



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

**PROSPECÇÃO GEOQUÍMICA E MAPEAMENTO DE
REGOLITO NA REGIÃO DE CARAJÁS, ESTADO DO
PARÁ.**

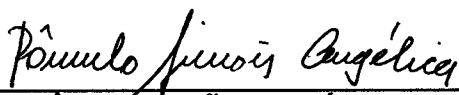
TESE APRESENTADA POR

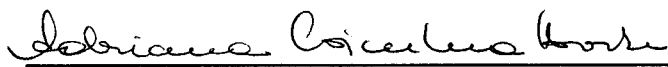
CARLOS AUGUSTO DE MEDEIROS FILHO

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em
Ciências na Área de GEOQUÍMICA E PETROLOGIA.

Data de Aprovação: **16 /12 / 2002**

Comitê de Tese:


RÔMULO SIMÕES ANGÉLICA (Orientador)


ADRIANA MARIA COIMBRA HORBE


PAULO MARCOS DE PAULA VASCONCELOS

Belém

A Natalina, Nathalia e Antônio,
pelas provas de amor, apoio e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer as seguintes pessoas e instituições que participaram direta ou indiretamente neste trabalho:

A Companhia Vale do Rio Doce, pela permissão em trabalhar e utilizar os dados das áreas Jaca, Guarujá e Paulo Afonso e pelo apoio fornecido durante todas as etapas deste trabalho.

Ao Centro de Geociências e Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica da UFPA pela possibilidade em desenvolver essa mestrado.

Ao Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica, pela orientação neste trabalho, traduzida por constantes ensinamentos científicos, incentivos e demonstrações de amizade.

Aos examinadores deste trabalho: Profa. Dr Adriana Horbe e Prof. Dr. Paulo Vasconcelos, pelas críticas e sugestões apresentadas.

A equipe do Projeto Itacaiúnas: Benvindo, Café, Cantão, Daniel, Gerson, Leonardo, Meira, Osvaldo, Otávio, Tininho, Sales, Vicente e Wellington, pelo incentivo, apoio técnico e constantes provas de companheirismo. Um agradecimento especial ao técnico Luiz Cantão pelo importante auxílio técnico nas atividades de campo e escritório durante todo o decorrer do trabalho.

Ao geólogo Cláudio Magalhães, pelo incentivo e apoio a este trabalho.

Ao geólogo Anselmo Soares, pelo apoio na fase final deste trabalho.

Ao geólogo Monte Lopes, pela orientação técnica, críticas, sugestões e, especialmente, pelo incentivo ao desenvolvimento desse trabalho.

A José Luiz Souza pelo apoio na confecção do abstract.

SUMÁRIO

	Pag.
DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	v
RESUMO	01
ABSTRACT	05
1. INTRODUÇÃO	09
1.1 APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS.....	09
1.2 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS DA GEOLOGIA REGIONAL.....	11
1.3 METODOLOGIA.....	15
2. MAPEAMENTO DE REGOLITOS E SUA IMPORTÂNCIA PARA EXPLORAÇÃO GEOQUÍMICA-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 INTRODUÇÃO.....	17
2.2 DISTRIBUIÇÃO DOS REGOLITOS E SIGNIFICADOS PARA EXPLORAÇÃO.....	17
2.3 MAPEAMENTO DE REGOLITO.....	19
2.4 GLOSSÁRIO.....	21
3. GEOMORFOLOGIA E GEOLOGIA SUPERGÊNICA DAS ÁREAS	23
3.1 INTRODUÇÃO.....	23
3.2 GEOMORFOLOGIA.....	25
3.2.1 Geomorfologia da região de Carajás.....	25
3.2.2 Geomorfologia das áreas.....	29
3.3 GEOLOGIA DOS REGOLITOS.....	35
3.3.1 Latossolos.....	36
3.3.2 Crosta desmantelada.....	43
3.3.3 Zona de transição.....	47
3.4 DISTRIBUIÇÃO MINERALÓGICA AO LONGO DO PERFIL.....	48
3.5 DISCUSSÕES.....	56
3.5.1 Perfil de intemperismo.....	56
3.5.2 Geomorfologia.....	62
3.5.3 Latossolo.....	64
4. GEOQUÍMICA	69
4.1 INTRODUÇÃO.....	69
4.2 ANÁLISE DE DISPERSÃO GEOQUÍMICA NO PERFIL DE.. INTEMPERISMO - AMOSTRAS DE SUPERFÍCIE.....	71
4.2.1 Guarujá.....	71
4.2.2 Jaca.....	77

4.2.3 Paulo Afonso.....	79
4.2.4 Dispersão geoquímica no perfil de intemperismo -integração entre áreas - amostras de superfície.....	81
4.3 DISPERÇÃO GEOQUÍMICA NO PERFIL DE INTEMPERISMO AMOSTRA DE TRADO.....	87
4.4 ANÁLISE FATORIAL - AMOSTRAS DE SUPERFÍCIE.....	91
4.5 DISCUSSÕES.....	93
4.5.1 Aspectos gerais do comportamento geoquímica dos elementos no perfil de intemperismo	93
4.5.2 Análise conjunta das áreas. Estilos de comportamento dos elementos no perfil de intemperismo.....	94
4.5.3 Comparação dos dados geoquímicos com outras áreas	97
4.5.4 Dados geoquímicos das áreas estudadas e evolução do perfil de intemperismo.....	99
4.5.5 Mapas geoquímicos. Implicações na exploração geoquímica.....	102
5. EVOLUÇÃO DA PAISAGEM.....	110
5.1 INTRODUÇÃO.....	110
5.2 CLIMA DE CARAJÁS.....	111
5.3 PALEOLCIMA.....	113
5.3.1 Introdução.....	113
5.3.2 Mesozóico.....	114
5.3.3 Cenozóico.....	115
5.4 GEOCRONOLOGIA DE INTEMPERISMO.....	117
5.4.1 Introdução.....	117
5.4.2 Datação por K - Ar e $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$	117
5.4.3 Paleomagnetismo.....	120
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	122
6. CONCLUSÕES.....	128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS	Pag.
Figura 1.1 Mapa planimétrico de localização das áreas trabalhadas.....	12
Figura 1.2 Mapa geológico regional	13
Figura 2.1 Relação entre regimes regolíticos – formas de relevo e modelos geoquímicos	20
Figura 3.1 Imagem de radar. Relevo de Carajás e localização das áreas trabalhadas	24
Figura 3.2 Vista aérea da região de Carajás	25
Figura 3.3 Vista do perfil laterítico da Superfície Velhas	28
Figura 3.4 Superfície Velhas apresentando relativo destaque topográfico.....	29
Figura 3.5 Imagem de radar. Área Guarujá com indicação da malha de amostragem	30
Figura 3.6 Imagem de radar. Área Jaca com indicação da malha de amostragem...32	32
Figura 3.7 Imagem de radar. Área Paulo Afonso com indicação da malha de amostragem	34
Figura 3.8 Perfis esquemáticos de intemperismo das áreas trabalhadas	36
Figura 3.9 Mapa de regolito. Área Guarujá	38
Figura 3.10 Seção dos horizontes de regolitos (trado mecânico) – LT 200 SW. Área Guarujá.	39
Figura 3.11 Seção dos horizontes de regolitos (trado mecânico) – LT 1200 SW. Área Guarujá.	40
Figura 3.12 Mapa de regolito. Área Jaca	41
Figura 3.13 Mapa de regolito. Área Paulo Afonso	42
Figura 3.14 Contato entre a crosta desmantelada (CD) e latossolo (LS).....	44
Figura 3.15 Amostragem de furo de trado	44
Figura 3.16 Distribuição mineralógica do perfil do furo F-17	50

Figura 3.17	Distribuição mineralógica do perfil do furo FT-44	53
Figura 3.18	Distribuição mineralógica do perfil do furo FT-73	55
Figura 3.19	Diagrama apresentando a paisagem geral e os perfis de intemperismo relacionados a modelos de alteração recente de grau baixo a moderado	59
Figura 3.20	Diagrama apresentando a paisagem geral e perfis de intemperismo relacionados a modelos submetidos a alteração recente de grau forte	60
Figura 3.21	Perfil esquemático de <i>duricrust</i> em zona de savana e sua transformação para gravelly latosols em clima tropical úmido	61
Figura 3.22	Diagrama mostrando relações entre formas de relevo e regolito no cráton de Yilgarn, W.A. Western Australia.....	63
Figura 3.23	Mapa topográfico Guarujá II com seções dos horizontes de regolitos ...	67
Figura 4.1	Área Guarujá – dispersão geoquímica no perfil de intemperismo	76
Figura 4.2	Área Jaca – dispersão geoquímica no perfil de intemperismo	78
Figura 4.3	Área Paulo Afonso – dispersão geoquímica no perfil de intemperismo	80
Figura 4.4	Perfis geoquímicos de Al, As, Au, Ba, Ca, Co, Cr, Cu e Fe nas áreas trabalhadas	82
Figura 4.5	Perfis geoquímicos de La, Mg, Mn, Ni, Pb, Sb, Ti, V e Zn nas áreas trabalhadas	85
Figura 4.6	Perfis geoquímicos de Al, Fe, Cr e Mn em furos de trado mecânico, na área Guarujá	89
Figura 4.7	Diagramas de correlações. área Jaca	104
Figura 4.8	Mapa geoquímico de Mn da área Jaca (zona de transição e latossolo)	105
Figura 4.9	Mapa geoquímico de Al da área Jaca (zona de transição e latossolo)	106
Figura 4.10	Mapa geoquímico de Cr da área Jaca (zona de transição e latossolo)	108
Figura 4.11	Mapa geoquímico de Cr da área Jaca (zona de transição, latossolo e crosta desmantelada)	109

Figura 5.1 Precipitações pluviométricas anuais em Carajás, no período de 1968 a 2000	112
Figura 5.2 Precipitações pluviométricas médias mensais em Carajás, correspondendo o período de 1968 a 2000	112
Figura 5.3 Precipitações pluviométricas médias, em Carajás, a cada de três anos, a partir de 1968 até 2000	113
Figura 5.4 Comparação, em relação ao tempo geológico, das formações do Escudo das Guianas, paleosuperfícies da América do Sul, drenagem continental global, datações de lateritização em Carajás e síntese de datações paleomagnéticas	122
Figura 5.5 Distribuição através do tempo dos episódios de intemperismo; idades paleomagnéticas do Escudo das Guianas; perfis lateríticos de Carajás, principal evento de erosão e paleosuperfícies	127

TABELAS

Pag.

Tabela 4.1 Quantitativo das amostras coletadas	69
Tabela 4.2 Sumário estatístico área Guarujá	72
Tabela 4.3 Sumário estatístico área Jaca	73
Tabela 4.4 Sumário estatístico área Paulo Afonso	74
Tabela 4.5 Matriz de fator	92

RESUMO

Mapeamento de regolitos e prospecção geoquímica de solos foram desenvolvidas em três áreas na Província Mineral de Carajás, denominadas Guarujá (24 km²), Jaca (15 km²) e Paulo Afonso (15 km²). Amostras superficiais de regolitos foram coletadas, atingindo um total de 2763 amostras no Guarujá, 1641 no Jaca e 1767 no Paulo Afonso. Trabalhos de sondagem rasa, através de trado mecânico, foram desenvolvidos numa porção da área Guarujá.

A geologia da área Jaca é constituída por metassedimentos da Formação Águas Claras, com diques gabróicos subordinados. A maior parte da área Guarujá é composta por metassedimentos da Formação Águas Claras, tendo uma porção menor de rochas do Grupo Pojuca e granitóides intrusivos. A área Paulo Afonso apresenta, a norte, uma seqüência de xistos e formações ferríferas e, a sul, gnaisses, granitóides, xistos e formações ferríferas.

A geomorfologia das áreas Guarujá e Jaca possuem características relativamente semelhantes, sendo dominadas por feições elevadas do tipo platô e de porções mais rebaixadas, planas a onduladas. A área Paulo Afonso é representada por terrenos arrasados, planos a ondulados, com serras e platôs relativamente restritos. A parte superior dos platôs, nas três áreas, tem, sempre, cota superior a 550 m, sendo caracterizada por uma superfície relativamente plana, que passa, em direção a base, para terrenos com declividade inicialmente suave e, posteriormente, muito acentuada. Os platôs das áreas Guarujá e Jaca devem representar registros da Superfície Sul-Americana, modificada por eventos erosivos e intempéricos posteriores à sua formação. Por outro lado, o platô da área Paulo Afonso seria um testemunho da Superfície Sul-Americana dentro de um domínio de terrenos de baixo relevo da Superfície Velhas. O estudo conjunto das características dos relevos das áreas permitiu a definição de cinco regimes geomorfológicos : a) regime de topo de platô; b) regime de encosta suave; c) regime de encosta abrupta; d) regime plano de baixo relevo; e) regime de planície de inundação. Esses tipos de regimes guardam uma relação direta com os horizontes regolíticos aflorantes e auxiliam na interpretação dos materiais amostrados, quanto aos aspectos de ser residual, transportado ou uma mistura semi-residual.

Foram definidos e individualizados, nas áreas estudadas, quatro horizontes regolíticos maiores, acima da rocha sã : saprolito, zona de transição, crosta desmantelada e latossolo. Na zona central do regime de platô o perfil de intemperismo é normalmente completo, enquanto que nos regimes de encostas e de baixo relevo, este perfil torna-se truncado pela erosão dos dois horizontes mais superiores. O horizonte de latossolo é constituído por material argiloso fino, inconsolidado, aspecto plástico e textura homogênea. Ocorre exclusivamente no regime de platô com espessura atingindo até 10 m. O horizonte de crosta desmantelada apresenta espessura média de 3 m, é composta por fragmentos e blocos, centimétricos a decimétricos, e concreções, milimétricas a centimétricas, envolvidas por uma matriz argilosa. Os fragmentos maiores costumam se concentrar na base desse horizonte (nível de fragmentos), havendo, normalmente, uma diminuição do tamanho em direção ao topo, onde fica caracterizada um nível de concreções. Esse horizonte é interpretado como originado por processo de desmantelamento, principalmente por intemperismo químico, de uma crosta anterior mais endurecida (*duricrust*). O horizonte de zona de transição é composto por solos arenosos a argilosos, de coloração variadas, com caráter homogêneo a localizadamente mosqueado e apresentando fragmentos de saprolitos e lito-relictos, envolvidos pelo solo, que aumentam em quantidade e tamanho em direção à base. O contato com o horizonte de saprolito é, normalmente, difuso e definido a partir do predomínio de feições saprolíticas sobre as pedolíticas. Análise mineralógica por difração de raios-X de alguns perfis de furos de trado mostra que os três horizontes superiores são representados por proporções variáveis de óxidos e hidróxidos de ferro, caulinita, gibbsita e quartzo. O horizonte de zona de transição mostra, normalmente, caulinita como mineral mais representativo. Na crosta desmantelada existe sempre um domínio de hematita, enquanto que o horizonte de latossolo é caracterizado pela queda no grau de cristalinidade dos minerais, especialmente caulinita e hematita.

A amostragem do material regolítico aflorante resultou numa quantidade representativa de amostras dos horizontes de zona de transição, crosta desmantelada e latossolo, nas três áreas trabalhadas. Foi efetuada análise multielementar para 18 elementos. A média para cada elemento, nos três horizontes amostrados e nas três áreas, foi calculada com o intuito de se estudar o comportamento dos elementos ao longo do perfil de intemperismo. O comportamento individual dos elementos, ao longo do perfil de

intemperismo, mostra, normalmente, diferenças nítidas dos seus valores médios nos três meios amostrais ou apresenta um valor claramente mais forte ou fraco em um determinado horizonte. A análise conjunta das áreas permite separar os elementos em três distintos padrões ou estilos de comportamentos geoquímicos : a) Estilo 1 – corresponde a um grupo de elementos que apresenta nítido enriquecimento no horizonte de crosta desmantelada, sendo representados por Fe, Cr, V, Sb, Ti, As, Co, Pb, Zn e Au b) Estilo 2 – corresponde a um grupo de elementos que apresenta valores mais elevados no horizonte de zona de transição (Ca, Ba, Mg, Mn, Cu, Ni e La); c) Estilo 3 – corresponde ao comportamento do Al que mostra valor médio nitidamente mais elevado no horizonte de latossolo. Esses estilos de comportamento foram reforçados pelas análises de fatores principais desenvolvidas nas três áreas trabalhadas e pelos dados geoquímicos provenientes de sondagens rasas efetuadas no platô da área Guarujá.

O comportamento heterogêneo dos elementos ao longo do perfil de intemperismo leva a importantes implicações em todas as fases de um programa de exploração. Os elementos apresentam, normalmente, diferentes escalas de *background* e *thresholds* nos três ou, em pelo menos, dois horizontes, implicando na existência de distintas populações geoquímicas que devem ser consideradas no processo de confecção e interpretação de mapas geoquímicos. O entendimento do comportamento geoquímico do elemento-alvo, em um programa de exploração, pode permitir a seleção do seu melhor meio amostral. Na impossibilidade de se coletar um único meio amostral, recomenda-se um tratamento estatístico diferenciado para cada população geoquímica. Salienta-se, entretanto, que existem casos que um horizonte regolítico pode se tornar um meio amostral inviável devido a uma grande homogeneização de valores (falta de contraste) ou a um empobrecimento acentuado dos resultados geoquímicos. Essas considerações tornam os processos de mapeamento de regolitos e de regimes geomorfológicos fundamentais e imprescindíveis em qualquer programa de prospecção geoquímica. Os dados geoquímicos obtidos neste trabalho podem, também, sinalizar um *trend* comportamental dos elementos estudados para região de Carajás, especialmente nas áreas de platôs da Superfície Sul-Americana.

