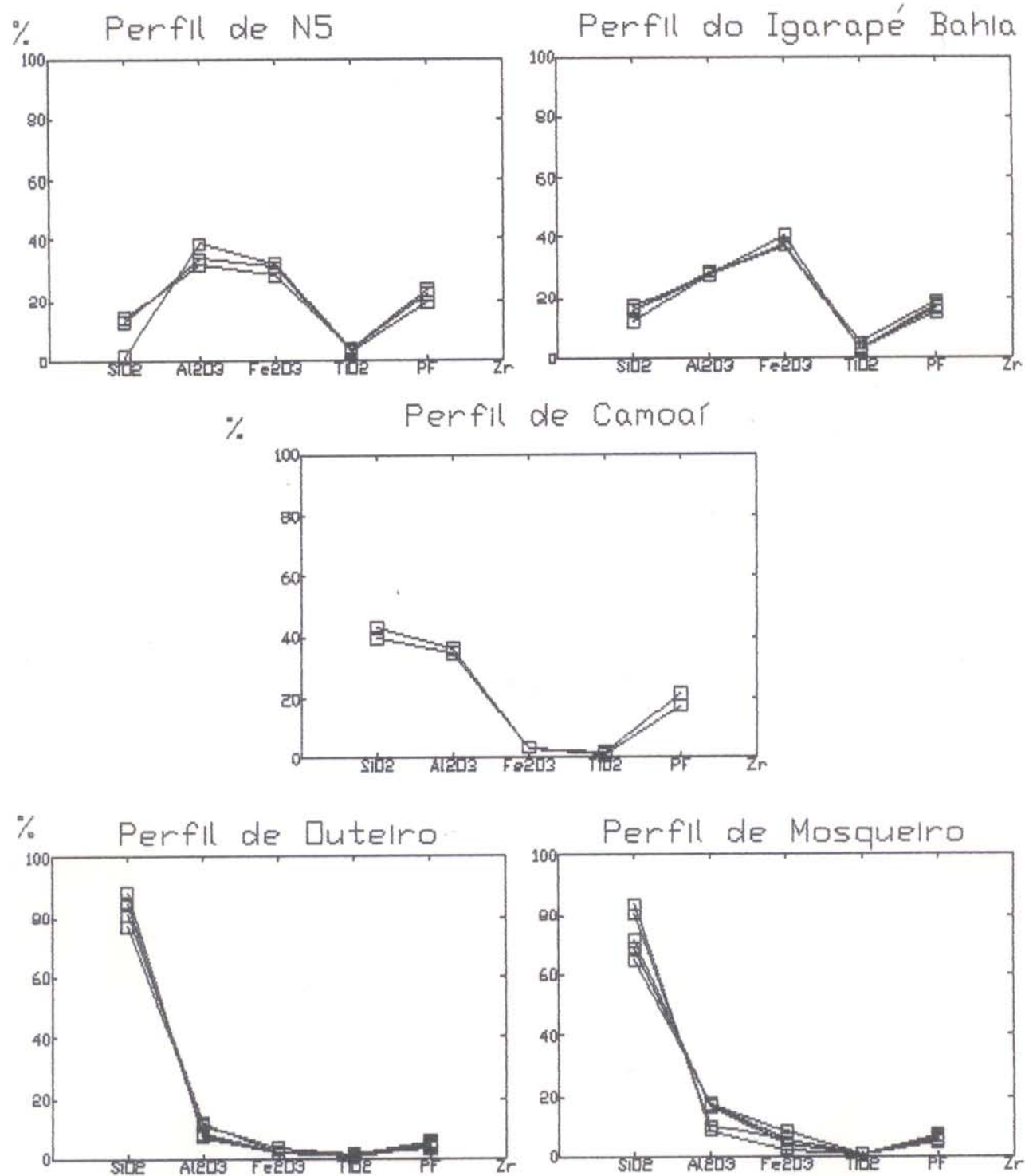
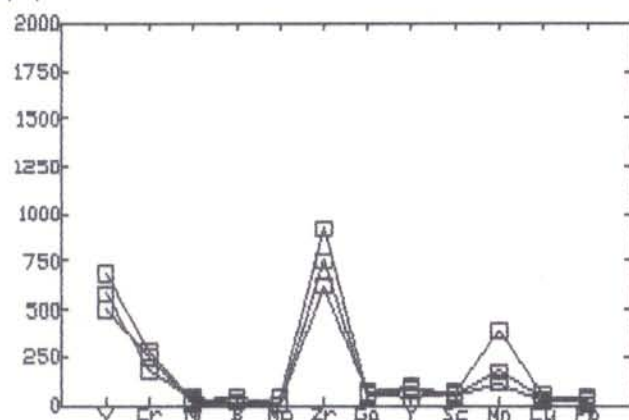
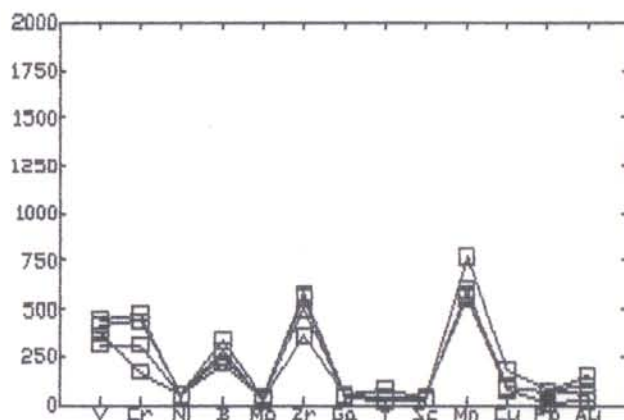