Perfis regionais de mapeamentos de regolitos, desenvolvidos neste trabalho, associados com pesquisa bibliográfica, permitiu discutir aspectos da evolução da paisagem em Carajás. Ao final foram listadas algumas observações consideradas importantes, para a

elaboração de um modelo evolutivo dessa paisagem : a) as fases de lateritização mais importantes registradas em Carajás, compreendem o Cretáceo Superior, Eoceno Inferior, Eoceno Superior, Mioceno e Recente; b) Os perfis lateríticos da Serra dos Carajás (Superfície Sul-Americana) estão expostos ao intemperismo desde o final do Cretáceo; c) A ausência de idades anteriores a 70 Ma podem revelar que os perfis mais antigos foram erodidos antes do Cretáceo ou que o intemperismo do final do Cretáceo foi suficientemente pervasivo para apagar todos os registros anteriores; d) Análise de dados geocronológicos e paleoclimáticos indicam que, condições climáticas no Oligoceno possibilitaram a atuação de expressivo ciclo de erosão, levando a geração da Superfície Velhas, a partir da dissecação de grande parte da Superfície Sul-Americana. Essa erosão foi controlada, em parte, por fatores geológicos e estruturais; e) No Mioceno foram retomadas condições climáticas para nova fase de intemperismo, que atuou sobre os perfis lateríticos remanescentes e fez desenvolver o perfil laterítico sobre a Superfície Velhas.

ABSTRACT

Regolith mapping and soil geochemical prospecting were carried out in three areas in the Carajás Mineral Province, southeast of Pará State, named as follow: Guarujá (24 km²), Jaca (15 km²) and Paulo Afonso (15 km²). Surface regolith samples had been collected, reaching a total of 2763 samples in the Guarujá area, 1641 in the Jaca area and 1767 in Paulo Afonso area. Shallow drill cores were also carried out in a portion of the Guarujá area.

The geology of the Guarujá area is constituted by metasediments of the Águas Claras Formation, with subordinate gabbros bodies with a lesser portion of rocks from the Pojuca Group and intrusive granitoids. The Paulo Afonso area exhibits a sequence of shales and iron formations in the north and gneisses, granitoids, shales and iron formations to the southern part.

The geomorphology of the Guarujá and Jaca areas is represented by relatively similar characteristics dominated by plateaus, and portions more lowered, plain and the waved ones. Lowered, plain lands and the waved ones, with relatively restricted mountain ranges and plateaus represent the Paulo Afonso area. In the three areas, the upper part of the plateaus has always its highest altitudes above 550 m. They are characterized by a relatively plain surface that passes toward the base to slopes with initially gently to more accentuated declivity.

The plateaus of the Guarujá and Jaca areas should represent records of the Sul-Americana Surface, modified by further erosion and weathering events. On the other hand, the plateau of the Paulo Afonso area would be a record of the Sul-Americana Surface that rests inside low relief lands (Velhas Surface). Five geomorphologic regimes could be defined according to the relief characteristics of the different areas: a) Top Plateau; b) soft slope; c) abrupt slope; d) plain regime of low relief; e) flooding plain regime. These kinds of regimes keep to a direct relation with outcropping regolith horizons and help in the interpretation of sampled materials concerning their residual (autochthonous), transported (allochthonous) or semi-residual character.

Four main regolith horizons (above fresh rock) had been defined and individualized in the studied areas, from base to top: saprolite, transition zone, dismantled

iron crust and latosol. In the central zone of the plateau regime the weathering profile is usually complete, while in the slopes and low relief regimes it becomes truncated by erosion of the two upper horizons. The latosol horizon is mainly composed by fine argillaceous and unconsolidated material with plastic aspect and homogeneous texture. It occurs exclusively in the plateau regime with thickness reaching up to 10m. The dismantled iron crust horizon averages 3 m thickness and is composed by iron rich fragments, blocks and concretions involved by a clayey matrix. The biggest fragments usually concentrate in the bottom of the horizon (fragments' level), decreasing toward to the top (concretions' level). The iron crust horizon is herein interpreted as originated from a dismantling process, mainly chemical weathering, of a previous hardened crust horizon (duricrust). The transition horizon zone is composed by sandy-clayey soils of varied colors, with homogeneous to mottled character that encompasses abundant saprolite and lithorelicts fragments, which increase in amount and size toward the bottom. The lower contact with the saprolite horizon is normally diffuse and is defined by the predominance of saprolite features upon the pedolitic textures. X-ray diffraction analysis from some core samples revealed that the three upper horizons are mainly represented by variable amounts of iron oxi-hydroxides (hematite + Al-goethite), kaolinite, gibbsite and quartz. Kaolinite usually domains in the transition zone horizon and exhibits better "crystallinity" in comparison with those from the latosols. Hematite domains in the iron crust, associated with goethite, whose Aluminum contents can reach up to 30%.

Sampling of the outcropping regolith material resulted in a representative amount of samples from the transition, dismantled crust and latosol horizons in the three worked areas. Multielement geochemical analysis for 18 elements was carried out using ICP-OES after acid digestion. Summary statistics for each element was done considering the different horizons as separated populations in order to evaluate element throughout the weathering profile. The results show clear preferences of certain elements for specific horizon in terms of enrichment or depletion. The joint analysis of the three areas has permitted us to separate the studied elements three distinct groups according to their geochemical associations and the profile's behavior: a) Group 1 – Fe, Cr, V, Sb, Y, Co, Pb, Zn and Au that exhibit a clear enrichment in the dismantled iron crust horizon; b) Group 2 – Ca, Ba, Mg, Mn, Cu, Ni and La, that present higher mean values in the transition zone horizon; c) Group 3 –

represent only by Al that clearly shows higher average value in the latosol horizon and related to the very high kaolinite contents. The Factor Analysis that was carried out in the three worked areas, and the geochemical data obtained from drillings in the Guarujá plateau had reinforced such geochemical associations and styles of element behavior.

The heterogeneous elements behavior throughout the weathering profile leads to important implications in all the phases of an exploration program. The studied elements usually show different background and thresholds in three or, at least, two horizons, implying in the existence of distinct geochemical populations that must be considered in the process of confection and interpretation of geochemical maps. The agreement of the geochemical behavior of the target element, in an exploration program, allows the election of better sampling media. In the impossibility of collecting only a sampling media, a differentiated statistical treatment for each geochemical population is recommended. However, it must be pointed out that in some situations, sampling of a regolith horizon can be impracticable due to a great homogenization of values (no contrast) or due to an accentuated impoverishment of the geochemical results. These considerations become the mapping processes of regoliths and geomorphologic regimes basic and essential in any program of geochemical prospecting. The obtained geochemical data in this work can, also, signal a mannering trend of the studied elements for Carajás region, especially in the plateau areas of the Sul-Americana Surface.

Regional profiles of regolith mapping developed in this work, associated with literature compilation, allowed us to evaluate different aspects of landscape evolution of the Carajás region. Some final comments and important remarks had been listed for the elaboration of a evolutive model of this landscape: a) the most important lateritization phases in Carajás should have taken place in the Superior Cretaceous, Inferior Eocene, Superior Eocene, Miocene and Recent; b) the laterite profiles of the Carajás region (Sul-Americana Surface) have undergone weathering since the end of the Cretaceous; c) the absence of ages previous to 70 Ma can be a clue that the oldest profiles had been eroded before the Cretaceous or that the weathering of the of Cretaceous was enough pervasive to erase all the previous registers; d) Analysis of geocronologic and paleoclimatic data indicates that climatic conditions in the Oligocene made possible the implementation of expressive erosion cycle, leading to the generation of the Velhas Surface, after dissection of

great part of the Sul-Americana Surface. This erosion was controlled, in part, for geologic and structural factors; e) In Miocene climatic conditions for new phase of weathering had been retaken, that acted on the remaining laterite profiles and developed the laterite profile on the Velhas Surface.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS

Na Amazônia é comum a presença de perfis de intemperismo (regolitos) profundos, com muitas variações, tanto composicionais, como texturais / estruturais e de espessura. O entendimento da distribuição em superfície e características geoquímicas dos horizontes regolíticos é de grande importância para a exploração mineral.

O trabalho, aqui apresentado, envolve vários objetivos e, entre os principais, podem ser citados os seguintes : a) desenvolver técnicas de mapeamento de regolitos, em três áreas selecionadas dentro da Província Mineral de Carajás (PMC), a partir da definição dos horizontes regolíticos e domínios geomorfológicos e suas distribuições em superfície; b) estudar o comportamento geoquímico dos horizontes regolíticos, com base no entendimento da estruturação do perfil laterítico e de análise geoquímica multielementar, avaliando implicações no desenvolvimento do perfil laterítico e, especialmente, na exploração geoquímica.

O termo regolito, proposto inicialmente, refere-se a todo material não consolidado que cobre a superfície da terra. Embora o termo “não consolidado” seja usado na definição original, tipos endurecidos, como duricrust laterítico, silcrete e calcrete, foram incluídos (Anand & Butt, 1998).

Muitos materiais de regolitos são resultados do intemperismo *in situ* de rochas subjacentes, mas outros, como aluviões e colúvios são transportados. O regolito, portanto, é um termo mais abrangente e inclui produtos de processos tais como erosão, transporte, sedimentação, bem como intemperismo (Anand & Butt, 1998). Perfis de terrenos profundamente intemperizados são comuns na Austrália, Índia, Brasil e África intertropical. A espessura desses terrenos varia de poucos metros a mais de 150 metros, dependendo da idade da superfície, atividade tectônica, história climática, clima atual e natureza do bedrock. O regolito, nestas regiões, tem estado em formação contínua por mais de 100 m.a., em uma variedade de climas, e, portanto, ele é uma expressão dos efeitos cumulativos dessa longa história de intemperismo.

Na Amazônia, o efeito combinado do intemperismo laterítico profundo, prolongado, dentro das condições úmidas e quentes, seguido por erosão diferencial e modificações físicas e químicas, tem levado a uma grande variedade de materiais expostos na superfície

do terreno. Isto se traduz em perfis de intemperismo laterítico com muitas variações, tanto composicionais, como de espessura. A maioria dos trabalhos desenvolvidos na PMC, até o momento, deram um maior destaque a distribuição vertical das unidades lateríticas. Salienta-se que, em alguns trabalhos (Costa, 1991; Angélica, 1996; Costa, 1997; Costa et al., 1999, dentre outros) ressalta-se a preocupação dos diferentes autores no desenvolvimento de modelos de evolução geoquímica dos perfis lateríticos, dentro da realidade do ambiente amazônico.

O entendimento da distribuição em superfície e características das unidades lateríticas e das variações dos perfis lateríticos, é de grande importância para a exploração mineral, bem como de cunho ambiental e mapeamento geológico (Anand, 1993; Costa, 1993; Davy et al, 1999). Pesquisas nas últimas décadas têm se concentrado no desenvolvimento de procedimentos de exploração apropriadas para terrenos regolíticos, destacando-se a identificação, mapeamento de regolitos e a definição de suas propriedades geoquímicas e geofísicas (Anand, 1993). Um dos objetivos para os geoquímicos tem sido o desenvolvimento de estratégias de amostragem para cada ambiente de terreno (Anand & Butt, 1998).

Os horizontes que compõem o perfil laterítico são, na exploração geoquímica, os sítios de amostragem dominantes nos estágios iniciais da maioria dos programas exploratórios (Anand, 1993). É fundamental, portanto, compreender essas relações com o objetivo de definir e executar um apropriado programa de amostragem e interpretar os dados corretamente.

Esta dissertação, então, tem suas justificativas, considerando os seguintes aspectos e objetivos:

- A definição das unidades do perfil laterítico, especialmente sua estruturação, suas características geoquímicas e distribuição em superfície, são de grande importância para exploração mineral, bem como para trabalhos de cunho ambiental e mapeamento geológico.
- O mapeamento de regolitos é uma etapa básica no programa de prospecção geoquímica em terrenos profundamente intemperizados. A maioria dos trabalhos na PMC, até o momento, deram maior destaque a distribuição vertical das unidades lateríticas. Faz-se necessário, então, se estudar o comportamento em superfície dos horizontes regolíticos.

- É importante desenvolver técnicas de mapeamento de regolitos dentro das características ambientais da Amazônia, particularmente em Carajás.
- É necessário se estudar e comparar o comportamento e distribuição de unidades regolíticas em situações geomorfológicas semelhantes (áreas de platô) e distintas (platô x pediplano).
- O mapeamento e o comportamento geoquímico das unidades regolíticas devem ser analisados, visando verificar suas influências na prospecção geoquímica na Amazônia.

1.2 – LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS DA GEOLOGIA REGIONAL

As três áreas, selecionadas para este trabalho e denominadas de Guarujá, Jaca e Paulo Afonso, estão situadas na PMC (Figura 1.1), a cerca de 550 a sudoeste da cidade de Belém, capital do estado do Pará.

O clima atual é do tipo tropical úmido, caracterizado por precipitações sazonais, com uma estação úmida de novembro a maio e uma estação seca de junho a outubro. A precipitação média anual situa-se acima de 1600 mm. Na região é comum o relevo tipo platôs, com altitudes médias de 600 m. A vegetação original é predominantemente do tipo floresta equatorial e, subordinadamente, do tipo savana.

A Província Mineral de Carajás (PMC) hospeda importantes depósitos de Fe, Mn, Au, Cu e Ni. Está situada na porção sudeste do Cráton Amazônico, sendo limitada por quatro unidades principais: Sequência sedimentar Paleo-Mesozóica (Bacia Amazônica) ao norte; Cinturão dobrado do Araguaia do Proterozóico Superior a leste; Greenstone-belt arqueano do Rio Maria ao sul; e o Grupo Uatumã do Proterozóico Médio a oeste.

A PMC está inserida dentro do Cinturão Itacaiúnas (Araújo et al. 1988) e compreende seqüências vulcânicas, plutônicas e sedimentares, a maioria metamorfisadas, que podem ser divididas dentro de unidades litoestratigráficas maiores (Figura 1.2).

As rochas mais antigas da Província correspondem à assembléia de embasamento arqueano dominada por um Complexo Granito-Gnaiss, compreendendo ortognaisses do fácies granulito (Complexo Pium; 3,0 b.a.; Rodrigues et al. 1992); ortognaisses com migmatitos do fácies anfibolito (Complexo Xingu; Machado et al. 1991) e granitóides sin-tectônicos.

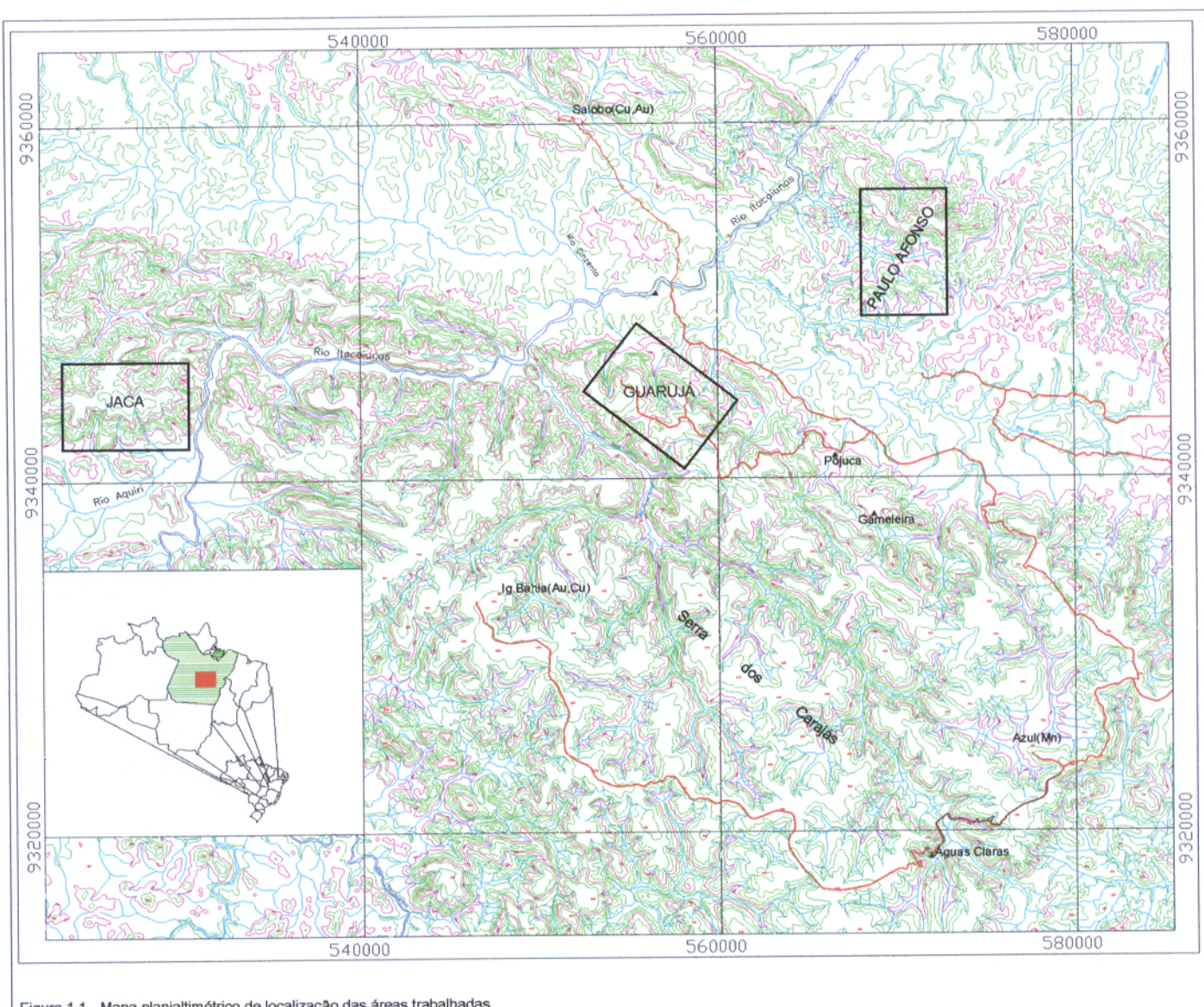


Figura 1.1 - Mapa planialtimétrico de localização das áreas trabalhadas

O Supergrupo Itacaiúnas repousa discordantemente sobre rochas do embasamento e é composto por rochas vulcânicas e sedimentares das unidades Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Grão Pará e Igarapé Bahia. As rochas vulcânicas desses grupos são principalmente de natureza básica a intermediária, com menor quantidade de riolitos, que apresentam idade U-Pb em torno de 2,7 b.a. (Wirth et al. 1986).

O Grupo Igarapé Salobo corresponde a faixas delgadas de rochas supracrustais de direção NW-SE, com mergulhos subverticais e foliação penetrativa. Pinheiro e Holdsworth (1997) consideram o Grupo Igarapé Salobo, por se encontrar mais deformado e com maior grau de metamorfismo, mais antigo que o Grupo Grão Pará.

O Grupo Igarapé Bahia consiste de uma sucessão de rochas metavulcanossedimentares que aflora em uma janela estrutural em meio às rochas da Formação Águas Claras. Compreende um pacote de rochas piroclásticas intercaladas com metapelitos, metagrauvacas, meta-ritmitos e formações ferríferas. O metamorfismo é da fácies xisto verde e a deformação é de caráter dútil, com brechação intensa nas zonas de minério.

A Formação Águas Claras é considerada repousar discordantemente sobre as seqüências do Supergrupo Itacaiúnas. Corresponde a um pacote siliciclástico, com cerca de 1500 m de espessura e é composto por dois membros (Nogueira, 1995). O membro inferior apresenta estruturas típicas de ambiente marinho plataformar, enquanto no membro superior são observadas feições de depósitos litorâneos e fluviais. Corpos gabróicos que cortam estas rochas foram datados em 2,64 b.a. (Dias et al. 1996), estabelecendo uma idade mínima para esta formação.

Três períodos de geração de granitóides são definidos: Granitos Planalto e Criméia datados em 2,7 b.a., granitos Itacaiúnas e Old Salobo de 2,5 b.a. e granitos anorogênicos tipo Carajás e Cigano com 1,8 b.a. Os dois primeiros eventos graníticos são interpretados como sin a tardi tectônicos.

Complexos acamadados máficos a ultramáficos (Vermelho, Puma, Onça, Luanga e Jacaré), de idade em torno de 2,7 a 2,8 b.a., hospedam mineralizações de cromo, platinóides e de níquel laterítico e se localizam, em geral, nas bordas das seqüências vulcanossedimentares de Carajás.

Corpos intrusivos dioríticos, gabróicos a granodioríticos são identificados em Carajás, ocorrendo na forma de sills e diques e com espessura variando de poucos a centenas de metros.

Do ponto de vista da geologia estrutural, a região de Carajás tem sido caracterizada por grandes zonas de falhas regionais, com direção preferencial EW, que geram fortes foliações miloníticas e que tem dividido o cinturão dentro de diversos domínios, nos quais a deformação afetou as rochas, das diferentes unidades, de uma maneira heterogênea.

Mineralizações singenéticas na Província são representadas pelos depósitos de ferro e manganês, enriquecidos, posteriormente, por processos lateríticos. Depósitos de Cu-Au-Fe- (U-ETR), associados com intensa atividade hidrotermal foram identificados e

exemplificados pelos depósitos do Salobo, Gameleira, 118, Sossego, Cristalino e Alemão, onde a associação Fe-Cu-Au é produto de atividade hidrotermal-magmática de alta temperatura.

1.3 – METODOLOGIA

A metodologia empregada pode ser dividida em itens / etapas, descritas a seguir:

- Pesquisa bibliográfica
- Perfis regionais – Consistiu de mapeamento de estradas, visitas à minas (N4E, Mn Azul, Igarapé Bahia) e estudos de testemunhos de sondagem. Objetivou, auxiliado pela pesquisa bibliográfica, definir perfis lateríticos de referência, em termos da caracterização e sucessão dos seus horizontes, que serviram de base inicial ao mapeamento regolítico. Os perfis regionais auxiliaram, também, nas considerações formuladas sobre a evolução da paisagem em Carajás.
- Selecionamento das áreas a serem mapeadas – Três áreas foram selecionadas para mapeamento de regolitos. Foram individualizadas duas áreas em região com geomorfologia mais elevada e perfil laterítico mais preservado (platôs) e uma área em região com geomorfologia composta por terrenos arrasados e cristas de serras, onde o perfil laterítico mostra-se, em geral, mais erodido. O manto regolítico, nas áreas selecionadas, apresenta espessura que varia de 40 m (nos terrenos arrasados) a mais de 100 m (no topo dos platôs). As áreas apresentam, também, algumas distinções em termos de seqüências / unidades litoestratigráficas.
- Reconhecimento geológico dos alvos (picadas exploratórias), objetivando ter uma idéia inicial, *in loco*, dos horizontes regolíticos e domínios geomorfológicos.
- Mapeamento dos alvos, a partir de malhas topográficas regulares, com picadas a cada 200 metros.
- Amostragem de solo do horizonte regolítico aflorante, com realização de amostragem com espaçamento de 200x40 metros. Foi coletada, em geral, uma amostra em cada

ponto, no intervalo entre 20 a 50 cm de profundidade. Quando a unidade superficial de latossolo estava presente, procurou-se amostrar este horizonte e, se possível, o horizonte ferruginoso subjacente. As amostras tiveram cerca de 1 kg de peso. Foram preparadas, no laboratório físico da CVRD em N5 (Carajás), de duas maneiras : a) Amostras de pisolitos / concreções foram moídas a 200 mesh e b) Amostras de material não consolidado foram secas e peneiradas a 120 mesh.

- Sondagem rasa – Foi efetuada a descrição do perfil de intemperismo de cerca de 90 furos de trado mecânico, com profundidade média de 10 m, executados em platô de uma das áreas trabalhadas (Guarujá). Foi efetuada a amostragem de 4 furos de trado. A amostragem foi feita metro a metro, em todos os horizontes regolíticos interceptados. As amostras foram moídas a 200 mesh, no laboratório físico da CVRD em N5 (Carajás).
- Análise geoquímica multielementar das amostras de superfície, com abertura parcial e leitura por espectrometria de emissão de plasma (ICP/AES). Foram realizadas no laboratório da CVRD (MG) e analisados para os seguintes elementos : Al, As, Au, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mg, Mn, Ni, Pb, Sb, Ti, V e Zn.
- Análise geoquímica, para Al, Cr, Fe e Mn, dos 4 furos de trado amostrados. O procedimento de análise foi semelhante ao das amostras de superfície.
- Caracterização mineralógica dos horizontes regolíticos por difração de raio-x, sendo selecionadas amostras de furos de trado, executados na área Guarujá. Foi utilizado o laboratório de Raios-X, do Centro de Geociências da UFPA.
- Tratamento estatístico dos resultados geoquímicos e confecção de mapas de regolitos dos alvos. Utilização dos Softwares AutoCAD, Statistica e Oasis Montaj.
- Interpretação / Integração dos dados
- Confecção da dissertação

2 – MAPEAMENTO DE REGOLITO E SUA IMPORTÂNCIA PARA EXPLORAÇÃO GEOQUÍMICA – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de mapeamento de regolitos e sua importância no mapeamento geológico e, principalmente, em programas de exploração mineral são reportados em diversos trabalhos, especialmente através de pesquisadores australianos. Este capítulo procura, sinteticamente, descrever algumas das idéias mais importantes reportados sobre esse assunto. Foram utilizados, como base para essa compilação bibliográfica, os seguintes trabalhos: Anand (1993); Anand & Butt (1998); Davy et al. (1999); Annad & Butt (2001). Em Carajás, a maioria dos trabalhos científicos sobre lateritos deram maior destaque a distribuição vertical dos horizontes lateríticos. Salienta-se, entretanto, o trabalho de Costa & Araújo (1997) que desenvolveram um mapeamento de unidades lateríticas, na superfície do platô do depósito de Fe de N1, em Carajás.

No final deste capítulo, será apresentado um pequeno glossário, com termos e conceitos de expressões técnicas utilizadas ao longo deste trabalho.

2.2 – DISTRIBUIÇÃO DOS REGOLITOS E SIGNIFICADOS PARA A EXPLORAÇÃO

Regolitos profundos, consistindo de *bedrock* intemperizado, são amplamente distribuídos, principalmente nos atuais trópicos e subtropicais. Eles estão, geralmente, mais preservados em regiões de baixo relevo, refletindo estabilidade tectônica de longa duração e estando protegidos por um endurecimento superficial (*duricrust*). Intemperismo profundo afeta ou afetou todas as litologias, resultando em perfis característicos, que comumente tem rocha fresca que grada, para cima, para um *saprock*, um saprolito, zonas argilosas ou arenosas, e um horizonte superior ferruginoso, aluminoso (bauxítico) ou silicoso. As zonas acima do saprolito compreendem os componentes pedolíticos e são caracterizados pelo desenvolvimento de fábricas secundárias. Os perfis são, geralmente, compostos, nos horizontes superiores, de proporções variáveis de caulinita, como o argilomineral dominante, além de óxidos e hidróxidos de ferro (hematita e/ou goethita), de alumínio (gibbsita) e quartzo.

A presença de regolitos representa numerosos desafios e oportunidades para a exploração, influenciando na seleção das técnicas de mapeamento geológico e de técnicas de exploração geofísicas e geoquímicas. Embora terrenos profundamente intemperizados ocorram atualmente em uma ampla variedade de ambientes climáticos, eles foram formados, no passado, dentro de ambientes geralmente similares, que resultou em muitas características comuns do ponto de vista petrográfico, mineralógico e geoquímico. A espessura dos perfis de regolitos varia de poucos metros a mais de 150 m, dependendo da idade da superfície, atividade tectônica, história climática, clima atual e a natureza da rocha original. Em partes da África, Índia, América do Sul, SE da Ásia e Austrália, os regolitos têm estado em formação relativamente contínua por cerca de 100 Ma. O regolito, e o relevo a ele associado, são uma expressão dos efeitos cumulados desse longa história de intemperismo. Na realidade, as características petrofísicas, morfológicas, mineralógicas e geoquímicas dos regolitos são, normalmente, profundamente diferentes daquelas rochas das quais eles foram derivados, afetando, logicamente, os procedimentos para a exploração geoquímica e geofísica. Por outro lado, intemperismo profundo também gera oportunidades de formação de muitos depósitos secundários e supergênicos importantes, como Al, Fe, Ni, Co, Au, Cu, U e materiais industriais e de construção.

Procedimentos geoquímicos podem ser aplicados em todos os estágios de exploração, desde o estágio de reconhecimento regional até a avaliação de um prospecto. A amostragem de solo é utilizada na maioria dos trabalhos nas escalas subregional a local. O desenvolvimento de terrenos regolíticos, entretanto, geram diversos problemas que podem prejudicar a sua efetiva aplicação. Entre esses problemas, são incluídos os seguintes : a) significativas alterações químicas, físicas e mineralógicas da rocha original, podendo tornar difícil a distinção entre classes litológicas; b) forte lixiviamento da maioria dos elementos ligados a mineralização (p. ex. Cu, Au, Zn), particularmente dos horizontes superiores dos regolitos, resultando em, apenas, sutis expressões superficiais da mineralização; c) desenvolvimento de falsas concentrações secundárias de elementos alvos; d) mudanças laterais na natureza do regolito, devido a variações na profundidade de truncamento dos perfis pré-existentes pela atual superfície de erosão; e) presença de uma cobertura de material transportado, que, inclusive, pode ter sido intemperizado após a deposição; f)

superposição, em um único perfil, dos efeitos de intemperismo dentro de diferentes condições ambientais.

Uma exploração geoquímica efetiva só pode ser desenvolvida pelo reconhecimento desses problemas e outras propriedades do terreno, e pela seleção de técnicas apropriadas de amostragem, análise e interpretação de dados

2.3 – MAPEAMENTO DE REGOLITO

A formação e modificação de regolíticos lateríticos e os efeitos da erosão durante e depois desses eventos resultam em significativo controle dos regolitos e formas de relevo no processo de amostragem. Isso é expressado em termos da determinação do modelo de exploração apropriado, como um pré-requisito para uma efetiva exploração desses terrenos e isso é melhor alcançado pelo mapeamento de regolitos e formas de relevo. Uma unidade de mapeamento é definida como uma área delineada em mapa que ocorre como uma associação específica de materiais regolíticos, formas de relevo e, possivelmente, geologia do *bedrock*. Essa unidade pode consistir de múltiplos ou subdivisões de tonalidades, texturas, feições e/ou imagens multi-espectral visíveis em fotografias aéreas, imagens de satélites ou dados radiométricos.

O primeiro passo é, sempre, fazer um mapa objetivo das unidades presentes. Como o resíduo laterítico (*gravels* e *duricrust*) é um importante meio amostral, é importante estabelecer sua ausência ou presença. Adicionalmente, áreas com substancial cobertura de material transportado necessitam ser delimitadas, já que podem mascarar ou encobrir, na superfície, expressões geoquímicas de mineralizações. Em um nível mais simplificado de mapeamento, portanto, esses dois importantes limites necessitam ser estabelecidos e, a partir deles, os regimes básicos de regolitos – formas de relevo podem ser mapeadas, como relictos, erosional e deposicional (Fig. 2.1). O regime de relictos consiste, conceitualmente, de registros de uma superfície intemperizada antiga e pode ser caracterizada pela preservação do resíduo laterítico. Um regime erosional ocorre quando o perfil regolítico pré-existente foi truncado, expondo horizontes subjacentes ou camadas de solo, normalmente finas, derivadas desses horizontes. Um regime deposicional é caracterizado por sedimentos, que podem ter muitos metros de espessura e encobrir perfis de intemperismo residuais completos ou parcial ou completamente truncados. Modelos

geoquímicos apropriados podem ser deduzidos para regimes de relictos e erosional, enquanto que em áreas deposicionais, informações adicionais são requeridas através de sondagem, para definir o grau de preservação do regolito residual encoberto. Regimes e modelos grosseiramente similares podem ser aplicados em muitos terrenos profundamente intemperizados. Entretanto, devido a relativa fragilidade das drenagens em regiões áridas, os produtos de erosão ficam retidos no relevo como coberturas de material transportado e, portanto, unidades deposicionais são, nesses ambientes, muito mais extensivas. Estabelecendo-se o tipo de modelo, algumas características gerais da expressão geoquímica da mineralização podem ser previstos e usados para projetar as estratégias de amostragem. Muitas dessas estratégias podem ser válidas em diversos ambientes climáticos e para regiões com poucas informações existentes. Aspectos mais detalhados de dispersão, entretanto, são regionalmente específicos, e suas descrições requerem modelos baseados em estudos orientativos apropriados.

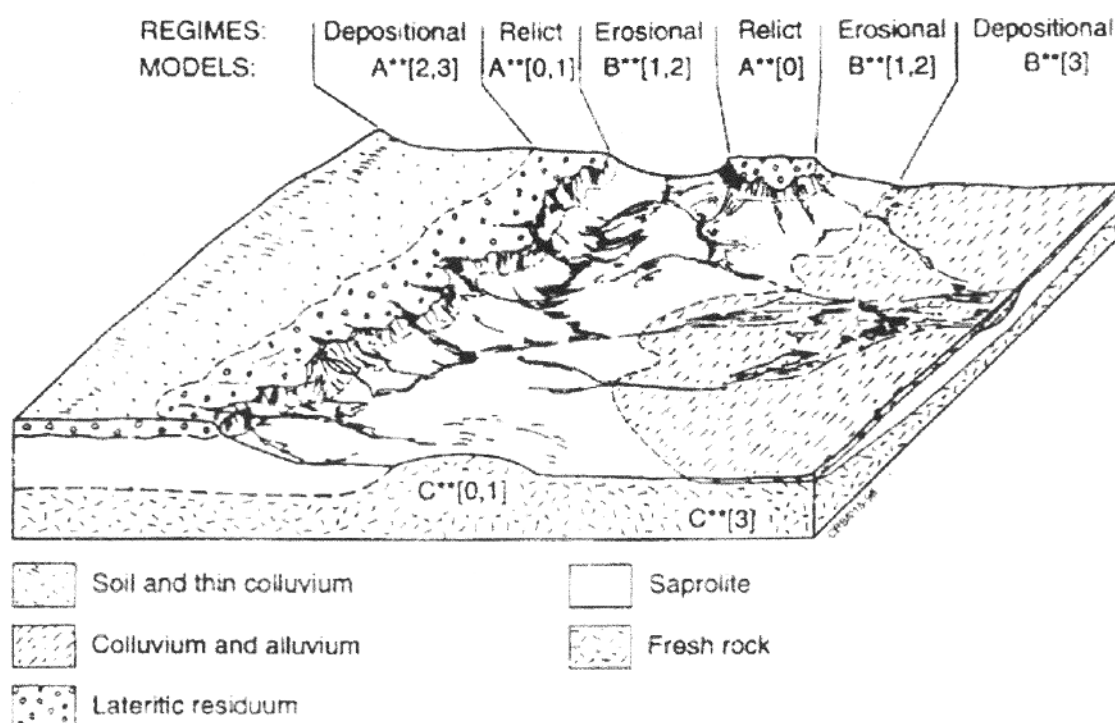


Figura 2.1 – Relação entre regimes regolíticos – formas de relevo e modelos geoquímicos. (A) perfil preservado; (B) perfil truncado parcialmente; (C) ausente. Superfície : [0] aflorante; [1] solo residual; [2] solo semi-residual; [3] material transportado. (modificado de Butt & Zeegers, 1992).