Figura 7.4: Distribuição da composição química dos solos dos perfis estudados

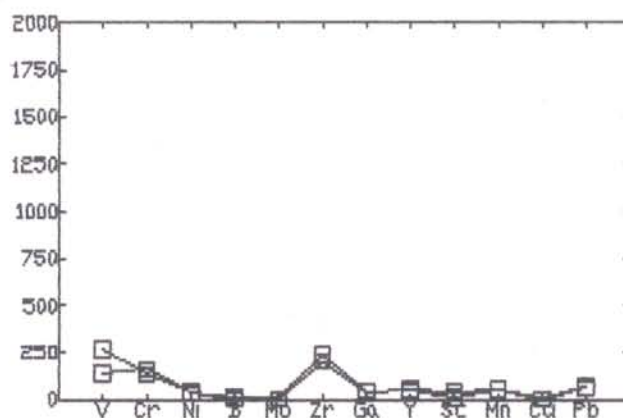
ppm Perfil de N5



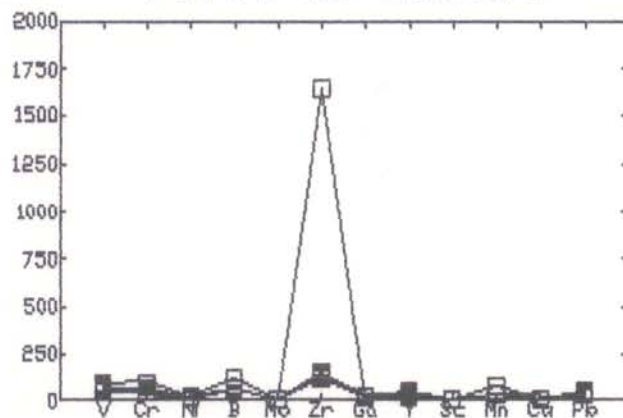
Perfil do Igarapé Bahia



ppm Perfil de Camoal



ppm Perfil de Duteiro



Perfil de Mosqueiro

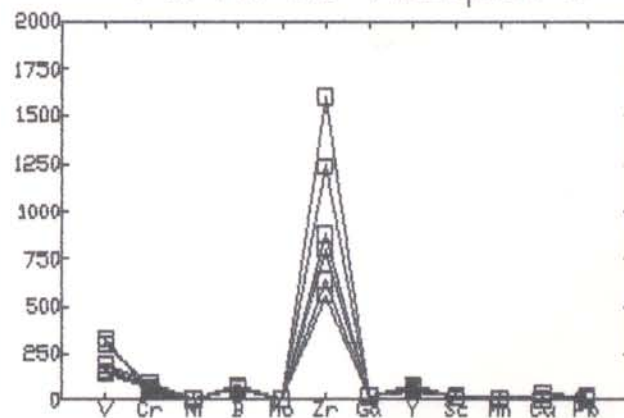


Figura 7.5: Distribuição dos elementos-traço nos solos dos perfis estudados

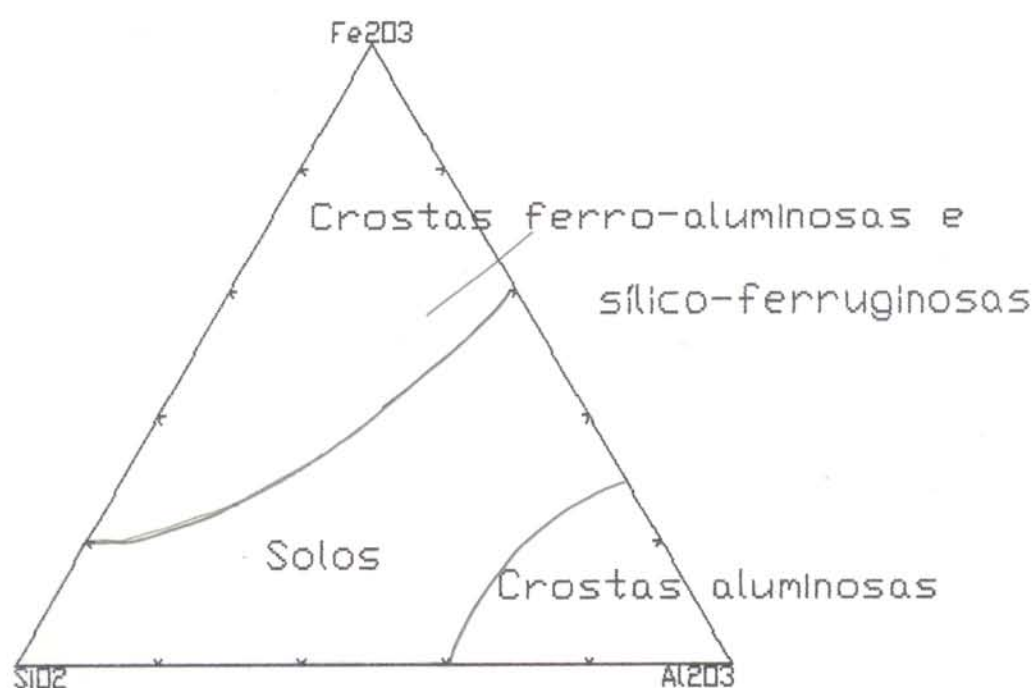
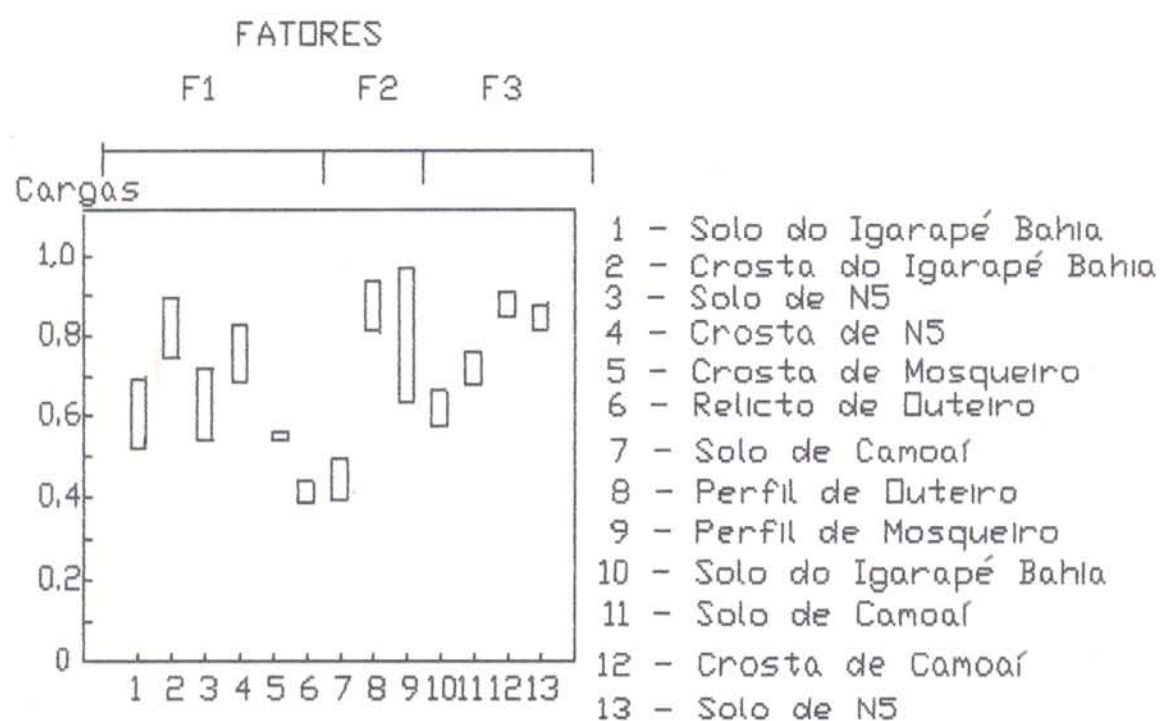


Figura 7.6: Diagrama SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 com definição dos campos das crostas lateríticas e solos

ferro-aluminosa, aluminosa e sílico-ferruginosa) foi ainda melhor definida com a análise fatorial e de discriminante.

O fator I ($S=57,7\%$), com base na hematita+goethita, Fe_2O_3 , V, Cr, Ni, Mo, Sc e Mn com cargas positivas, e por quartzo e SiO_2 com cargas negativas, discriminou os perfis de N5 e Igarapé Bahia dos demais, agrupando com eles a crosta de Mosqueiro e os relictos de Outeiro (Figura 7.7) devido aos seus teores elevados em hematita e Fe_2O_3 . Esse fator comprova a associação do ferro com esses elementos-traço como observado nos perfis (item 3.4.2, 4.4.2, 6.4.2). O fator II ($S=19,18\%$) com quartzo e SiO_2 , com carga positiva, e por goethita+hematita, Fe_2O_3 , Ga, Sc e Mn, com carga negativa, discriminou as crostas e solos sílico-ferruginosos de Outeiro e Mosqueiro (Figura 7.7). Neste fator os solos de Camoá apresentam correlação entre 0,41 e 0,49, aproximando-se composicionalmente aos solos de Outeiro e Mosqueiro devido aos elevados teores de SiO_2 , na forma de caolinita em Camoá. Contudo, o perfil de Camoá apresenta melhor correlação com o fator III ($S=7,86\%$, Figura 7.7), com cargas positivas para gibbsita, TiO_2 , PF e Ga e negativas ($>-0,5$) para quartzo e SiO_2 . Esse fator, além de melhor discriminar o perfil de Camoá, agrupou os solos de N5 e Igarapé Bahia devido ao caráter gibbsítico (alto teor de Al_2O_3) desses materiais.