A geoquímica, portanto, pode ser uma eficiente ferramenta para a exploração mineral em terrenos regolíticos, sendo, entretanto, fundamental um entendimento do desenvolvimento da paisagem na determinação da expressão geoquímica de uma mineralização. As mais importantes feições de regolitos lateríticos incluem o forte lixiviamento da maioria dos elementos, a dispersão limitada da maioria dos elementos no saprolito e o halos mais amplo e multielementar no resíduo laterítico. Processos erosivos resultam em um mosaico de formas de relevo, nas quais os regolitos pré-existentes podem ser preservados ou parcialmente a totalmente truncados, e podendo estar aflorantes ou encobertos por materiais transportados. A natureza da expressão geoquímica da mineralização, e a disponibilidade e utilidade de sítios de amostragem específicas, de superfície e sub-superfície, variam ao longo do terreno.

O mapeamento de regolitos e formas de relevos é, em conclusão, uma importante etapa para determinar os procedimentos de exploração adequados em uma região. Esse mapeamento pode ser suplementado por sondagens estratigráficas. Os objetivos principais incluem a identificação dos regimes de regolitos e formas de relevo e a determinação do grau de preservação do perfil profundamente intemperizado. Esses procedimentos auxiliam a identificar os prováveis modelos de dispersão e os métodos mais apropriados, incluindo o selecionamento do material a ser amostrado, procedimento e densidade da amostragem e métodos de análise e interpretação dos dados.

2.4 – GLOSSÁRIO

Uma grande, diversa e nem sempre unânime terminologia envolve o estudo de regolitos profundamente intemperizados. Em muitos desses trabalhos existe uma certa discordância entre diferentes autores. Dessa maneira, é interessante listar uma série de denominações que serão utilizadas neste trabalho, com o seu respectivo entendimento conceitual. Procurou-se utilizar, em boa parte dos termos, as definições propostas por Butt & Zeegers (1992).

Concreções – um agregado / massa de material mineral, compacto, de forma arredondada ou irregular. É um termo geral que inclui pisolitos e nódulos.

Córtex – película fina, aplicada as camadas externas das concreções.

Crosta desmantelada – horizonte do perfil regolítico composto por blocos, fragmentos e concreções, em geral ferruginosos, envolvidos por uma matriz argilosa. É interpretado como originado por um processo de desmantelamento, principalmente por intemperismo químico, de uma crosta anterior endurecida (*duricrust*) ou com menor grau de fragmentação, formada em condição climática diferente da atual.

Duricrust – material endurecido posicionado próximo ou na superfície. O material pode ser ferruginoso, aluminoso, silicoso (silcrete) ou calcáreo (calcrete).

Litorelictos – fragmento muito intemperizado tendo fábrica lítica, primária.

Nódulos – pequena massa de substância mineral de forma irregular, arredondada a sub-angulosa, normalmente com menos de 60 mm de diâmetro.

Pedolítico – parte superior do perfil regolítico que foi submetido aos processos de formação de solo, resultando na perda da textura da rocha original e o desenvolvimento de nova fábrica e estruturas secundárias.

Pisolito – corpo concrecionário arredondado, medindo em torno de 2 mm. Pode apresentar estrutura interna concêntrica e, normalmente, é envolvido por película ou córtex.

Regolito – cobertura endurecida secundariamente ou inteiramente não consolidada que cobre o *bedrock* e que tem sido formado por intemperismo, erosão, transporte e/ou deposição. Os regolitos incluem, por exemplo, saprolito, solos, *duricrusts*, acumulações orgânicas, depósitos glaciais, colúvios e aluviões. Pode ser dividido em uma unidade inferior (saprolítica) e uma superior (pedolítica).

3 – GEOMORFOLOGIA E GEOLOGIA SUPERGÊNICA DAS ÁREAS

3.1 – INTRODUÇÃO

Mapeamento de regolitos foi desenvolvido em três áreas na Província Mineral de Carajás, denominadas Guarujá, Jaca e Paulo Afonso (Fig. 1.1).

A **área Guarujá** está localizada a cerca de 50 km a oeste do Núcleo Urbano de Carajás; a 15 km a NNE da mina de ouro do Igarapé Bahia e a 15 km a SE do depósito de Cu-Au do Salobo. O acesso para os trabalhos executados neste alvo foi feito por helicóptero e por estrada não pavimentada, apenas trafegável no verão. A **área Jaca** localiza-se próximo a confluência dos rios Itacaiúnas e Aquiri, distando cerca de 75 km a oeste do Núcleo Urbano de Carajás; a 30 km a SSW do depósito do Salobo e a 23 km a WNW do Igarapé Bahia. O acesso foi feito por barco, via rio Itacaiúnas, e por helicóptero. A **área Paulo Afonso** posiciona-se a cerca de 40 km a NW do Núcleo Urbano de Carajás; a 20 km a este do Salobo e a 30 km a NE do Igarapé Bahia. O acesso foi feito por estradas não pavimentadas.

Trabalhos de prospecção geoquímica de solos foram desenvolvidos, nas três áreas, concomitantes aos mapeamentos de regolitos e geológico. Amostras superficiais de regolitos foram coletadas nas três áreas trabalhadas, atingindo um total de 2763 amostras no Guarujá, 1641 no Jaca e 1767 no Paulo Afonso. Estas amostragens foram executadas em malhas topográficas que abrangeram áreas de 24 km² no Guarujá e de 15 km² em cada uma das duas outras áreas. Trabalhos de sondagem rasa, através de trado mecânico, foram desenvolvidos numa porção da área Guarujá, totalizando 99 furos e 1122 m perfurados,

A geologia da área Jaca é constituída, predominantemente, por metassedimentos da Formação Águas Claras (metarenitos e metasiltitos), com diques gabróicos subordinados. A área Guarujá tem 85 % da área composta por metassedimentos da Formação Águas Claras, sendo o restante da área, posicionados na parte NNE da malha, representada por rochas básicas e formações ferríferas da sequência Pojuca e corpos granitóides intrusivos. A área Paulo Afonso apresenta uma sequência de xistos e formações ferríferas na sua parte Norte e por gnaisses, granitóides, xistos e formações ferríferas na sua porção Sul.

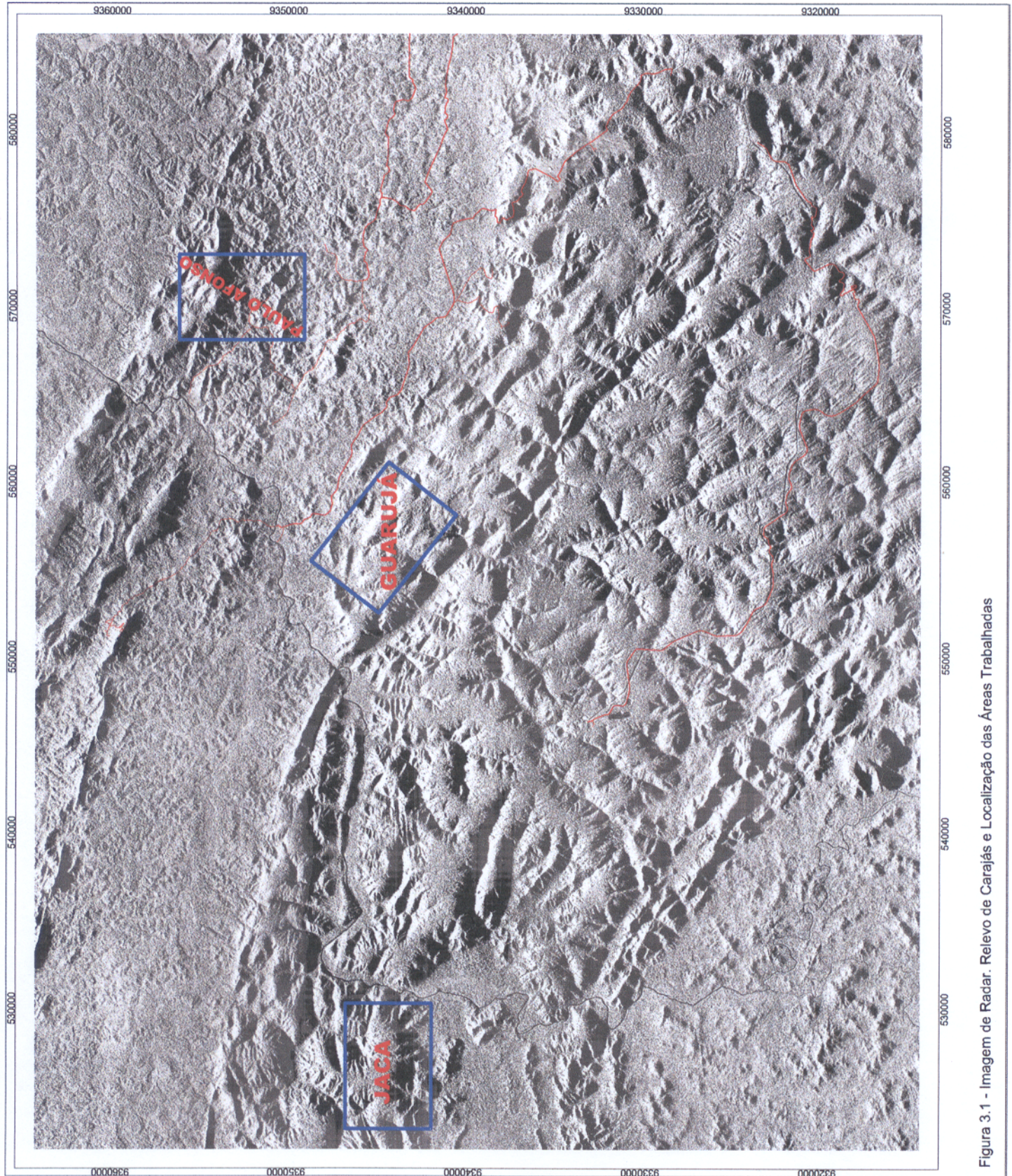


Figura 3.1 - Imagem de Radar. Relevo de Carajás e Localização das Áreas Trabalhadas

3.2 – GEOMORFOLOGIA

3.2.1 – Geomorfologia da região de Carajás

O relevo de Carajás é formado, em linha gerais, por uma série de platôs escarpados, com mais de 500 m de altitude, que constituem a Serra de Carajás e por uma região plana a ondulada com cotas de 250 a 350 m (Fig.3.1). Os platôs são elevações com topo geralmente plano a ligeiramente ondulado, com cotas variando de 500 a 750 m, ocasionalmente atingindo cerca de 900 m. A região mais arrasada, ao redor da serra dos Carajás, é predominantemente plana a ondulada, constituindo um pediplano regional com cotas variando de 250 a 350 m (Fig. 3.2). Platôs e serras relativamente isoladas, com cotas superiores a 500 m, ocorrem como ressaltos dentro desse pediplano.



Figura 3.2– Vista aérea da região de Carajás, onde se pode diferenciar serras em forma de platôs (ao fundo), circundado por uma área arrasada a levemente ondulada.

A vegetação sobre os platôs pode ser do tipo floresta ou savana. A vegetação do tipo savana é desenvolvida, especialmente, sobre às áreas com exposição do horizonte de crosta ferruginosa endurecida, principalmente associadas a porções muito ricas em ferro. As áreas

mais baixas eram cobertas por vegetação original de florestas, estando hoje, em grande parte, desmatadas. Áreas preservadas dessa floresta ocorrem principalmente dentro das Florestas Nacionais de Carajás e Tapirapé.

Boaventura et al. (1974) inseriram a região de Carajás dentro de duas compartimentações regionais de relevo: Planalto Dissecado do Sul do Pará, correspondendo aos maciços residuais de topo aplainado e aos conjuntos de cristas e picos interpenetrados por faixas de terrenos rebaixados e a Depressão Periférica do Sul do Pará, que seria um pediplano gerado por dissecação fluvial e que teria originado colinas de topo aplainado.

Dois níveis de erosão, para região de Carajás, foram observados por Santo (1999), representando topo e base do relevo. O topo do relevo seria representado por uma superfície de aplainamento, com altitudes variando de 500 a 800 m, correspondendo a Superfície Sul-Americana (King, 1956) e estaria correlacionada altimetricamente aos relevos residuais e *inselbergs* mais elevados. O nível de base do relevo, com altitudes de 200 a 300 m, estaria associado ao sistema colinoso, correspondendo à superfície do Ciclo Velhas (King, 1956).

Os platôs de Carajás são interpretados por Lopes (1999) como remanescentes / testemunhos de uma extensa superfície de erosão, a Superfície Sul-Americana, que levou à formação de um peneplano de escala continental. A região ao redor de Carajás, predominantemente plana a ondulada, constitui, segundo Lopes (1999), um pediplano regional com cotas variando de 250 a 350 m, correspondendo a Superfície Velhas. Platôs e serras no interior deste pediplano seriam remanescentes de uma superfície mais antiga (Sul-Americana).

Lopes (1999) descreve a Superfície Sul-Americana como de idade do final do Cretáceo e início do Terciário, sendo ela reconhecida em vários quadrantes do país e sendo uma herança de uma feição comum da América e da África, quando essa região se posicionava no interior de um grande continente (Gondwana). A Superfície Velhas, do Terciário superior, seria também uma feição geomorfológica de escala continental, reconhecida em várias regiões do país. Seria o resultado de um ciclo de erosão que se superpôs à Superfície Sulamericana, levando à formação de um extenso pediplano, em que as zonas planas isolam platôs residuais e serras com topos em cotas intermediárias, remanescentes de um processo de pediplanação que não chegou a se completar. A

Superfície Velhas estaria, por sua vez, afetada por um novo processo de erosão, ciclo Paraguaçu, que, em Carajás, desagregam incipientemente a Superfície Velhas.

A influência tectônica-estrutural, inclusive de processos neotectônicos, na evolução da geomorfologia da região de Carajás é discutida por Santo (1999). Esta região teria um relevo morfoestrutural gerado a partir de superfícies aplainadas em rochas pré-cambrianas, onde a dissecação e o modelamento do relevo são controlados principalmente pela estruturação impressa nestas rochas e onde a tectônica recente atuou de forma mais subordinada. Neste aspecto, o arranjo litoestrutural do substrato rochoso foi o fator determinante para que a erosão diferencial promovesse a exumação da estrutura antiga.

Os lateritos da Amazônia foram classificados, por Costa (1991), em dois grandes grupos, lateritos maduros e imaturos, com base em suas feições geográficas, mineralógicas e geoquímicas, os quais estariam relacionados com o grau de evolução. Os lateritos imaturos estariam distribuídos por toda a região e formariam o relevo jovem que domina em toda a Amazônia. Os perfis de tais lateritos apresentariam características típicas de baixo grau de evolução. Os perfis maduros estariam, também, muito bem representados na Amazônia, mas não possuiriam a mesma extensão geográfica dos imaturos. Em geral, os perfis maduros constituem o relevo mais elevado, sobre a forma de platôs e morros. Seriam lateritos evoluídos com maior complexidade de horizontes, texturas, estrutura, mineralogia, feições geoquímicas e mineralizações associadas, mostrando feições típicas de processos policíclicos e epigenéticos.

Lopes (1999) descreve os perfis lateríticos típicos presentes em Carajás e os associam as duas superfícies de erosão presentes, demonstrando um controle geomorfológico da distribuição desses perfis. O perfil laterítico relacionado a Superfície Sul-Americana seria mais complexo e muito mais profundo, atingindo normalmente espessuras superiores a 100 m. Por outro lado, o perfil laterítico associado à Superfície Velhas seria menos espesso (menos de 100 m) e mais simples (“lateritos do baixão”). Os perfis mais complexos da Superfície Sul-Americana resultariam da superposição de mais de um evento de intemperismo, incorporando os efeitos e produtos de todos os eventos posteriores a sua formação.