Já a análise de discriminante, com base nas duas primeiras variáveis canônicas, permitiu visualizar o conjunto de perfis de solos estudados (Figura 7.8) e comprovar novamente a afinidade química entre a crosta e o solo em cada perfil. A superposição dos perfis de Outeiro e Mosqueiro, formando um único agrupamento, comprova a afinidade geoquímica entre eles, do mesmo modo que a



$$F1 = \frac{(\text{Goethita} + \text{Hematita}) + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{V} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{Mo} + \text{Sc} + \text{Mn}}{\text{Quartzo} + \text{SiO}_2}$$

$$F2 = \frac{\text{Quartzo} + \text{SiO}_2}{(\text{Goethita} + \text{Hematita}) + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Ga} + \text{Sc} + \text{Mn}}$$

$$F3 = \frac{\text{Gibbsita} + \text{TiO}_2 + \text{PF} + \text{Ga}}{\text{Quartzo} + \text{SiO}_2}$$

Figura 7.7: Representação gráfica das cargas dos fatores principais da análise fatorial modo Q

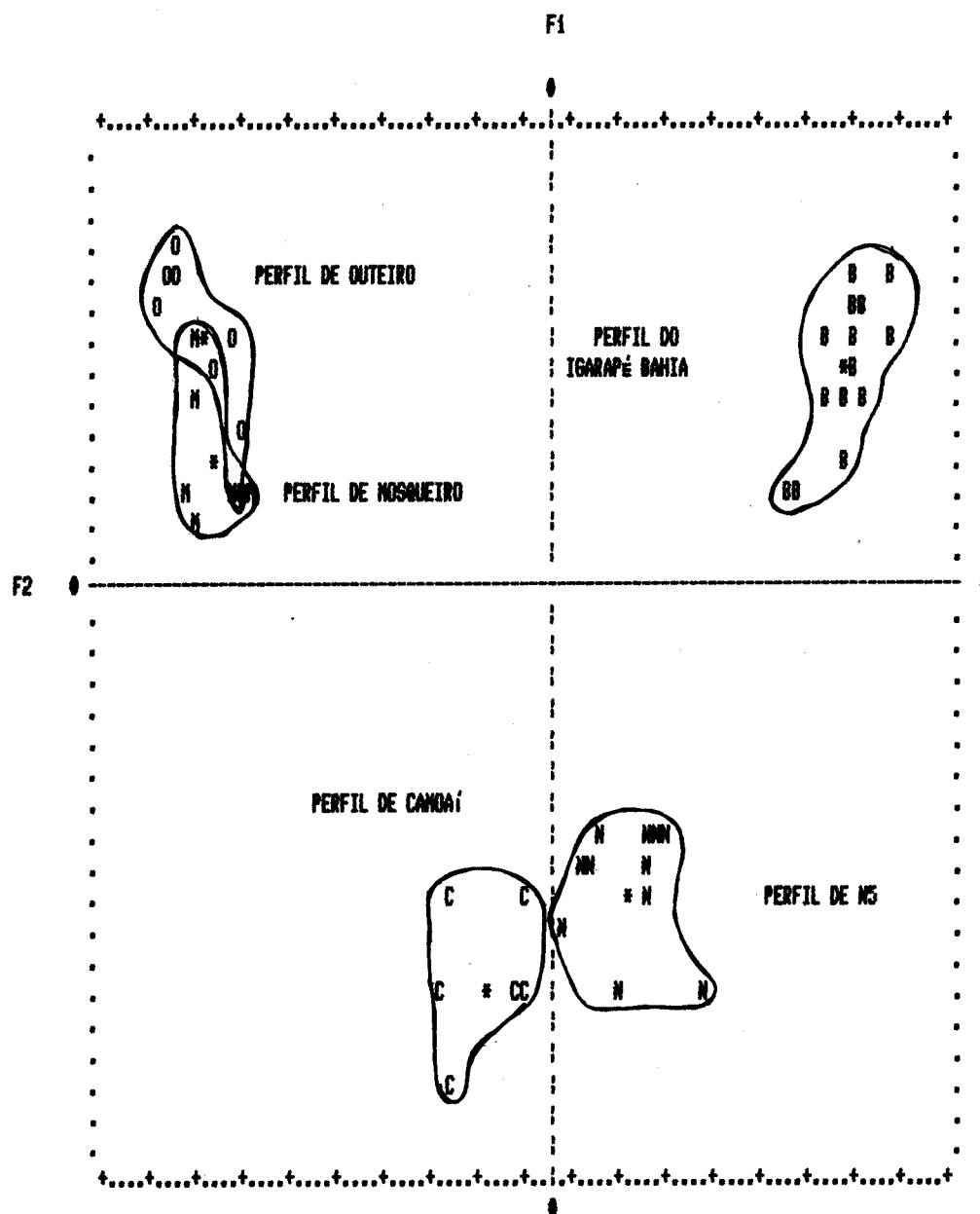


Figura 7.8: Gráfico da análise de discriminante.

proximidade entre os perfis de Camoá e N5 é consequência dos altos teores de gibbsita e Al_2O_3 em parte desses perfis.

7.4 - CORRELAÇÃO COM A ARGILA DE BELTERRA

SOMBROECK (1966) e TRUCKENBRODT et al, (1991) observaram no médio e baixo rio Amazonas um material caolinítico amarelo a avermelhado que assenta-se, em contato abrupto, sobre crostas lateríticas, preferencialmente aluminosas. Esse material foi denominado de Argila de Belterra por SOMBROECK (1966). Apresenta-se não estratificado, com concreções ferruginosas e aluminosas, teores variáveis de gibbsita e baixos de quartzo. A composição mineralógica varia de região para região, podendo predominar a caolinita ou goethita e hematita.

Essas características, aliadas aos teores de Zr sempre mais elevados na Argila de Belterra que nas crostas e de Fe_2O_3 mais baixos (TRUCKENBRODT et al. 1991), dão uma idéia da transformação química das crostas subjacentes para a Argila de Belterra, que coincide com a observada nos perfis aqui estudados, em especial com o de Camoá. A semelhança com o perfil de Camoá é consequência dos estudos da Argila de Belterra terem se concentrado em áreas de crostas aluminosas (bauxitas).

A associação da Argila de Belterra com o saprólito (TRUCKENBRODT et al. 1991), em função dos teores de SiO_2 e Fe_2O_3 semelhantes, deve-se ao processo intempérico que leva à desferrificação, ao enriquecimento em sílica e à caolinização do perfil, como constatado na figura 7.6.

Nos perfis aqui estudados observou-se que há uma transformação gradual da crosta para o solo, que por se dar no

intervalo de algumas dezenas de centímetros, sugere que o contato entre a crosta e o solo seja discordante. Contudo, em perfis onde a relação das crostas com o solo não é gradual (perfis 2 e 3 do Igarapé Bahia e perfil de Mosqueiro), a relação geoquímica entre as duas unidades é mantida, o que sugere a ação de intemperismo físico e deslocamento de material para as porções mais rebaixadas por fluxo massa, como sugerido por TRUCKENBRODT et al. (1991) mas não relacionado a processos sedimentares.

A presença do horizonte nodular nos perfis derivados de crostas lateríticas maduras, que poderia ser considerado como material transportado, representa, com base na semelhança química observada entre os nódulos e a crosta e o plasma internodular com a matriz argilosa nos perfis estudados (Figuras 3.14, 4.19 e 5.12), o testemunho de um processo pretérito de intemperismo com geração de nódulos.

Esses argumentos mostram que a variação nos teores de Al_2O_3 , TiO_2 , Zr e Nb entre uma área e outra, observados por TRUCKENBRODT et al. (1991), são resultantes de modificações composicionais da crosta laterítica adjacente e subjacente, como constatado nos perfis aqui estudados (Figuras 7.4 e 7.5).

As características observadas ajustam-se as do conjunto dos solos gerados pelo intemperismo nos perfis estudados, permitindo então considerar o material denominado Argila de Belterra como resultante do intemperismo das crostas subjacentes e adjacentes, tendo sido localmente deslocado por de fluxo de massa para paleodepressões. Com base nessas observações é possível associar a formação dos solos tipo Argila de Belterra com as modificações

climáticas que vem ocorrendo na Amazônia desde o Terciário médio, após a primeira fase de formação de crostas lateríticas em decorrência da instalação de várias fases de clima tropical úmido na região, discutido por TARDY et al. (1991).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEVA, G.J.J. 1981. Essential difference between the bauxite deposits along the southern and northern edges of the Guiana shield, South America. *Econ. Geol.* 76:1142-1152.
- ANDRADE, W.O.; MACHESKY M.L.; ROSE A.W. 1991. Gold distribution and mobility in the surficial environment, Carajás, region, Brazil. *Jour. Geol. Expl.* 40:95-114.
- ANGÉLICA, R.S. 1991. Dispersão mineralógica e geoquímica em crostas e solos lateríticos aplicada a caracterização do substrato do Complexo de Maicuru - Pará. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1991. 200p. Tese (Mestrado em Geoquímica) - Curso de Pós-graduação em Geociências, UFPA.
- ASSAD, R. & BEISIEGEL, V. 1978. Depósito de bauxita da Serra de Carajás. In: CONG. BRAS. GEOL., 30., Recife, 1978. *Anais...Recife, SBG.* v. 4, p.1385-1391.
- BARDOSSY, G. 1982. Karst bauxites. Amsterdam, Elsevier Sci. Publ. Co. 441p.
- BARDOSSY, Gy. 1983. A comparison of the main lateritic bauxite regions of our globe. In: INTERN. SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES. 2., São Paulo, 1983. *Anais... São Paulo, IAG/USP,* p.15-51.
- BARDOSSY, G. & ALEVA, G.J.J. 1990. Lateritic bauxites. In: *Developments in economic geology*, v.27. Amsterdam, Elsevier. 624p.

- BEAUVAIS, A. & COLIN, F. 1993. Formation and transformation processes of iron duricrust systems in tropical humid environment. *Chem. Geol.*, 106:77-101.
- BEAUVAIS, A. & TARDY, Y. 1993. Degradation and dismantling of iron crust under climatic changes in Central Africa. *Chem. Geol.*, 107:277-288.
- BENEDETTI, M.F.; MENARD, O.; NOACK, Y.; CARVALHO, A.; NAHON, D. 1994. Water-rock interactions in tropical catchments: field rates of weathering and biomass impact. *Chem. Geol.*, 118:203-220.
- BILONG, P.; BELINGA, S.E.; VOLKOFF, B. 1992. Séquence d'évolution des paysages cuirassés et des sols ferrallitiques en zone forestières tropicales d'Afrique central. Place des sols à horizons d'argile tachetée. *C. R. Acad. Sci. Paris* 314:109-115.
- BITTON, D. & VOLKOFF, B. 1993. Alteration déferruginisante des cuirasses massives et formation des horizons gravillonnaires ferrugineux dans les sols de l'Afrique Central humide. *C.R. Acad. Sci.*, 316:1447-1454.
- BLACK, R.Y. ; LOZEJ, G.P., MADDAM, S.S. 1984. Geology and mineralogy of the Zabirah bauxite, northern Saudi Arabia. In: JACOB Jr., L. Bauxites. New York, Society of Mining Engineers. p.619-638.
- BOULANGÉ, B. 1984. Les formation bauxitiques latéritiques de Côte-D'Ivoire. Paris, Université Paris VII, 1984. 327p. Tese (Doutorado), 1991.

- BOULANGÉ, B. & CARVALHO, A. 1989. The genesis and evolution of the Porto Trombetas bauxite deposits in the Amazon basin, Pará, Brazil. In: CONG. INT. ICSOBA, 6., Poços de caldas, 1989. Anais...Poços de Caldas, 1989, p.115-125.
- BOULET, R.; BOCQUIER, G.; MILLOT, G. 1977. Geochimie de la surface et formes du relief. 1. Déséquilibre pédobioclimatique dans les couvertures pédologiques de l'Afrique tropicale de l'ouest et son rôle dans l'aplanissement des reliefs. *Sci. Geol. Bull.*, 30:235-243.
- BRAUN, J.-J.; PAGEL, M.; HERBILON, A. & ROSIN, C. 1993. Mobilization and redistribution of REE's and thorium in a syenitic lateritic profile: A mass balance study. *Geochim. et Cosmochim. Acta.*, 57:4419-4343.
- BRIMHALL, G.H.; CHRISTOPHER, J.L.; FORD, C.; BRATT, J.; TAYLOR, G.; WARIN, O. 1991. Quantitative geochemical approach to pedogenesis: importance of parent material reduction, volumetric expansion, and eolian influx in lateritization. *Geoderma*, 51:51-91.
- BUTTY, D. & CHAPALAZ, C.A. 1984. Bauxite genesis. In: JACOB, L. eds.. *Bauxite*. Los Angeles, Soc. of Mining Engineers, p. 111-151.
- CHAUVEL, A.; BOULET, P.J. & BOUQUIER, G. 1983. Aluminium and iron oxi-hydroxide segregation in nodules of latossols developed on tertiary sediments (Barreiras Group), near Manaus (Amazon Basin). In: MELFI, A.J. & CARVALHO, A., eds. *Lateritisation Process*. São Paulo, pg. 507-526.

- COLIN, F. & LECOMTE, P. .1988. Étude menéralogique et chimique du profil d'alteration du prospect aurifère de Mébaga Mvomo (Gabon). Chron. Rech. Min., 491:55-65.
- CORNELL, R.M.1988. The influence of some divalente cations on the tranformation of ferrihydrite into more crystalline products. Clay Miner., 23:329-332.
- CORNELL, R.M. & GIOVANOLI, R. 1987. Effect of manganese on the transformation of ferrihydrite to more cristaline produsts. Clay and Clay Miner., 35:11-20.
- COSTA, M.L. 1988. Os lateritos de Rondônia. CPRM, publicações técnicas, 19p.
- COSTA M.L. 1990. Lateritos e lateritização. In: CONG. BRAS. GEOL., 36, Natal, 1990. Anais.... Natal, SBG. 404-421.
- COSTA, M.L. 1991a. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. Rev. Bras. Geol., 21(2):146-160.
- COSTA, M.L. 1991b. Gossans da Amazônia: Notícias tardias(?). In: SIMP. GEOL. AMAZ., 3. Belém, 1991. Anais...Belém, SBG/NN, 449-464.
- COSTA, M.L., ANGÉLICA, R.S., ARAUJO, E.S.; HORBE, A.M.C. 1991. Abundância e fracionamento dos ETR em lateritos maduros (crostas ferroaluminosas e aluminosas) da Amazônia. In: CONG. BRAS. GEOQ., 3., São Paulo, 1991. Anais...São Paulo, SBGq. p.651-653.
- COSTA, M.L., ANGÉLICA, R.S.; AVELAR, J.O.G. 1991a. Outeiro e Mosqueiro: Exemplos de evolução laterítica imatura. In: SIMP. GEOL. AMAZ., 3., Belém, 1991. Anais... Belém, SBG/NN. p.479-494.