As três áreas, aqui trabalhadas, estão posicionadas em platôs da superfície de erosão Sul-Americana. Mapeamento em perfis regionais, entretanto, permitiram a delimitação de,

pelo menos, dois perfis lateríticos típicos, com um nítido controle geomorfológico, associados às duas superfícies maiores de erosão, como já reportado por Lopes (1999). O perfil assentado sobre a Superfície Velhas (“lateritos do baixão”) apresenta, normalmente, uma espessura bem menos desenvolvida do que os perfis mais antigos e mais elevados topograficamente e são constituídos, em geral, por um horizonte de crosta desmantelada ou de concreções (1 a 3 m de espessura), que passa para um discreto horizonte de zona de transição / mosqueada e daí para o horizonte de saprolito (Fig. 3.3). Em alguns locais, entretanto, observou-se um fino horizonte de latossolo vermelho amarelado assentado sobre o horizonte de crosta desmantelada, que pode ser evidência de superposição de eventos de intemperismo. Salienta-se, ainda, que dentro do relevo arrasado da superfície Velhas, os perfis lateríticos apresentam um relativo destaque topográfico, marcado por suaves ondulações ou “platôs rebaixados” (Fig. 3.4)



Figura 3.3 – Vista do perfil laterítico da Superfície Velhas. Ao fundo, a superfície topográfica é sustentada pelo horizonte de crosta desmantelada. Na escavação estão expostos os horizontes de zona de transição e saprolito.



Figura 3.4 – Superfície Velhas apresentando relativo destaque topográfico, sustentada pela crosta ferruginosa.

3.2.2 – Geomorfologia das áreas

a) Área Guarujá

A geomorfologia da área Guarujá é representada por feições elevadas do tipo platô e de porções mais rebaixadas, planas a onduladas (Fig. 3.5). O platô tem forma irregular, apresentando um *trend* que varia de NW-SE a NE-SW. Sua parte superior, com cota acima de 600 m, é caracterizada por uma superfície relativamente plana, que passa, em direção a base, para terrenos com declividade, inicialmente suave e, posteriormente, muito acentuada. As porções mais rebaixadas mostram relevo plano a ondulado. A diferença de nível entre o topo e a base do platô é de cerca de 350 a 400 m. A parte mais elevada e plana do platô não mostra total continuidade na área, sendo parcialmente truncada aproximadamente na sua parte central, por um igarapé com direção principal noroeste. Isto leva a divisão do platô do **Guarujá** em duas porções. A parte SE corresponde a sub-área Guarujá I que apresenta platô com direção NW-SE, enquanto a parte NW posiciona-se na sub-área Guarujá II, que apresenta topo com *trend* NE-SW.



Figura 3.5 - Imagem de Radar. Área Guarujá com indicação da malha de amostragem

O platô do **Guarujá** serve, ao longo de toda a sua extensão, de nascedouros para diversas correntes, formando vales estreitos e fechados e pertencendo a bacia da margem direita do rio Itacaiúnas. Os igarapés provenientes da parte norte do platô tornam-se afluentes do rio Azul, enquanto que os que nascem a sul da serra vão desaguar no igarapé Águas Claras. Acrescenta-se que um igarapé que se inicia a oeste da área, dirige-se diretamente para o rio Itacaiúnas. A forma irregular, recortada e ameboidal do platô deve ser um reflexo da erosão provocada pelas cabeceiras das correntes, que também explica algumas ondulações observadas nesta superfície.

b) Área Jaca

A área **Jaca** corresponde a trabalhos desenvolvidos na parte Este de um relevo na forma de platô, que tem direção EW, com inflexão para NNE na sua porção Oeste (Fig.3.6). A diferença de cotas topográficas, entre a base do platô e o seu ponto mais elevado é de cerca de 410 m. Ele apresenta uma vertente íngreme, iniciando-se na cota 200 m e se estendendo, com aclive forte, até as cotas de 500 a 550 m. De maneira geral, a partir da cota 500 m, o relevo torna-se plano a suavemente ondulado caracterizando a zona de topo do platô. Em algumas partes da serra, entretanto, o relevo começa a ficar suave somente a partir de 550 m.

O platô do **Jaca**, da mesma forma que o do Guarujá, apresenta nascentes de diversas correntes, ao longo de toda a sua extensão, produzindo vales estreitos e fechados. Os igarapés que nascem nas partes sul e oeste da serra são afluentes da margem esquerda do igarapé Aquiri. Por outro lado, as correntes provenientes das partes este e norte vão desaguar na margem esquerda do rio Itacaiúnas. Devido a isto, a zona de platô apresenta uma forma recortada e ameboidal. As nascentes destes igarapés também explicam algumas ondulações suaves visualizadas no platô.

c) Área Paulo Afonso

A área **Paulo Afonso** é caracterizada por terrenos arrasados, planos a ondulados, com serras e platôs relativamente restritos, que ocorrem como ressaltos dentro dessa superfície. A área mapeada, propriamente dita, corresponde a dois conjuntos de elevações, nas partes norte e sul, separadas por uma área com relevo mais arrasado. Malhas

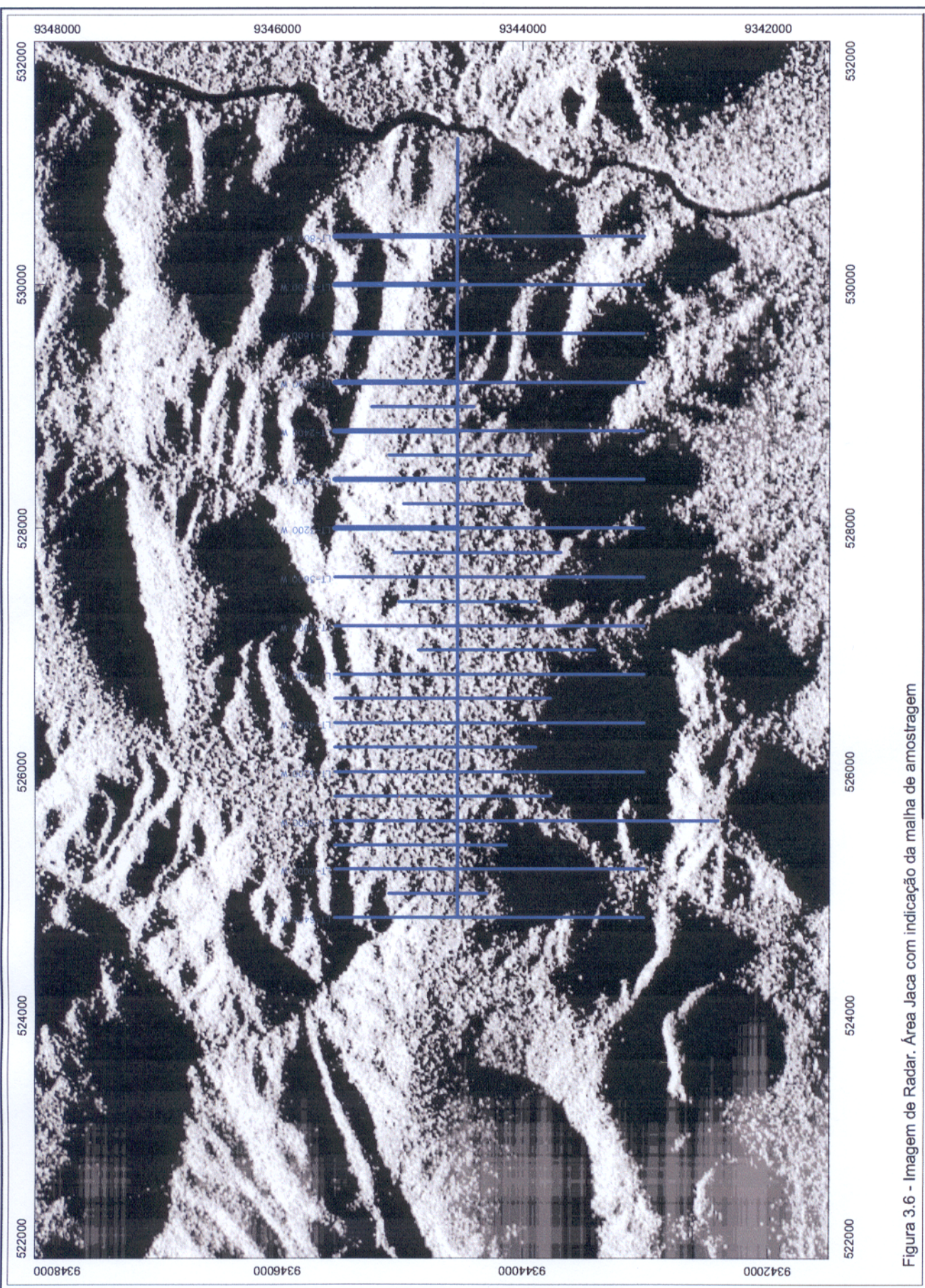


Figura 3.6 - Imagem de Radar. Área Jaca com indicação da malha de amostragem

topográficas foram desenvolvidas nos dois extremos da área e denominadas de Paulo Afonso Norte e Paulo Afonso Sul (Fig.3.7).

A geomorfologia do **Paulo Afonso Norte** é representada por feição elevada do tipo platô, com topo apresentando cota em torno de 550 m e mostrando forma irregular, estreita e alongada no sentido WNW. O flanco sul apresenta encosta com forte declividade até a base do platô, que, então, mostra relevo plano a ondulado. A diferença de cota entre a base e o topo do platô, neste flanco, atinge cerca de 300 m. O lado norte do platô encontra-se associado a outras elevações e, por isso, mostra encosta mais suave. A forma recortada do platô esta relacionada a nascentes de igarapés, com vales estreitos e fechados, pertencentes a bacia da margem direita do rio Itacaiúnas. Salienta-se que as grotas que se originam no flanco sul do platô, dirigem-se para o igarapé Paulo Afonso. Em relação aos platôs do Guarujá e Jaca, o platô do **Paulo Afonso Norte** mostra-se menos expressivo em área e com menor altitude.

O relevo do **Paulo Afonso Sul** é caracterizado por uma série de serras em forma de cristas irregulares, com cotas superiores em torno de 450 m. Mesmo apresentando cristas em diversas direções, existe uma tendência geral de *trend* WNW. Regionalmente essas serras ocorrem como restos elevados dentro de um pediplano apresentando, em imagens de radar, uma textura “enrugada” .

d) Regimes Geomorfológicos

A relação entre material regolítico e o relevo, sua separação em regimes e a importância no mapeamento de regolitos e na exploração mineral são relatadas em Butt & Zeegers (1992); Anand & Smith (1997) e Anand & Butt (2001). No estudo conjunto das três áreas trabalhadas, são observadas porções com características de relevo similares, o que permite individualizar uma série de regimes geomorfológicos. Este processo de interpretação torna-se interessante na medida que esses regimes guardam uma relação direta com os horizontes regolíticos aflorantes, servindo de importante critério a ser utilizado na metodologia de mapeamento de regolitos. Outro fator a ser considerado é que os regimes geomorfológicos auxiliam na classificação da natureza dos regolitos aflorantes, quanto aos aspectos de ser residual, transportado ou uma mistura semi-residual, sendo esta classificação de importância determinante em um programa de exploração geoquímica.

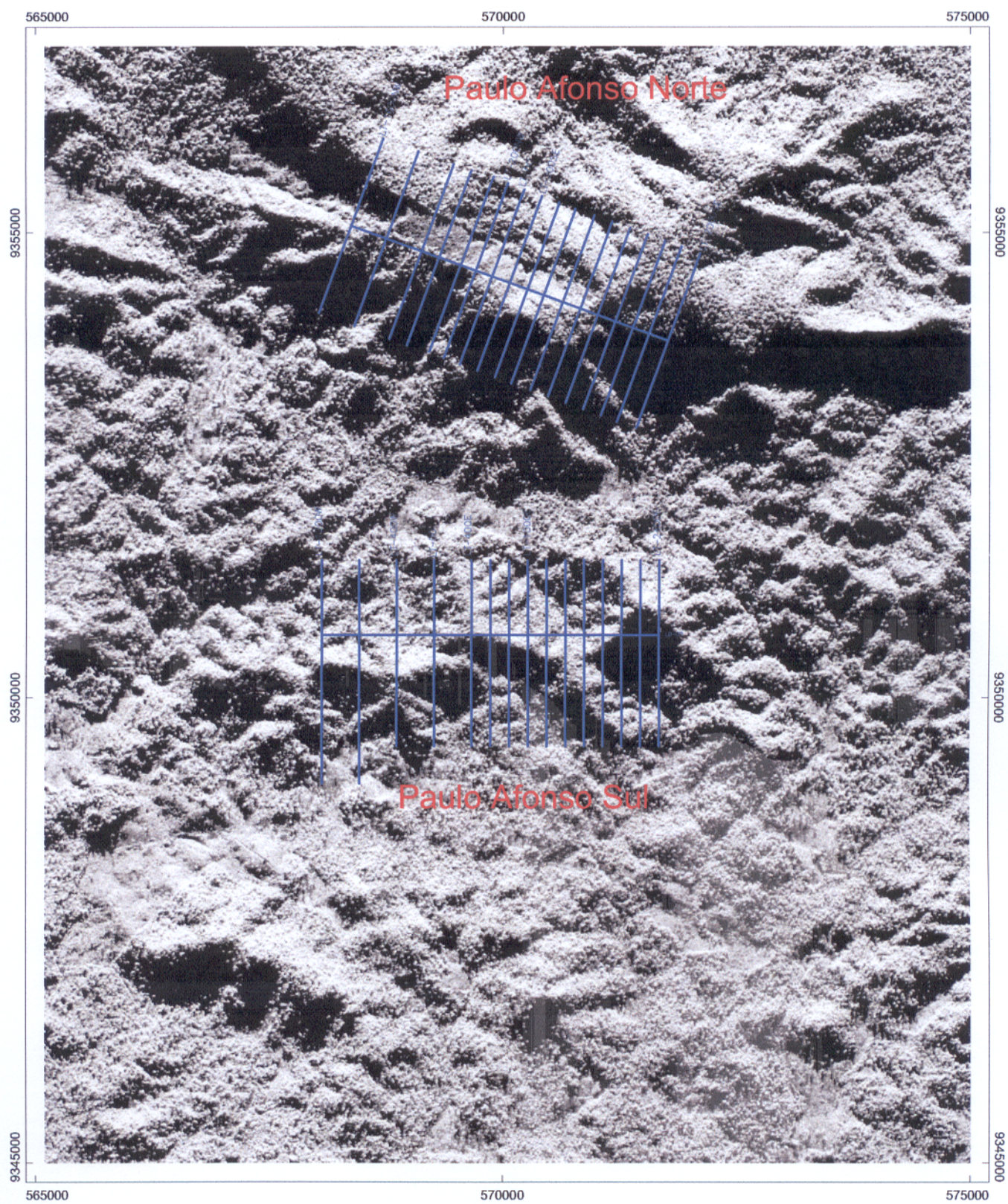


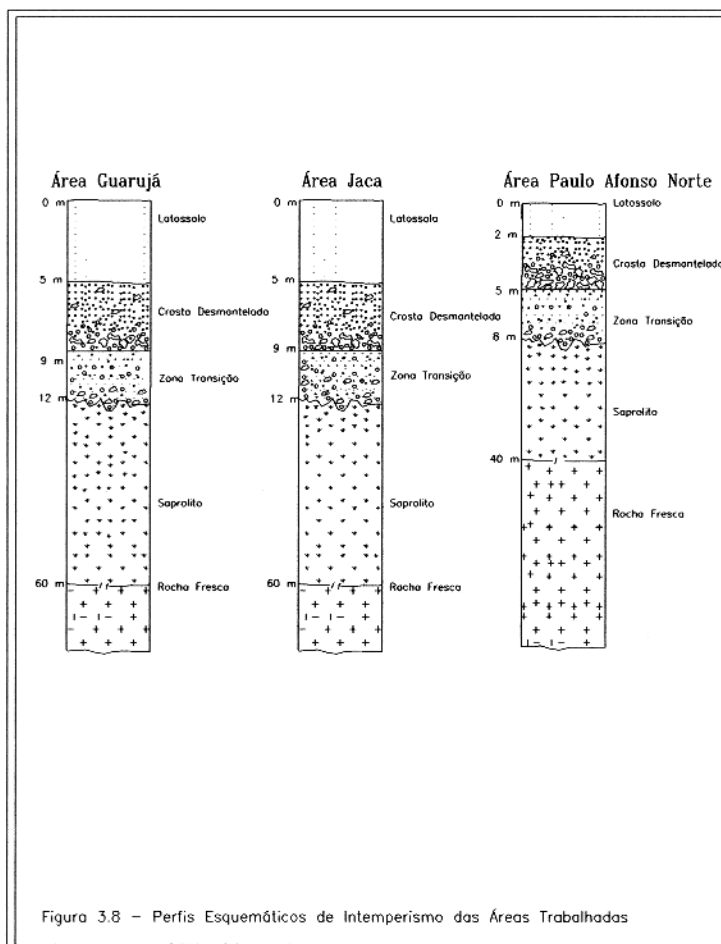
Figura 3.7 - Imagem de Radar. Área Paulo Afonso com indicação da malha de amostragem

Foram individualizados, aqui, cinco regimes geomorfológicos : a) Regime de topo de platô – apresenta relevo plano a levemente ondulado, residual a semi-residual, podendo ocorrer entre as cotas de 500 até acima de 600 m.; b) Regime de encosta suave – localiza-se nas bordas do topo de platôs e no topo de serras em forma de cristas, sendo composto por material semi-residual com pouco transporte; c) Regime de encosta abrupta – ocorrendo nas vertentes de platôs e cristas, com material de mistura semi-residual com fator de transporte mais acentuado que o anterior; d) Regime plano de baixo relevo – apresenta relevo plano a ondulado, ocorrendo a partir da base das elevações, tendo material, em geral, residual a semi-residual; e) Regime de planície de inundação – ocorre ao longo de correntes, sendo mais expressivos em vales mais abertos, contendo material predominantemente transportado.