- COSTA, J.A.V. & COSTA, M.L. 1991. O padrão de distribuição do ouro no perfil laterítico do Morro da Mina. Região de Cassiporé, AP. In: SIMP. GEOL. AMAZ. 3, Belém, 1991. Anais..., Belém, SBG/NN. p. 421-434
- DANI, N.; FORMOSO, M.L.L.; VALENTON, I.; ROSENBERG, F. 1989. Geoquímica da alteração supergênica das rochas alcalinas de Lages. In: CONG. BRAS. GEOQ., 2., Rio de Janeiro, 1989. Anais... Rio de Janeiro, SBGq. p. 405-411.
- DAVEY, B.G.; RUSSELL, J.D.; WILSON, M.J. 1975. Iron oxide and clay minerals and their relation to colours and yellow podzolic soil near Sydney, Australia. *Geoderma*, 14:125-138.
- DENNEN, W.D. & NORTON, H.A. 1977. Geology and geochemistry of bauxite deposits in the lower Amazon basin. *Econ. Geol.*, 72:82-89.
- DIDIER, P.; PERRET, D.; TARDY, Y.; NAHON, D. 1985. Equilibres entre kaolinites ferrifères, goethites alumineuses et hematites alumineuses dans les systèmes cuirassés, rôle de l'activité de l'eau et de la taille des pores. *Sci, Géol. Bull.*, 38:383-397.
- DIVAKARARAO, V. & MURALIDHAR, R.V.L. 1989. Bauxite-laterite deposits in the south indian craton: geochemistry and origin. In: BALASUBRAMANIAN, K.S. et al. eds, *Weathering: Its products and deposits*. Greece, Theophrastus, vol 2, p 113-128.

- ESSON, J. 1983. Geochemistry of an nickeliferous laterite profile, Liberdade, Brazil. In: WILSON, R. C. L. eds. Residual deposits: Surface related weathering processes and materials. Geol. Soc. London Spec. Publ. p. 91-99.
- FORMOSO, M.L.L., RETZMANN, K. VALENTON, I. 1989. Fractionation of rare elements in weathering profiles on phonolites in the area of Lages, Santa Catarina, Brazil. Geoch. Bras. 3:51-61
- FREYSSINET, Ph. 1991. Geoquimie et mineralogie des laterites du sud-Mali. Évolution du paysage et prospection géochimique de l'or. Document du BRGM no. 203, 278p.
- FREYSSINET, Ph., ROQUIN, C., MULLER, J.C., PAQUET, H.; TARDY, Y. 1990. Geochemistry and mineralogy of soils covering laterites and their use for gold exploration. In: Geoch. Earth Surface and of Mineral Formation, 2, Aix de Provence, 1990. Anais..., France. 58-60.
- FRITSCH, E.; BOCQUIER, G.; BOULET, R.; DOSSO, M.; HUMBEL, F.X. 1986. Les systèmes transformants d'une couverture ferrallitique de Guyane française. Analyse structurale d'une formation supergène et mode de représentation. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 22:361-395.
- FRITZPATRICK, R.W. & SCHWERTMANN, U. 1982. Al-substituted goethite - An indication of pedogenic and other weathering environments in South Africa. Geoderma, 27:335-347.
- GERTH, J. 1990. Unit-cell dimension of pure and trace metal associated goethites. Geoch. et Cosmoch., Acta, 54:363-371.

- GRUBB, P.L.C. 1983. Weathering and leaching patterns associated with some gibbsitic soils in southern Africa. In: AUGUSTHITIS, S.S., ed. Leaching and diffusion, Theophrastus Publication S.A., Athens, Theophrastus. p. 321-344.
- HALE, M. & PORTO C.G. 1994. Geomorphological evolution and supergene gold ore at Posse, Goiás State, Brazil. *Catena*, 21:145-157.
- HERNANLSTEENS, C.M. de O. 1982. Bauxita de Porto trombetas. In: CONG. BRAS. GEOL., 32., Salvador, 1982. *Anais...* Salvador, SBG. vol 3, p. 1100-1114.
- HIERONYMUS, B.; BILDGEN, P.; KOTSCHOUBEY, B.; BOULANGUÊ, A.M.; KENSABIEC, A.M. 1989. Comparative study of three bauxitic process. In: INTERN. CONG. ICSOBA, 6, Poços de Caldas, 1989. *Anais...*, Poços de Caldas, 22:115-125.
- HORBE, A.M.C. 1991. Evolução mineralógica e geoquímica dos lateritos a Sn, Zr, Nb, Y e ETR da Serra do Madeira, Pitinga - AM. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 245p. Tese (Mestrado em Geoquímica) - Curso de Pós-graduação em Geociências. Centro de Geociências, UFPA.
- HORBE, A.M.C & COSTA, M.L. 1994. Alumino-goethita em latossolos amazônicos. In: SIMP. GEOL. AMAZ. 4, Belém, 1994. *Anais...*, Belém, SBG/NN. p. 172-175.
- JANOT, C. & GIBERT, H. 1973. Caractérisation des kaolinites ferrifères par spectrométrie Mossbauer. *Bull. Soc. Franc. Minéral. Cristallogr.*, 94: 367-380.

- KOTSCHOUBEY, B. 1988. Geologia do alumínio. In: SCHOBENHAUS, C. & COELHO, C.E.S. Principais depósitos minerais do Brasil: metais básicos não ferrosos, ouro e alumínio. Brasília, DNPM, v3, cap. 44, p.599-617.
- KOTSCHOUBEY, B. & LEMOS, V.P. -1985- Considerações sobre a origem e a gênese das bauxitas da Serra de Carajás. SIMP. GEOL. AMAZ., 2, Belém, 1985. Anais..., Belém, SBG/NN, v.3 p. 48-61.
- KOTSCHOUBEY, B. & TRUCKENBRODT, W. 1981. Argila de Belterra - Cobertura Terciária das bauxitas Amazônicas. Rev. Bras. Geoc., 11:203-208.
- KOTSCHOUBEY, B. & TRUCKENBRODT, W. 1994. Evidências de bauxitização tardia no NE do estado do Pará. In: SIMP. GEOL. AMAZ. 4, Belém, 1994. Anais..., Belém, p.269-271.
- KRONBERG, B.I.; COUSTON, J.F.; STILIANIDI FILHO, B.; FYFE, W.S.; NASH, R.A.; SUGDEN, D. 1979. Minor element geochemistry of the Paragominas bauxite, Brazil. Econ. Geol., 74: 1869-1875.
- KRONBERG, B.I.; FIFE, W.S.; MCKINNON, B.J.; COUSTON, J.F. STILIANIDI FILHO, B; NASH, R.A. 1982. Model for bauxite formation: Paragominas (Brazil). Chem. Geol., 35:311-320.
- LECOMTE, P. 1988. Stone line profiles: Importance in geochemical exploration. Jour. Geoch. Expl., 30:35-61.
- LECOMTE, P. & COLIN, F. 1989. Gold dispersion in a tropical rainforest weathering profile at Dondo Mobi, Gabon. Jour. Geoch. Expl., 34:285-301.

- LEMOS, V.P. 1982. Alteração supergênica das rochas básicas do Grupo Grão-Pará. Implicações sobre a gênese do depósito de bauxita de N5-Serra dos Carajás. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1982. 97p. Tese (Mestrado em Geoquímica) - Curso de Pós-graduação em Geociências, UFPA. Tese de mestrado, UFPA/CG.
- LEPRUN, J.-C. 1979. Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique Occidentale sèche. Genèse - transformations - dégradation. Science Géologiques Mémoire 58:1-223.
- LEVI, F. & MELFI, A. 1972. Geochemical and mineralogical studies and related rocks. Part 2. Geochemical study. Rev. Bras. Geoc. 2:1-7.
- LUCAS, Y. 1988. Systemes pedologiques en amazonie brésilienne. Equilibres, déséquilibres et transformations. Tese de doutorado, Université de Poitiers, Paris, 157p.
- LUCAS, Y.; CHAUVEL, A.; BOULET, R.; RANZANI, G.; SCATOLINI, F. 1984. Transição "latossolos-podzols" sobre a Formação Barreiras na região de Manaus, Amazonia. Rev. Bras. de Ciências do Solo, 8:325-335.
- LUCAS Y.; KOBILSEK, B.; CHAUVEL, A. 1989. Structure, genesis and present evolution of amazonian bauxites developed on sediments. In: INTERN. CONG. ICSOBA, 6, Poços de Caldas, 1989. Anais..., Poços de Caldas, Brazil, 22:81-94.
- MANCEAU, A. & CALAS, G. 1986. Nickel-bearing clay minerals, 2. Intracrystalline distribution of nickel: a x-ray absorption study. Clay Miner., 21:341-360.