3.3 – GEOLOGIA DOS REGOLITOS

Nas três áreas estudadas, a interpretação da distribuição em superfície dos horizontes de regolitos foi feita a partir do mapeamento de todas as linhas topográficas abertas, executadas, normalmente, concomitante à amostragem de solo. Paralelamente, foram mapeadas estradas inseridas dentro das áreas estudadas e, também, que cruzavam outros platôs em Carajás. Foram descritos e estudados alguns perfis lateríticos em minas e prospectos em Carajás, a partir de exposições nas frentes de trabalho e de furos de sondagem. Estes mapeamentos externos as áreas de interesse direto, objetivaram criar subsídios para uma interpretação e integração mais segura dos dados coletados. A busca do entendimento das feições geomorfológicas e suas relações com as unidades regolíticas foram fatores de suma importância, tanto na etapa de campo, como na fase interpretativa. Salienta-se, ainda, a utilização de importantes informações obtidas de imagem de radar e de geofísica aérea, especialmente radiométricas. No platô NW da área Guarujá (Guarujá II) foram executadas algumas seções de sondagem rasa, com furos de trado, que permitiram ter uma melhor visão espacial dos horizontes de regolitos. Os furos tiveram profundidade média 11 m, com máximo de 18 m.

Foram definidos e individualizados, nas áreas estudadas, quatro horizontes regolíticos maiores, acima da rocha sã : saprolito, zona de transição, crosta desmantelada e latossolo. Os perfis completos e esquemáticos nas áreas Guarujá, Jaca e Paulo Afonso são apresentados na figura (Fig. 3.8). Esses horizontes serão descritos a seguir.



3.3.1 – Latossolo

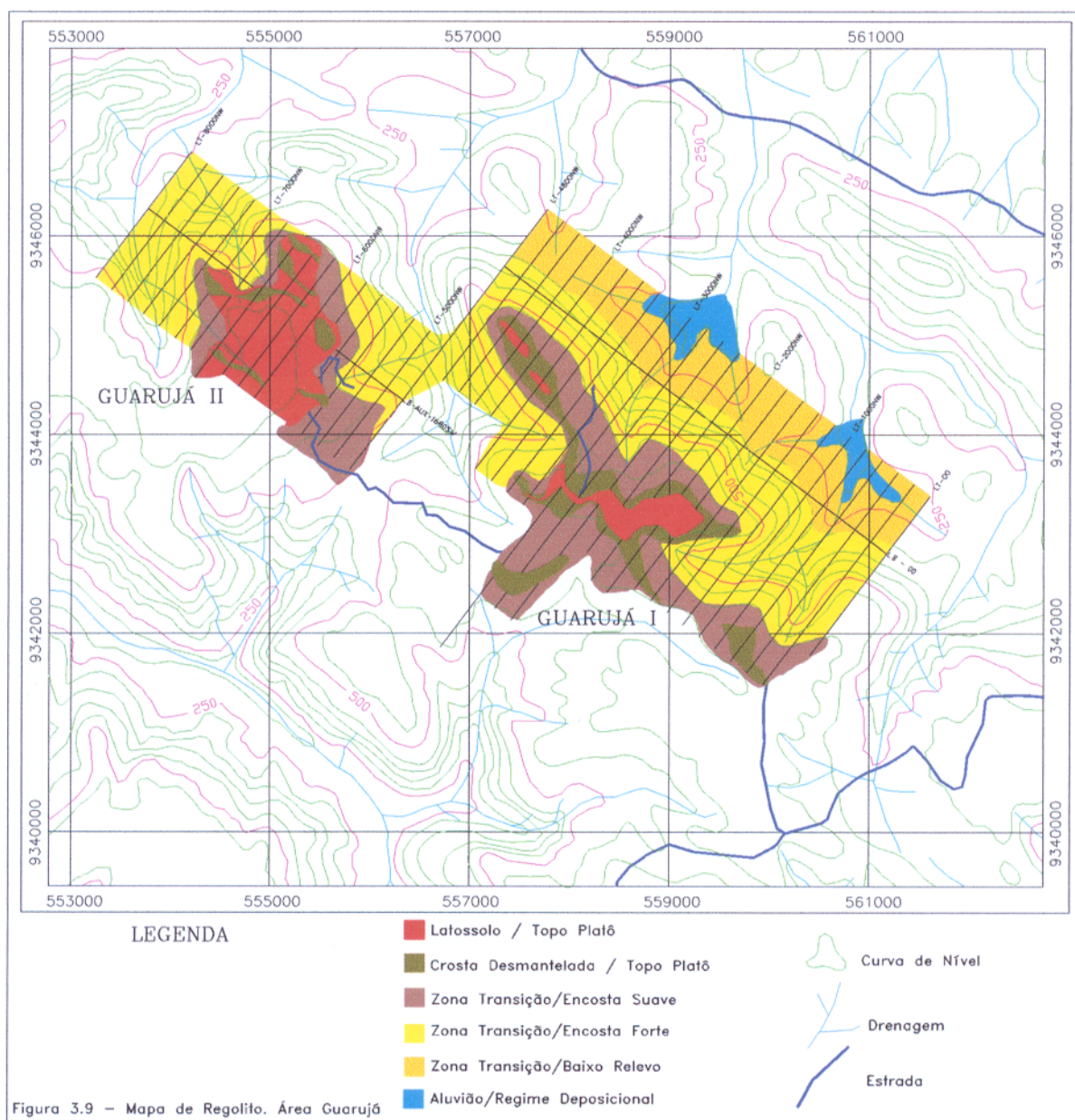
Ocorre nos níveis mais superiores dos platôs, dominando nas cotas acima de 600 m, e ocorrendo mais subordinadamente entre as cotas 550 e 600 m. Nas bordas dos platôs e, especialmente nas encostas, esse horizonte se encontra erodido, tornando o perfil laterítico incompleto ou truncado.

Na área **Guarujá** (Fig. 3.9), o horizonte de latossolo mostra-se mais representativo no platô localizado mais a noroeste da área (Guarujá II), onde tem um amplo domínio nas áreas com cotas superiores a aproximadamente 570 m. Na porção sudeste (Guarujá I), ao contrário, o latossolo aflora mais restritamente, ocorrendo como uma faixa estreita, às vezes descontínua, no centro do platô, nas cotas acima de 600 m. A espessura, no Guarujá I, varia de poucos centímetros até cerca de 5 metros, sempre aumentando, de maneira gradativa, das bordas para o centro do platô. O platô Guarujá II tem topo com direção NE-SW e seções de sondagem rasa foram executadas segundo a direção NW-SE. O horizonte de latossolo apresenta, no Guarujá II, maior espessura no centro do platô, onde chega a atingir 15 m, diminuindo de forma relativamente gradativa para as bordas, até desaparecer e permitindo o afloramento do horizonte subjacente de crosta desmantelada. Este comportamento, comum em todas as seções, faz com que o horizonte de latossolo tenha uma forma de pequena e suave calha, com a parte mais profunda e espessa na parte mais central do platô (Figs. 3.10 e 3.11).

Na área **Jaca** (Fig. 3.12), o horizonte de latossolo ocorre, novamente, na zona de platô, nos níveis topográficos mais elevados. Normalmente se posiciona em cotas superiores a 600 m, aparecendo, localizadamente, entre as cotas 550 e 600 m. Na porção do platô trabalhado, os latossolos ocorrem de maneira expressiva na parte oeste, marcando uma faixa contínua no centro do platô, com *trend* WNW. Na parte leste, entretanto, este horizonte ocorre de forma bem localizada. A espessura é mais significativa na sua porção oeste, onde pode atingir até cerca de 10 m, diminuindo para bordas e no sentido leste do platô.

Na área **Paulo Afonso** (Fig. 3.13), o horizonte de latossolo ocorre exclusivamente na malha do Paulo Afonso Norte, estando ausente, por processos erosivos, na malha do Paulo Afonso Sul. Ocorre como porções isoladas, ao longo do topo do platô estreito e alongado do Paulo Afonso Norte, em cotas sempre superiores a 550 m, mas inferiores a 600 m. A espessura máxima desse horizonte é de cerca de três metros.

O horizonte de latossolo é constituído por material argiloso, inconsolidado e com aspecto plástico. A coloração varia de vermelho a amarelado. Nota-se, nas zonas mais espessas, uma sutil diferenciação de uma cor mais vermelha na base para uma mais amarelada no topo. Lateralmente observa-se, também, variações na tonalidade, que deve



refletir o tipo do saprolito subjacente. Sobre pelitos escuros e rochas ricas em ferro, por exemplo, a coloração do latossolo é mais escura do que sobre quartzos-arenitos. A textura dessa unidade é, tipicamente, muito homogênea e fina. Nenhuma estrutura de sedimentação, como acamamento gradacional, é visualizada. Localizadamente, observa-se uma maior heterogeneidade na base do horizonte, com a presença de esparsas e pequenas concreções ferruginosas ou de grãos de quartzo.

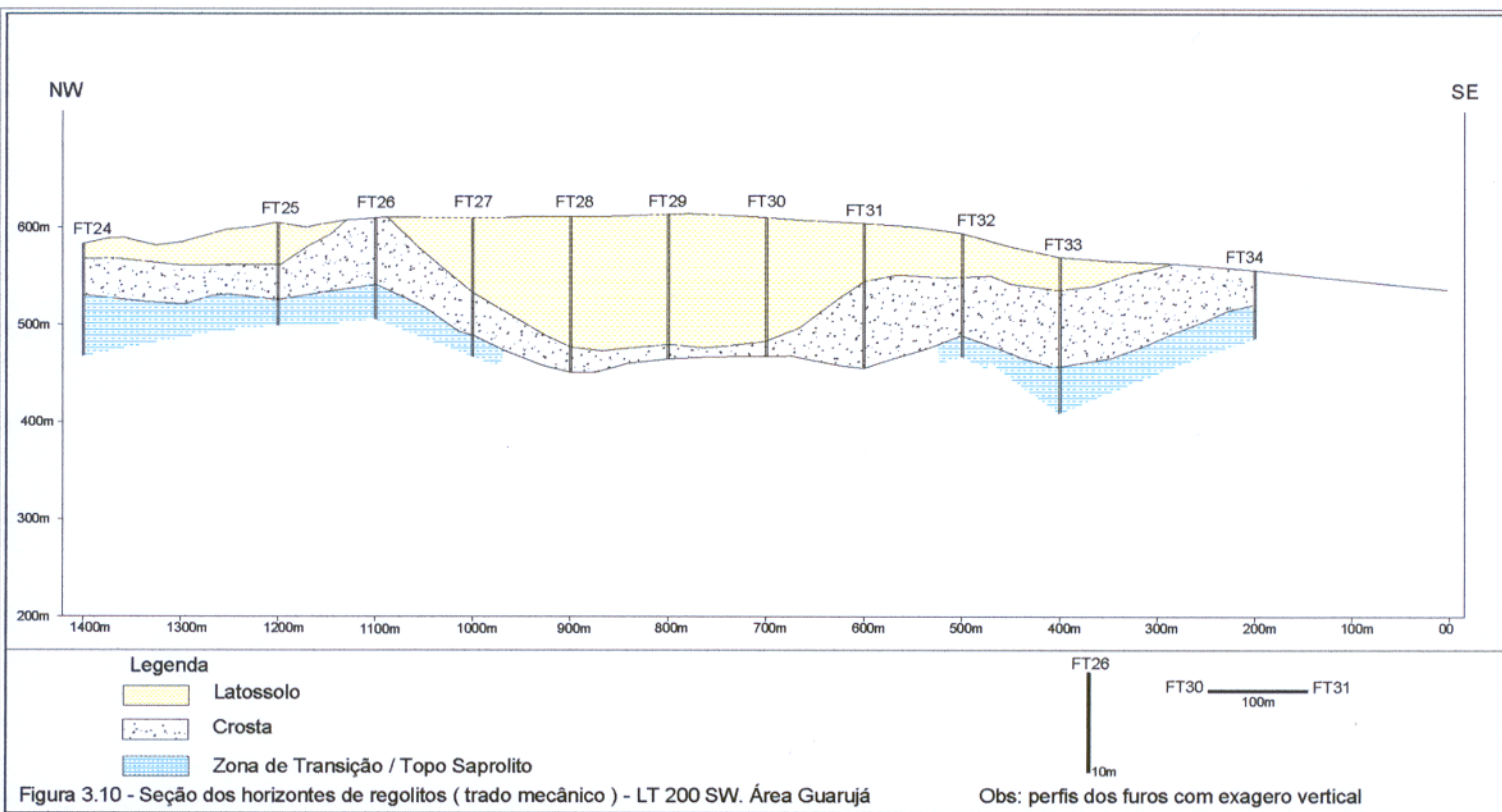
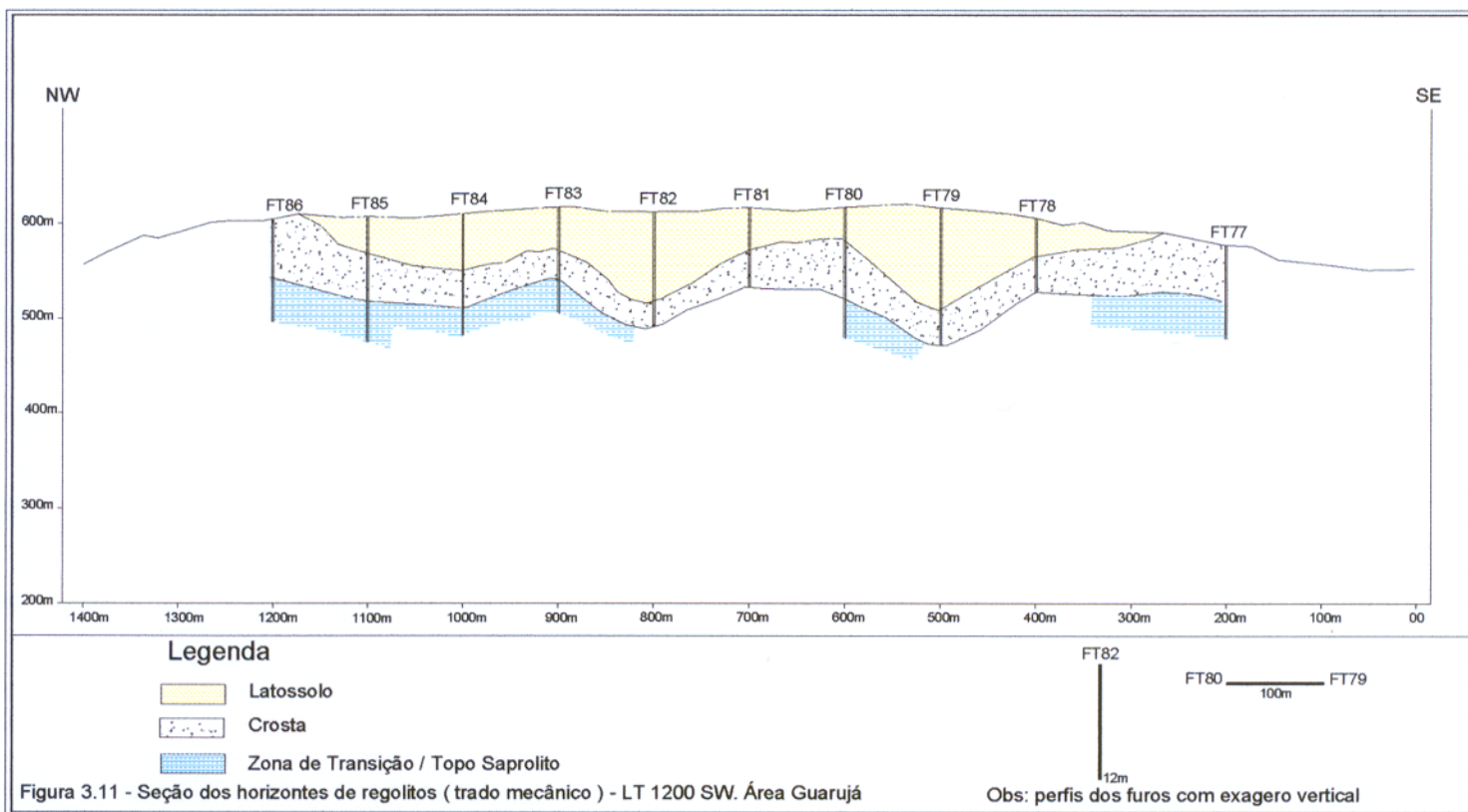
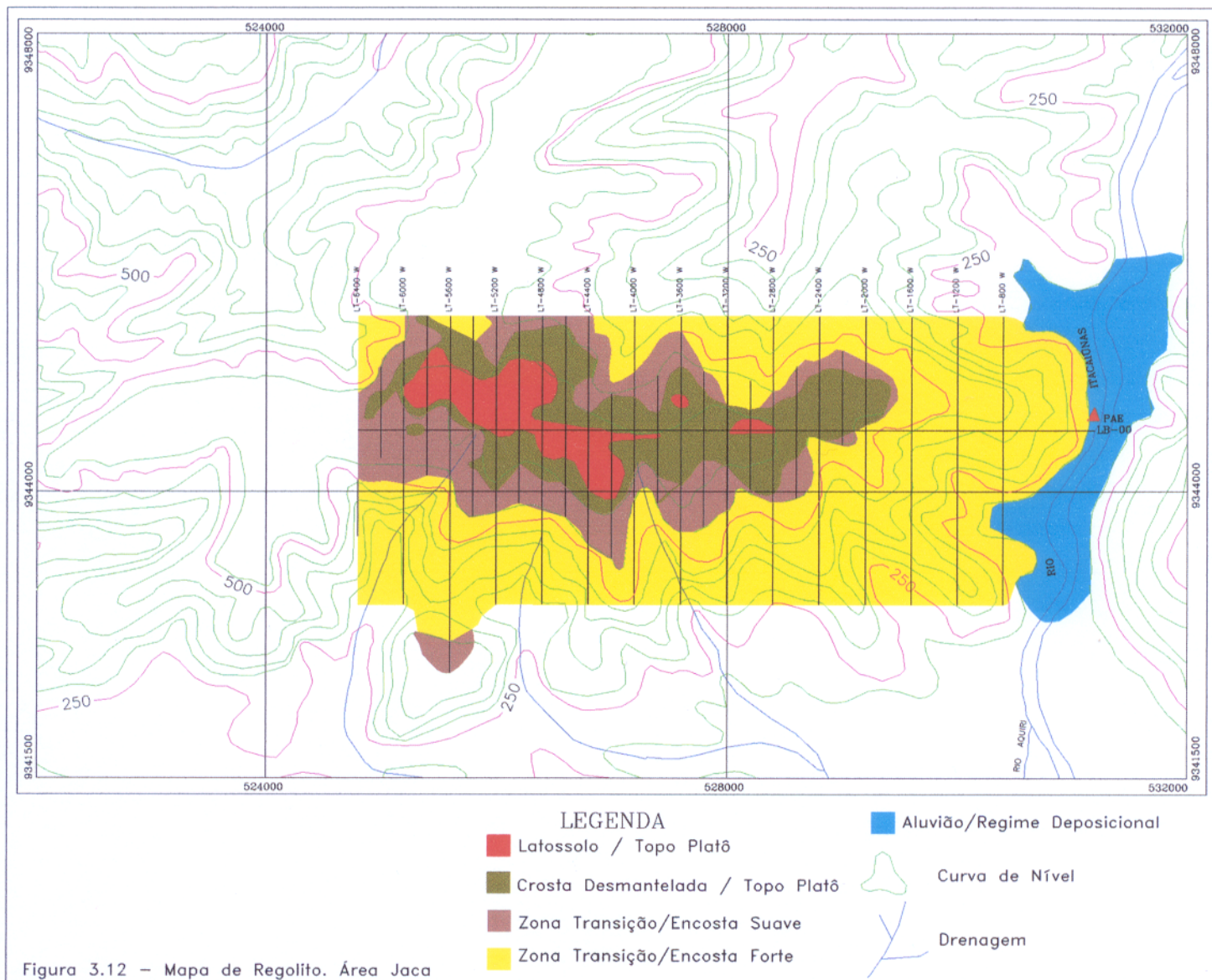
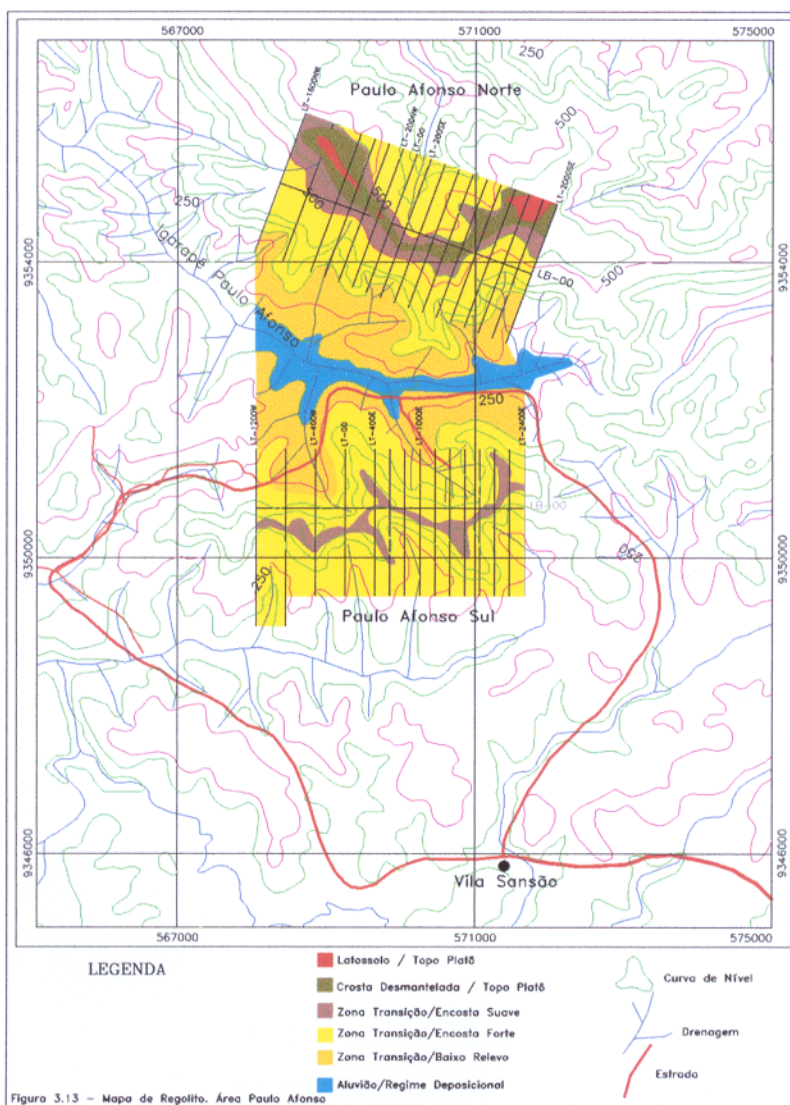