- MARKER, A.; FRIEDRICH, G.; CARVALHO, A.; MELFI, A. 1989. Control of the distribution of Mn, Zn, Co, Cr, Zr, Ti and REE during the evolution of lateritic weathering covers above ultramafic rock complexes. In: CONG. BRAS. GEOQ., 2o., São Paulo, 1989. Anais...São Paulo, SBGQ, 30-32.
- MELFI, A. & LEVI, F. 1971. Geochemical and mineralogical study on the first stages of weathering of basic and related rocks. Part I. Mineralogical study. Rev. Bras. Geoc., 1:22-28
- MELFI, A. & FLICOTEAUX, R. 1993. Alteração intempérica das rochas vulcânicas do Arquipélago dos Abrolhos. In: CONG. BRAS. GEOQ., 4o., Brasília, 1993. Anais...Brasília, SBGq, 206-208.
- NAHON, D. 1976. Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs: géochimie, structures, relais et coexistence. Sci. Géol. Mém., 44:1-242p.
- NAHON, D. 1991. Introduction to the petrology of soils and chemical weathering. New York, John Wiley & Sons, 313p.
- NAHON, D.; JANOT, C.; PAQUET, H.; PARRON, C.; MILLOT, G. 1979. Epigénie du quartz et la kaolinite dans les accumulations et cuirasses ferrugineuses superficielles. La signification des goethites et hématites alumineuses. Sci. Géol. Bull., 32:165-180.
- NAHON, D.; MELFI, A.; CONTE, C.N. 1989. Présence d'un vieux système de cuirasses ferrugineuses latéritiques en Amazonie du Sud. Sa transformation in situ en latosols sous forêt équatoriale actuelle. C.R. Acad. Sci., 308:755-766.

- NEWMAN, A.C.D. & BROWN, G. .1987. The chemical constitutions of Clays. In: NEWMANN, A.C.D., ed. Chemistry of Clays and Clay Mineral. p. 1-128 (Mineralogical Society Monograph, 6).
- OLIVEIRA, S.M.B & VALENTE J.C.P. 1991. Mineralogia e geoquímica de um perfil de alteração a "stone-line". Evidências de autóctonia. In: CONG. BRAS. GEOQ., 3o., São Paulo, 1991. Anais...São Paulo, SBGq, p.36-38A.
- OLIVEIRA, S.M.B. & SILVA, M.L.M.C. 1990. Comportamento das terras raras em bauxitas derivadas da lateritização das rochas básicas. In: CONG. BRAS. GEOL., 36., Natal, 1985. Anais...Natal, SBG/NNE, vol 2, p. 912-919.
- OLIVEIRA, S.M.B., MELFI, A.J., CARVALHO, A., FRIEDRICH, G., MARKER, A.; KANIG, M. 1988. Lateritic evolution of the Jacupiranga Alkaline Complex, SP. Geoch. Bras., 2:119-126.
- PEREL'MAN A.I. 1967. Geochemistry of epigenesis. New York, Plenum Press, 267p.
- RANKIN, P.C. & CHILDS, C.W. 1976. Rare earth elements in iron-manganeses concretions from some New Zealand soils. Chem. Geol., 18:55-64.
- ROQUIN, C.; FREYSSINET, PH., ZEEGERS, H.; TARDY, Y. 1990. Element distribution patterns in laterites of southern Mali: consequence for geochemical prospecting and mineral exploration. Applied Geoch., 5:303-315.
- ROQUIN, C., FREYSSINET, Ph., NOVIKOFF, A. & TARDY, Y. 1993. Geochemistry of termitaria and soils covering ferricrete: application to gold exploration in western Africa. In: Eurolat, Berlin.

- SANTOS, E.A. 1994. Geoquímica multi-elementar de crostas e solos lateríticos da Amazônia Oriental. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1991. 241p. Tese (Doutorado em Geoquímica) - Curso de Pós-graduação em Geociências, UFPA.
- SHELLMANN, W. 1983. Geochemical principles of lateritic nickel ore formation. In: MELFI, A.J. & CARVALHO, A., eds. Lateritisation Processes, Proc. II. Int. Seminar on Lateritisation Processes, São Paulo, USP. p. 119-136
- SCHORIN, H. & PUCHELT, H. 1987. Geochemistry of a ferruginous bauxite profile from south east Venezuela. Chem. Geol., 64:127-142.
- SCHULZE, D. G. 1984. The influence of aluminum on iron oxides, VIII. Unit-cell dimensions of Al-substituted goethites and estimation of Al from them. Clays and Clay Minerals 32:36-44.
- SCHWERTMANN, U. 1983. The role of aluminium in iron oxides systems. In MELFI, A.J. & CARVALHO, A. eds, Lateritisation Processes, Proc. II. Int. Seminar on Lateritisation Processes, São Paulo, USP, p. 65-68.
- SCHWERTMANN, U.; GASSER, U. & STICHER, H. 1989. Chromium-for-iron substitution in synthetic goethites. Geoch. et Cosm. Acta., 53:1293-1297.
- SOMBROECK, W.G. 1966. Amazon soils. A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region. Centre Agric. Publ., Wageningen, 292 p.
- SUGDEN, D. 1984. The laterite-bauxite deposits of the Trombetas and Paragominas regions of the Amazon Basin. In: JACOB Jr., L. Bauxites. New York, Society of Mining Engineers. 370-386.

- TARDY, Y. 1993. *Péetrologie des latérites et des sols tropicaux*. Paris, Masson. 459p.
- TARDY, Y. & NAHON, D. 1985. Geochemistry of laterites, stability of Al-goethite, Al-hematite and Fe³⁺ kaolinite in bauxite and ferricretes: An approach to the mechanism of concretion formation. *Am. Jour. of Sci.*, 285: 865-903.
- TARDY, Y. & ROQUIN, C. 1992. Geochemistry and evolution of lateritic landscape. In: MARTINI, I.P. & CHESWORTH, W. eds. *Developments in earth surface processes* 2. Amsterdam, Elsevier. 407-443.
- TARDY, Y.; KOLBISEK, B.; PAQUET, H. 1991. Mineralogical composition and geographical distribution of African and Brazilian periatlantic laterites. The influence of continental drift and tropical paleoclimates during the past 150 million years and implications for India and Australia. *Jour. African Earth Sci.*, 12:283-295.
- THOMAS, M.F. 1974. *Tropical geomorphology: A study of weathering and landform development in warm climates*. London, Macmillan Press. 332p.
- TRUCKENBRODT, W. & KOTSCHOUBEY, B. 1981. Argila de Belterra - Cobertura terciária das bauxitas amazônicas. *Rev. Bras. Geol.*, 11(3):203-208.
- TRUCKENBRODT, W., KOTSCHOUBEY, B. E GÓES, A.M. - 1982 - Considerações a respeito da idade das bauxitas na parte leste da região Amazônica. In: SIMP. GEOL. AMAZ., I, Belém - PA, 1982, ANAIS...SBG, 1:201-209.

- TRUCKENBRODT, W.; KOTSCHOUBEY, B. & SCHELLMANN, W. 1991.
Composition and origin of the clay cover on north brazilian
laterites. *Geologische Rundschau*, 80:591-610.
- VALETON, I. 1972. *Bauxites*. Amsterdam, Elsevier. 226 p.
- YARIV, S. & CROSS, H. 1979 . *Geochemistry of colloid systems*.
Berlin, Springer-Verlag. p. 450.
- WELCH, S.A. & ULLMAN, W.J. 1993. The effect of organic acids on
plagioclase dissolution reates ans stoichiometry. *Geochim. et
Cosmochim. Acta.*, 57:2725-2736.
- WESOLOWSKI, D.J. 1992. Aluminum speciation andd equilibria in
aqueous solution, I. The solubility of gibbsite in the system
Na-K-Cl-OH-Al(OH)₃ from 0 to 100 C. *Geochim et Cosmochim.
Acta.*, 56:1065-1091.
- WOLF, F.A.M. & SILVA, J.M.R. 1973. *Província bauxitífera da
Amazônia*. DNPM, 5 distrito, Belém, Pará, Brasil, 35p,
(inédito).

ANEXOS

ANEXO 2 - PERFIS DO IGARAPÉ BAHIA

Tabela 1: Análise de microsonda na crosta parcialmente intemperizada do perfil 2 do Igarapé Bahia (A) (% em peso)

Amostra	11	12	13	14	15	16	1
SiO ₂	26.95	25.28	21.92	23.61	17.11	24.77	
Al ₂ O ₃	29.57	28.51	27.48	19.82	14.70	19.60	
Fe ₂ O ₃	20.63	21.10	24.06	47.50	53.41	44.21	

Tabela 2: Análise de microsonda na crosta parcialmente intemperizada do perfil 2 do Igarapé Bahia (B) (% em peso)

Amostra	11	12	13	14	15	16	17	18	19	110	1
SiO ₂	13.22	18.41	24.19	16.94	17.20	18.22	10.75	0.56	2.51	21.60	
Al ₂ O ₃	22.61	25.71	24.24	18.46	26.87	18.43	10.79	0.45	4.91	23.35	
Fe ₂ O ₃	24.50	23.55	32.71	43.41	22.64	38.33	55.42	88.16	63.65	19.50	

Tabela 3: Concentração dos elementos-traço nos materiais que constituem os relictos da crosta parcialmente intemperizada (ppm)

	V	Cr	Ni	B	Mo	Zr	Ga	Y	Sc	Mn	Cu	Pb
Plasma internodular	400	300	100	120	60	375	50	20	36	315	90	54
Plasma internodular	320	225	120	184	44	610	48	86	51	1000	172	28
Plasma internodular	230	250	103	120	10	360	33	15	25	178	48	54
Plasma internodular	480	1000	192	128	90	640	60	104	68	1560	500	106
Plasma internodular	235	62	54	160	20	195	20	14	19	350	148	87
Nódulo	195	400	70	33	36	200	39	110	21	50	120	56
Nódulo	320	320	73	110	54	280	28	110	27	325	70	110
Nódulo	450	370	112	280	58	830	63	110	66	1120	190	70
Nódulo	330	160	155	110	33	295	32	14	37	145	79	124
Nódulo	415	365	78	190	72	215	33	24	34	550	130	87

Tabela 4: Fatores de enriquecimento do perfil 1 do Igarapé Bahia

AMOSTRA	SiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	TiO2	PF	V	Cr	Ni	B	Mo	Zr	Ga	Y	Sc	Mn	Cu	Pb	Au
SOLO (0,3m)	-0,06	-0,63	-0,77	1,10	0,00	-0,53	-0,77	-0,78	-0,93	-0,91	-0,94	-0,32	-0,78	-0,76	-0,08	-0,83	-0,99		-0,96
LINHA DE PEDRA (2,0m)																			
Matriz argilosa	0,26	-0,59	-0,74	-0,17	0,00	-0,50	-0,76	-0,81	-0,91	-0,86	-0,94	-0,14	-0,78	-0,71	-0,79	-0,82	-0,99	-0,32	-0,98
CROSTA INTENPERIZADA (6,0m)																			
Matriz argilosa	0,90	-0,54	-0,71	-0,06	0,00	-0,49	-0,71	-0,67	-0,89	-0,84	-0,92	-0,23	-0,63	-0,68	-0,72	-0,79	-0,99	0,22	-0,97
CROSTA INTENPERIZADA (9,0m)																			
Matriz argilosa	0,34	-0,69	-0,76	-0,54	0,00	-0,67	-0,77	-0,81	-0,86	-0,85	-0,94	-0,35	-0,77	-0,72	-0,77	-0,79	-0,99	0,20	-0,97
CROSTA INTENPERIZADA (12,0m)																			
Matriz argilosa	0,78	-0,45	-0,34	-0,40	0,00	-0,34	-0,31	-0,36	0,21	-0,32	-0,73	0,14	-0,40	-0,28	-0,43	-0,27	-0,83	2,38	-0,76
NETAPELITO LATERITIZADO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 5: Fatores de enriquecimento do perfil 2 do Igarapé Bahia

HORIZONTE	SiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	TiO2	PF	V	Cr	Ni	Mo	Zr	Ga	Y	Sc	Mn	Cu	Pb	Au	NV
SOLO																			
Matriz argilosa	-0,46	-0,09	-0,87	-0,98	0,00	-0,52	-0,72	-0,77	-0,88	-0,92	0,26	-0,65	-0,41	-0,70	-0,90	-0,93	-0,92	-0,90	-0,72
CROSTA P. INTENPERIZADA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

NV= Modificação de volume

Tabela 6: Fatores de enriquecimento no perfil 3 do Igarapé Bahia

HORIZONTE	Densidade	SiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	TiO2	PF	V	Cr	Ni	B	Mo	Zr	Ga	Y	Sc	Mn	Cu	Pb
SOLO	2,9918	-0,72	-0,71	-0,82	-0,46	0,00	-0,36	-0,83	-0,80	-0,45	-0,62	-0,89	-0,50	-0,65	-0,79	-0,79	-0,80	-0,85	-0,79
SOLO	2,8760	-0,72	-0,34	-0,82	-0,72	0,00	-0,40	-0,76	-0,70	-0,74	-0,68	-0,83	-0,25	-0,68	-0,68	-0,76	-0,80	-0,83	-0,78
CROSTA P. INTENPERIZADA	3,7956	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Continuação da tabela 6

HORIZONTE	Au	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	Modif de volume
SOLO	-0,95	-0,73	-0,70	-0,64	-0,64	-0,59	-0,56	-0,59	-0,59	-0,49	-0,37	-0,37	-0,62
SOLO	-0,92	-0,70	-0,66	-0,68	-0,65	-0,65	-0,69	-0,76	-0,78	-0,77	-0,71	-0,72	-0,61
CROSTA P. INTENPERIZADA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

ANEXO 3 - PERFIL DE CAMOAÍ

Tabela 1: Análises de microsonda no perfil de Camoaí (% em peso)

Local	11	12	13	14	15	16	17	18	19
----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----									
Crosta Parcialmente Intemperizada (A-A')									
SiO2	7.84	9.22	1.00	0.06	0.06	12.22	8.59	1.11	
Al2O3	60.12	58.91	65.70	65.60	65.80	39.90	48.95	60.80	
Fe2O3	0.95	1.30	0.14	0.10	0.08	7.15	2.74	3.31	
Crosta Intemperizada (B-B')									
SiO2	23.36	2.27	6.20	30.04	34.34	17.93	3.86	0.07	26.75
Al2O3	46.01	63.10	9.80	33.09	33.15	52.00	65.40	65.60	29.06
Fe2O3	1.09	2.54	57.96	3.04	3.17	1.81	0.51	0.27	10.86