Figura 3.10 - Seção dos horizontes de regolitos (trado mecânico) - LT 200 SW. Área Guarujá







3.3.2 – Crosta desmantelada

O horizonte de crosta desmantelada ocorre, como os latossolos, nas partes superiores dos platôs, geralmente a partir da cota 550 m. Ela aflora com mais constância nas bordas dos platôs, diminuindo, normalmente, sua representatividade em direção ao centro, onde as cotas topográficas são mais elevadas, e este horizonte fica encoberto pelos latossolos. A passagem entre o latossolo e a crosta desmantelada é, quase sempre, abrupta, apresentando, assim, contato bem marcado (Fig. 3.14).

Na área **Guarujá**, o horizonte de crosta desmantelada apresenta boa expressividade de afloramentos na porção sudeste do platô (Guarujá I). Neste local, ele ocorre ao longo de

praticamente toda a extensão do platô, especialmente nas suas bordas, mas, às vezes, também dominando a parte central. No Guarujá II, ao contrário, sua abrangência é bem mais restrita devido ao maior desenvolvimento do latossolo. Aparece como faixas estreitas e descontínuas, posicionadas, principalmente nas bordas do platô ou nas cabeceiras de drenagens. No regime geomorfológico de encostas, inclusive no de declividade suave, o horizonte de crosta desmantelada deixa de aflorar, permitindo a exposição do horizonte

regolítico subjacente. As seções de sondagem rasa, no Guarujá II, mostram que a espessura do horizonte de crosta desmantelada é, em geral, de 3 a 5 m (Fig. 3.15). Localizadamente, existe um aumento nessa espessura, principalmente nas bordas do platô, atingindo até 10 m.

Em todas as seções, observa-se que o horizonte de crosta desmantelada apresenta uma feição suavemente ondulada, mostrando sempre uma tendência de rebaixamento em direção ao centro do platô, coincidindo com as maiores espessuras de latossolo. Esta feição ondulatória da crosta desmantelada está presente, também, em outros platôs de Carajás, constatado por perfis de sondagem rasa (Medeiros Filho, 2002).

Na área **Jaca**, o horizonte de crosta desmantelada ocorre exclusivamente no regime de topo de platô, principalmente a partir da cota 600 m, mas também aparecendo, especialmente na parte leste, entre as cotas 550 e 600 m. Este horizonte aflora, de maneira dominante, na parte leste do platô e de maneira mais subordinada na porção oeste, onde ele está encoberto ou contornando o horizonte de latossolo. Apresenta espessura estimada de 3 a 5 m.

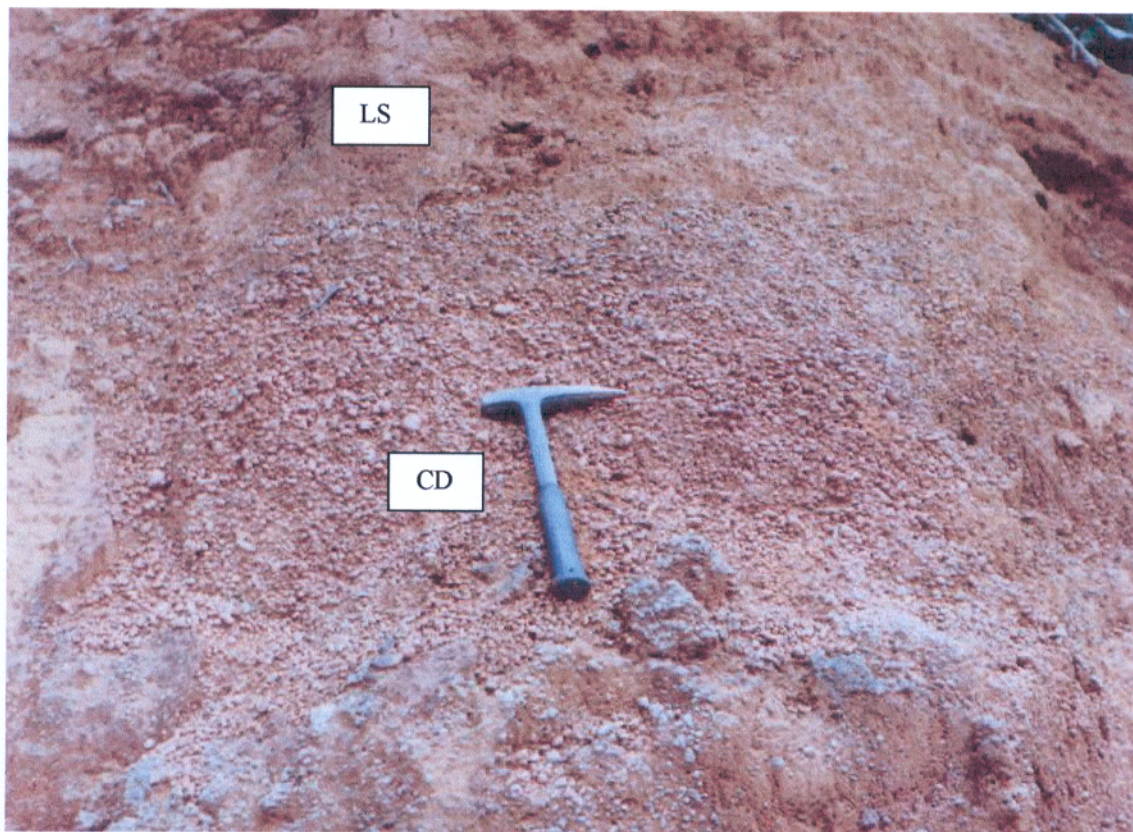


Figura 3.14 – Contato entre a Crosta Desmantelada (CD) e Latossolo (LS).

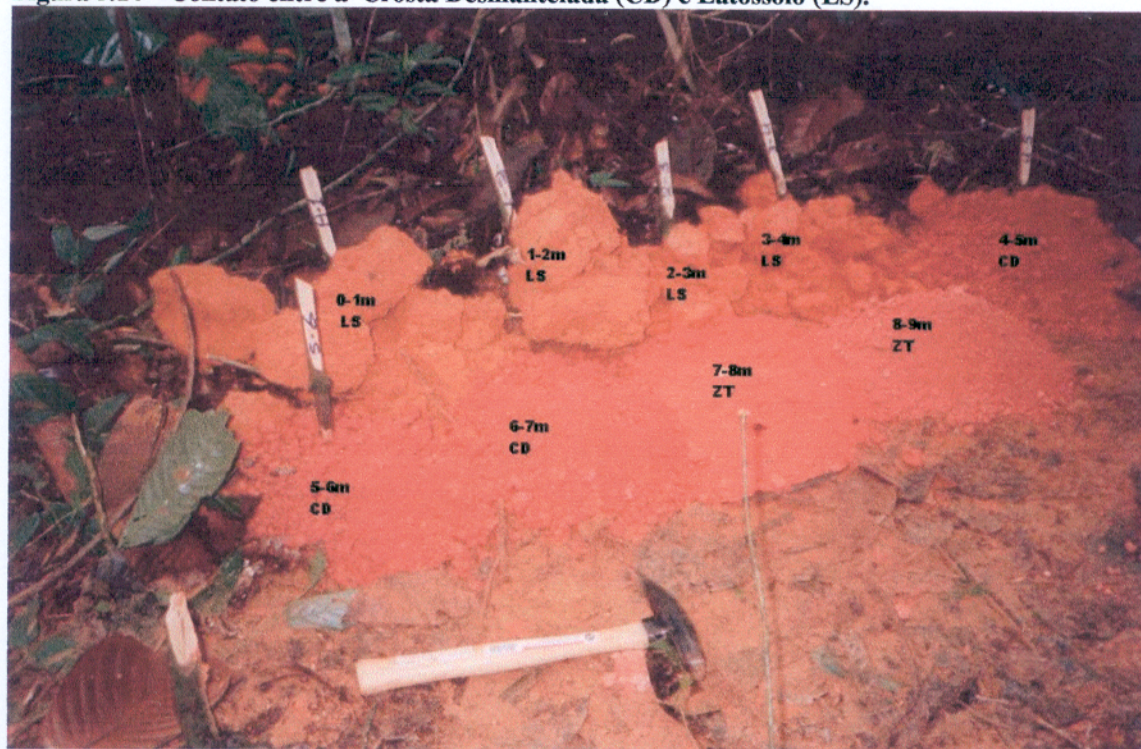


Figura 3.15 – Amostragem de Furo de Trado. Latossolo (0 a 4m); Crosta Desmantelada (4 a 7m) e Zona de Transição (7 a 9m).

Na área **Paulo Afonso**, o horizonte de crosta desmantelada ocorre ao longo de, praticamente, toda a extensão do topo do platô da malha Paulo Afonso Norte, na forma de uma faixa estreita e alongada. Este horizonte aparece, normalmente, acima da cota de 550 m e apresenta espessura estimada de 3 m. Na malha Paulo Afonso Sul, o horizonte de crosta desmantelada já se mostra erodido.

O horizonte de crosta desmantelada é composto, de forma geral, por uma grande quantidade de fragmentos e blocos, de tamanhos normalmente centimétricos a decimétricos, e concreções milimétricas a centimétricas, envolvidos por uma matriz argilosa. Este horizonte é interpretado como originado por processo de desmantelamento, principalmente por intemperismo químico, de uma crosta anterior endurecida (*duricrust*) ou com menor grau de fragmentação, formado em condição climática diferente da atual. Nos locais onde o horizonte de crosta desmantelada é mais espesso ou relativamente mais preservado, pode-se notar que os fragmentos maiores estão mais concentrados na base do horizonte (nível de fragmentos), havendo, normalmente, uma diminuição do tamanho em direção ao topo, onde fica caracterizado um nível de concreções. Em termos de forma, também pode-se observar, de uma maneira geral, uma gradação, com material mais anguloso na base, tornando-se mais arredondados em direção ao topo.

A matriz que envolve os fragmentos e concreções do horizonte de crosta desmantelada, é constituída de material argiloso, predominantemente vermelho e subordinadamente amarelo. O percentual da matriz, normalmente, cresce para o topo do horizonte e, em linhas gerais, tem características semelhantes ao do latossolo superior.

A porção concrecionária do horizonte de crosta desmantelada é caracterizada por concreções ferruginosas milimétricas a centimétricas, isoladas e dispersas na matriz argilosa, tendo densidade de concentração variável. Apresentam forma desde pisolitos a nódulos. Os pseudopisolitos mostram-se bem arredondados, com ou sem córtex, de coloração vermelha e, subordinadamente, amarelos a cinza escuro. Os nódulos são fragmentos normalmente centimétricos, irregulares, angulosos a sub-angulosos, de coloração avermelhados a amarelados.

Os fragmentos e blocos, centimétricos a decimétricos, presentes no horizonte de crosta desmantelada, apresentam grande heterogenidade em termos texturais e

composicionais. Texturalmente podem ser agrupados em três tipos principais ou maiores : pisolítica a concrecionária; brechóide a conglomerática e maciça. Existem, evidentemente, tipos intermediários ou transicionais entre essas classes. Os tipos com textura brechóide são os que ocorrem mais comumente.