Tabela 2: Concentração dos elementos-traço nos relictos de crosta (ppm)

	V	Cr	Ni	B	Mo	Zr	Ga	Y	Sc	Mn	Cu	Pb
Matriz argilosa	98	214	28	22	(5	540	64	54	21	90	28	70
Matriz argilosa	134	230	42	20	7	1980	57	94	25	112	62	28
Fácies creme	116	200	40	(10	(5	1040	56	36	6	(10	14	20
Fácies creme	112	200	47	(10	(5	960	56	41	20	12	14	36
Fácies rosado	90	220	32	(10	(5	380	49	22	10	(10	22	(10
Fácies rosado	126	245	26	(10	(5	760	55	41	15	(10	11	176
Nodulo ferruginoso	960	1460	132	(10	140	1560	100	90	34	10	36	70

Tabela 3: Fatores de enriquecimento do perfil de Camoaí

HORIZONTES	Densidade	SiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	PF	V	Cr	Ni	Zr	Ga	Y	Mn	Cu	Pb	Modif de volume
SOLO(0,3m)	2,5168	3,71	-0,23	4,67	1,51	-0,24	4,03	0,08	0,53	2,31	0,37	2,28	3,86	0,82	-0,73	0,26
SOLO(1,8m)	2,4233	1,59	-0,56	2,35	0,51	-0,44	0,57	-0,21	-0,06	-0,65	-0,16	0,71	1,86	0,45	-0,82	-0,21
CROSTA INTEMPERIZADA(2,0m)																
Matriz argilosa	2,5247	0,60	-0,68	1,73	-0,76	-0,74	0,48	-0,62	-0,56	3,09	-0,54	-0,57	2,37	0,90		-0,51
Relicto de crosta	2,7393	-0,55	-0,15	6,08	-0,58	-0,15	1,90	1,40	-0,16	4,18	0,08	0,77	-0,15			-0,19
CROSTA PARCIALMENTE INTEMPERIZADA(3,1m)																
Matriz argilosa	2,3287	2,78	-0,25	4,70	0,66	-0,32	-0,37	-0,12	0,19	-0,01	0,30	-0,39	-2,08	0,66	-0,74	0,24
Relicto de crosta	2,4324	-0,88	0,09	6,14	-0,42	0,08	0,15	0,25	-0,19	0,99	0,30	1,02	0,15		-0,78	0,24
CROSTA Sã(4,5m)	2,6106	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

(0,3m) profundidade em relação ao topo do perfil

Tabela 3: Fatores de enriquecimento do perfil de Mosqueiro

Horizonte	Densidade	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	PF	V	Cr	Ni	B	Zr	Ga	Y	Sc	Mn	Cu	Pb
Solo cinza(0,15m)	2,45	-0,31	-0,59	-0,97	0,32	-0,55	-0,92	-0,80		-0,07	2,34	-0,70	-0,38	-0,71	-0,75		
Solo(0,60m)	2,71	-0,23	-0,45	-0,91	-0,49	-0,46	-0,83	-0,79	-0,86	-0,25	3,96	-0,63	-0,05	-0,62	-0,32	-0,75	-0,88
(0,80m)	2,22	-0,47	-0,24	-0,93	-0,18	-0,41	-0,94	-0,73	-0,86	-0,32	1,00	-0,59	-0,29	-0,67	-0,50	-0,38	-0,82
(1,15m)	2,85	-0,31	-0,03	-0,90	0,07	-0,27	-0,92	-0,61	-0,82	-0,15	1,87	-0,56	-0,13	-0,57	-0,58	3,42	0,75
(1,50m)	2,32	-0,41	-0,08	-0,87	-0,52	-0,30	-0,91	-0,55	-0,77	-0,23	0,65	-0,56	-0,23	-0,56	-0,78	-0,76	-0,68

ANEXO 5 - ANÁLISE FATORIAL MODO Q

Correlação entre as cargas dos fatores e as variáveis

	Fator I	Fator II	Fator III
Quartzo	-.74	.92	-.47
Caolinita	-.37	.30	.36
Gibbsita	.13	-.56	.63
Goethita+hematita	.91	-.71	-.35
Anatásio	.16	-.23	.21
SiO ₂	-.83	.99	-.32
Al ₂ O ₃	.11	-.16	-.22
Fe ₂ O ₃	.91	-.71	-.36
FeO	.34	-.31	-.38
TiO ₂	.39	-.45	.57
PF	.13	-.59	.89
V	.72	-.45	-.02
Cr	.52	-.42	.00
Ni	.52	-.49	-.29
B	.30	-.22	-.06
Mo	.53	-.47	-.35
Zr	-.22	.33	-.14
Ga	.52	.65	.61
Y	.35	-.28	-.30
Sc	.77	-.59	.04
Mn	.70	-.60	-.31
Cu	.31	-.28	-.20
Pb	.30	-.38	.01

Correlação entre os fatores e as amostras

FATOR I FATOR II FATOR III

Perfil 1 de N5

Solo	.65	.05	.65
Crosta intemperizada	.79	.29	.41
Matriz argilosa	.64	.34	.62
Relicto	.82	.18	.31
Crosta p. intemperizada	.76	.20	.51
Crosta sã	.85	.22	.30

Perfil 2 de N5

Solo	.63	.19	.69
Solo	.69	.17	.64
Crosta intemperizada			
Matriz argilosa	.69	.15	.59
Relicto	.85	.16	.32
Crosta p. intemperizada	.83	.17	.31
Crosta sã	.82	.18	.35

FATOR I FATOR II FATOR III

Perfil 1 do Igarapé Bahia

Solo	.71	.14	.56
Crosta intemperizada (2,0m)			
Matriz argilosa	.74	.17	.56
Metapelito lateritizado	.72	.15	.55
Gossan	.75	.05	-.10
Crosta intemperizada (6,0m)			
Matriz argilosa	.73	.19	.58
Gossan	.81	.05	-.16
Crosta intemperizada (9,0m)			
Matriz argilosa	.75	.18	.49
Metapelito lateritizado	.85	.23	.34
Gossan	.84	.04	-.14
Crosta intemperizada (12,0m)			
Matriz argilosa	.79	.11	.27
Metapelito lateritizado	.78	.07	.22

Perfil 2 do Igarapé Bahia

Solo			
Matriz argilosa	.77	.21	.55
Metapelito lateritizado	.84	.12	.11
Crosta p. intemperizada	.88	.08	.05

Perfil 3 do Igarapé Bahia

Solo	.61	.14	.51
Solo	.74	.20	.60
Crosta p. intemperizada	.91	.19	.25

Perfil de Camoaí

Solo	.33	.48	.70
Solo	.24	.43	.81
Crosta intemperizada			
Matriz argilosa	.24	.45	.76
Relicto	.27	.02	.83
Crosta p. intemperizada			
Matriz argilosa	.14	.40	.76
Relicto	.20	.11	.89
Crosta sã	.16	.01	.80

FATOR I FATOR II FATOR III

Perfil de Outeiro

Solo cinza	.07	.91	.06
Solo amarelo	.03	.94	.07
Solo amarelo	.01	.93	.06
Solo amarelo	.07	.94	.18
Solo amarelo	.09	.93	.21
Crosta intemperizada			
Matriz argilosa	.11	.90	.14
Relicto	.41	.81	.19
Crosta p. intemperizada			
Matriz argilosa	.11	.95	.05
Relicto	.50	.89	.10

Perfil de Mosqueiro

Solo cinza	.11	.95	.09
Solo	.19	.90	.10
Solo	.18	.93	.27
Solo	.18	.93	.23
Solo	.23	.92	.28
Solo	.18	.95	.21
Crosta sã	.55	.64	.08