As crostas com textura brechóide a conglomerática correspondem a fragmentos compostos por agregados de nódulos ou, subordinadamente, de litorelictos, compactados entre si ou imersos em uma matriz fina. A matriz aparece, percentualmente, variando de forma bem subordinada até de maneira significativa, envolvendo todos os nódulos. Os tamanhos dos nódulos variam de poucos milímetros até alguns centímetros, com os maiores atingindo 4 a 5 cm. A forma dos nódulos varia de arredondada a angulosa, sendo que os grãos mais finos apresentam, em geral, maior arredondamento, enquanto que os maiores são mais angulosos e, as vezes, alongados. Delgadas películas ou córtexes vermelhos a amarelados estão, muitas vezes, presentes envolvendo principalmente os nódulos menores e arredondados. A parte interna dos nódulos é constituída por uma massa fina avermelhada, apresentando subordinadamente porções cinza escura a metálica e quartzo preenchendo vazios. Nos nódulos maiores, essa massa avermelhada toma o aspecto de um agregado de pequenos nódulos. Os cristais de quartzo são incolores, milimétricos e apresentam forma predominantemente arredondada a angulosa, ocorrendo no interior dos nódulos ou na matriz, quase sempre preenchendo vazios. Os fragmentos com textura brechóide a conglomerática possuem certa quantidade de vazios que imprimem, a estas rochas, caráter cavernoso. Este aspecto parece ser mais forte com o aumento da quantidade de nódulos mais grosseiros e a diminuição percentual da matriz .

Os tipos com textura pisolítica a concrecionária ocorrem como pequenos nódulos envoltos em matriz fina, vermelha a amarelada. O tamanho dos nódulos, normalmente milimétricos, é relativamente homogêneo. Os nódulos possuem formas arredondadas a localmente alongadas, apresentando ou não fino córtex. A parte interna dos nódulos é constituída por material avermelhado, fino e, subordinadamente, material cinza escuro a metálico. Os córtexes apresentam as mesmas características composicionais do interior dos nódulos. Quartzo ocorrem esporadicamente, como grãos milimétricos preenchendo pequenos vazios na matriz.

Os tipos com textura denominada maciça são representados por fragmentos constituídos por material fino, vermelho a vermelho escuro, endurecido, com ausência ou ocorrência esparsas de nódulos. Microvazios podem estar presentes por toda a rocha em quantidades muito variáveis. Quartzo ocorre, normalmente, preenchendo pequenos vazios. Este tipo textural pode corresponder a lito-relictos endurecidos e ferrificados de unidades subjacentes, como saprolito e, principalmente, da zona de transição. Um outro tipo, classificado dentro desta classe, corresponde a níveis muito ferrificados, de coloração vermelha escura a cinza escura e apresentando, normalmente, alta densidade. Tem, em geral, caráter maciço, mas são observados fragmentos com aparente laminação e, mais raramente, aspecto brechado. Em campo, este último tipo, foi classificado como ironstone e pode corresponder a lito-relictos de rochas com material ferruginoso associado, provenientes de processos hidrotermais

3.3.3 – Zona de transição

O contato do horizonte de crosta desmantelada com o horizonte de zona de transição ocorre gradacionalmente ou de forma relativamente brusca. Pode-se, em qualquer dos dois casos, marcar com certa facilidade o limite entre os dois horizontes. O horizonte de zona de transição, nas três áreas estudadas, aflora a partir do truncamento do perfil laterítico, pela erosão dos horizontes superiores de crosta desmantelada e latossolo. A representatividade da zona de transição, em superfície, começa no regime geomorfológico de encosta suave que ocorre nas bordas dos platôs e continua a aflorar nas encostas dos platôs, com declividades fortes e nas bases, onde o relevo torna-se plano a ondulado. Na área Paulo Afonso, a malha Paulo Afonso Sul é inteiramente dominada pelo horizonte de zona de transição, desde que a parte superior da serra, em forma de crista com cota em torno de 350 a 400 m, mostra-se desprovida dos horizontes de crosta desmantelada e latossolo.

O horizonte de zona de transição é composto por materiais argilosos a arenosos, finos a médios, de coloração variadas, com predomínio de cor avermelhada e apresentando caráter homogêneo a localizadamente mosqueado. Fragmentos de saprolitos e lito-relictos, envolvidos pelo solo, são comuns, aumentando em tamanho e quantidade em direção à base. Fragmentos esporádicos de crosta desmantelada pode ocorrer no topo. As variações composicionais, de coloração e granulometria devem refletir os tipos saprolíticos

subjacentes. O contato com o horizonte de saprolito é, em geral, difuso e definido a partir do predomínio de feições saprolíticas sobre as pedolíticas. Salienta-se que nas encostas, especialmente naquelas com declive mais acentuado, podem ocorrer movimentos laterais de materiais (*soil creeping*), fazendo com que, nestes locais, exista uma combinação de componentes residuais e transportados.

3.4 – DISTRIBUIÇÃO MINERALÓGICA AO LONGO DO PERFIL

Estudos mineralógicos, por difração de raios-X, foram feitos em amostras de três furos de trado da área Guarujá II, correspondendo aos horizontes de latossolo, crosta desmantelada e zona de transição. Foram analisadas um total de 38 amostras, sendo 11 do FT-17, 7 do FT-44 e 10 do FT-73. Cada amostra representa um intervalo de 1 metro do furo de trado. Salienta-se que os furos FT-17 e FT-44 estão posicionados sobre rochas pelíticas e areníticas finas, enquanto o FT-73 encontra-se sobre quartzo-arenitos.

No laboratório do CPGG da UFPA, as amostras foram pulverizadas em gral de ágata até uma granulometria de aproximadamente 150 # e montadas em porta-amostras de alumínio vazado, com preenchimento por trás (*back-loading*) de modo a evitar orientação preferencial na porção da amostra que será submetida aos raios-X. O equipamento utilizado foi um difratômetro da marca Philips PW 3710 e goniômetros de varredura vertical PW 1050/3020, com tubo de ânodo de Cu, fenda de divergência de 1°, fenda de recepção de 0,2 mm, fenda de espalhamento de 1° e monocromador de grafite. As análises foram realizadas em amostra total (método do pó) com 2Θ variando de 5-65°, em *steps* de 0,02°. Os resultados (difratogramas) são apresentados, para tratamento e interpretação, através do sistema APD (*Automated Powder Diffraction*), também da Philips. A identificação mineralógica é feita através da comparação do padrão difratométrico das amostras com aqueles dos arquivos do banco de dados PDF (*Powder Diffraction File*), do JCPDS-ICDD (*Internation Center for Diffraction Data*).

De maneira geral, a mineralogia observada nos três furos da área Guarujá II é representada por porções variáveis de óxidos e hidróxidos de ferro (hematita e goethita), caulinita, quartzo e gibbsita. Esta associação reflete uma composição mineralógica comum, observada na parte superior da maioria dos perfis lateríticos em terrenos tropicais úmidos

(Lucas & Chauvel, 1992; Trescases, 1992). Um aspecto relevante, entretanto, não está propriamente na composição em si, mas nas variações na composição mineralógica e no grau de cristalinidade observadas nos diferentes horizontes amostrados. Estas diferenças podem auxiliar na melhor caracterização dos horizontes lateríticos, inclusive dos seus comportamentos geoquímicos. A descrição das características e variações mineralógicas para cada perfil/furo serão apresentadas a seguir e, posteriormente, serão discutidos os aspectos mais relevantes.

FT-17 - Foram perfurados 11 m, sendo, da base para o topo, 3 m no horizonte de zona de transição (8 a 11 m), 6 m do horizonte de crosta desmantelada (2 a 8 m) e 2 m (0 a 2 m) de latossolo (Fig. 3.16).

A zona de transição é caracterizada por um domínio de caulinita e hematita, com uma menor quantidade de gibbsita. Nas três amostras deste horizonte inferior, os padrões são bastante semelhantes, não havendo grandes diferenças na porcentagem e no grau de cristalinidade dos minerais constituintes. A passagem da zona de transição para a crosta desmantelada é marcada por forte e brusca queda na quantidade de caulinita e, conseqüentemente, por um predomínio da hematita. O horizonte de crosta desmantelada é caracterizada, portanto, pelo domínio de hematita, com participações subordinadas de caulinita, gibbsita, Al-goethita e quartzo. A caulinita e Al-goethita apresentam discretos aumentos, na crosta desmantelada, em direção ao topo do horizonte; a gibbsita tem comportamento relativamente homogêneo com leve acréscimo de quantidade na parte

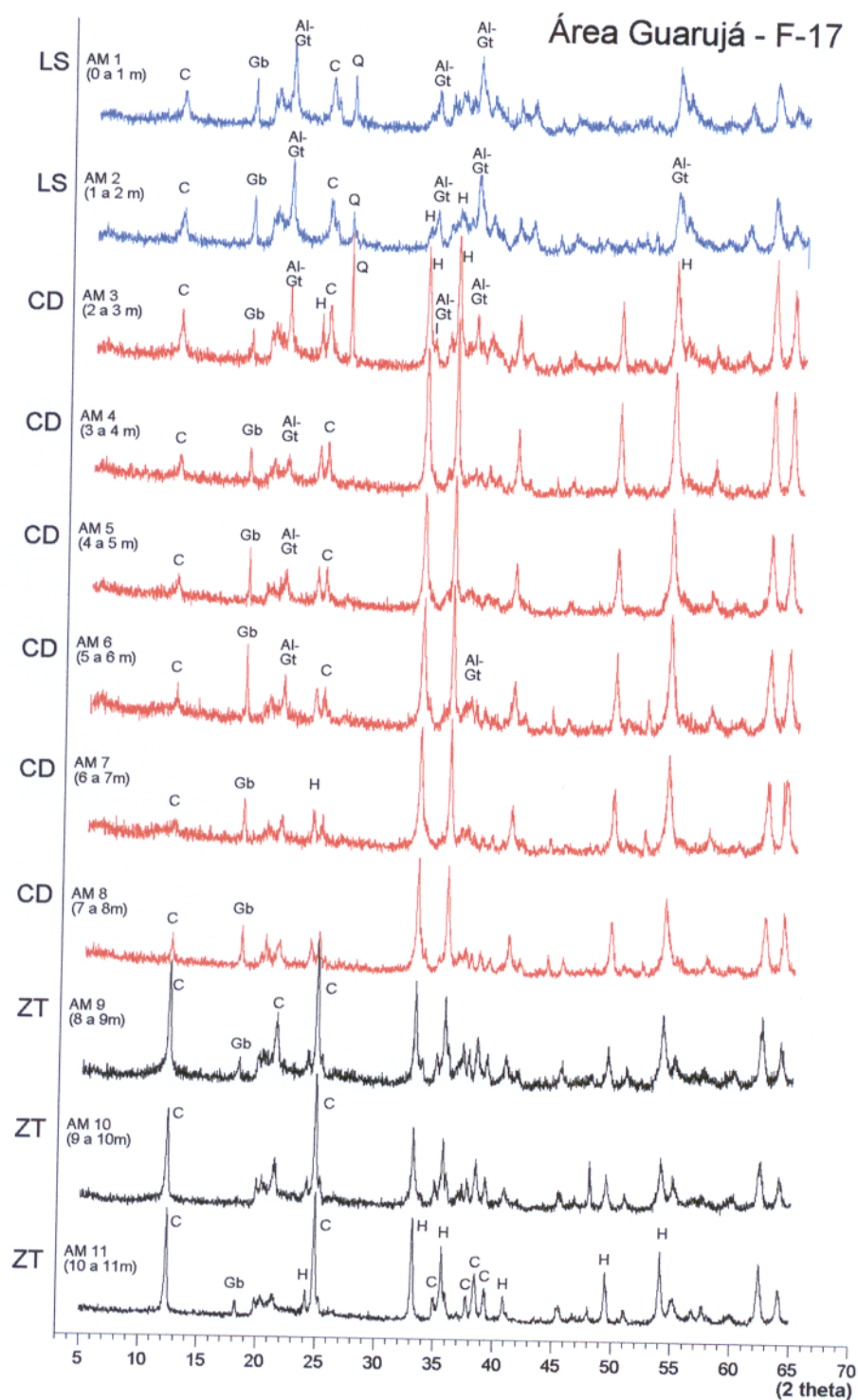


Figura 3.16 – Distribuição mineralógica do perfil do furo FT-17.
 ZT (Zona de Transição), CD (Crosta desmantelada); LS (Latossolo)
 C (Caulinita), Gb (Gibbsita), H (Hematita), Al-Gt (Al-Goethita)

central (4 a 6 m) e o quartzo mostra-se ausente ao longo de todo o horizonte, com exceção do intervalo mais superior (2 a 3 m) quando ele subitamente aparece. O contato crosta desmantelada x latossolo é evidenciado, principalmente, pela queda na quantidade e no grau de cristalinidade da hematita. O horizonte de latossolo também é caracterizado por uma maior participação, quando comparada com a crosta desmantelada, da Al-goethita e pela presença de caulinita, gibbsita e quartzo.

Numa análise individual dos minerais presentes, observa-se que a caulinita é dominante na zona de transição, caindo abruptamente na base da crosta desmantelada e, a partir daí, tendo um suave crescimento em direção ao topo do perfil. A gibbsita encontra-se presente em todos os horizontes, com maior presença na crosta desmantelada e latossolo. A Al-goethita é mais representativa na parte superior da crosta desmantelada e no latossolo. O quartzo ocorre exclusivamente no latossolo e no topo da crosta desmantelada e, finalmente, a hematita é representativa na zona de transição e, principalmente, na crosta desmantelada e mostra forte diminuição, na quantidade e grau de cristalinidade, no horizonte de latossolo.

FT-44 – Foram perfurados 12 m. A amostragem, entretanto, apenas foi iniciada a partir do topo da crosta desmantelada (5 m). Então, neste furo, o horizonte de latossolo não foi coletado e, conseqüentemente, não foi analisada sua mineralogia. Tem 2 m (10 a 12 m) de zona de transição e 5 m (5 a 10 m) de crosta desmantelada (Fig. 3.17).

A zona de transição apresenta domínio de caulinita e hematita, com presença subordinada de gibbsita, Al-goethita e quartzo. A quantidade de gibbsita é maior na parte superior do horizonte (10-11 m). Os outros minerais presentes, neste horizonte, apresentam um comportamento perfeitamente homogêneo nos dois metros analisados. O contato entre a zona de transição e a crosta desmantelada é claramente marcado pela brusca queda na quantidade de caulinita. Dessa forma, o horizonte de crosta desmantelada é representado por um domínio de hematita e pela presença de gibbsita, Al-goethita, caulinita e quartzo. As quantidades de hematita, caulinita e Al-goethita não mostram variações importantes ao longo do horizonte, tendo os dois últimos presença subordinada. A gibbsita tem presença relativamente significativa na base do horizonte (8 a 10 m) e está ausente nos níveis superiores. O quartzo ocorre sempre discretamente, com uma maior representatividade no topo do horizonte (5 a 7 m).

Estudando-se o comportamento individual dos minerais presentes no FT-44, observa-se que a caulinita é bem representativa na zona de transição e subordinada na crosta desmantelada e que esta diferença é o marcador principal do contato entre os dois horizontes. A Al-goethita aparece em todo o perfil amostrado, mas de forma muito subordinada. A gibbsita possui uma porção com participação bem efetiva, correspondendo ao topo da zona de transição e a base da crosta desmantelada. O quartzo ocorre discretamente, com um leve aumento no topo da crosta desmantelada e a hematita aparece como mineral dominante em toda zona de transição (junto com a caulinita) e na crosta desmantelada.

FT-73 – Furo com 10 m de profundidade. A zona de transição abrange 5 m (5 a 10 m), a crosta desmantelada 4 m (1 a 5 m) e o latossolo corresponde a cobertura de 1 m (Fig. 3.18).

A zona de transição é constituída predominantemente por quartzo, com parcelas menores de hematita, Al-goethita, caulinita, gibbsita e muscovita. O quartzo ocorre, ao longo do horizonte, em quantidade homogênea, mas apresenta ligeira queda no metro mais superior (5 a 6 m). A hematita ocorre discretamente, podendo se perceber um acréscimo no intervalo de topo. A caulinita também aparece de maneira discreta, mostrando uma pequena queda na amostra mais superior. A gibbsita ocorre quase que exclusivamente no intervalo de 5 a 6 m, mostrando, neste local, alta representatividade. A Al-goethita mostra diminuta participação percentual e a muscovita foi identificada, como acessório, nos quatro níveis mais basais (6 a 10 m). O contato zona de transição e crosta desmantelada é evidenciado por diversos marcadores: substancial aumento de hematita, aumento de caulinita e Al-goethita e queda na proporção de quartzo. A crosta desmantelada é caracterizada, portanto, por domínio de hematita, quantidade subordinada de quartzo, caulinita e Al-goethita e discreta presença de gibbsita. A hematita, caulinita e Al-goethita não mostram variações importantes na sua quantidade ao longo do horizonte de crosta desmantelada. O quartzo apresenta alguma heterogeneidade quantitativa e a gibbsita aparece discretamente no topo do horizonte. O contato entre os horizontes de crosta desmantelada e latossolo é evidenciado pelos seguintes fatores : queda na quantidade e no grau de cristalinidade da hematita; aumento nas quantidades de quartzo e gibbsita e queda no grau de cristalinidade da caulinita. O latossolo é caracterizado, no único metro amostrado, por um domínio de quartzo e quantidades menores de caulinita, Al-goethita, hematita e gibbsita. Observa-se,

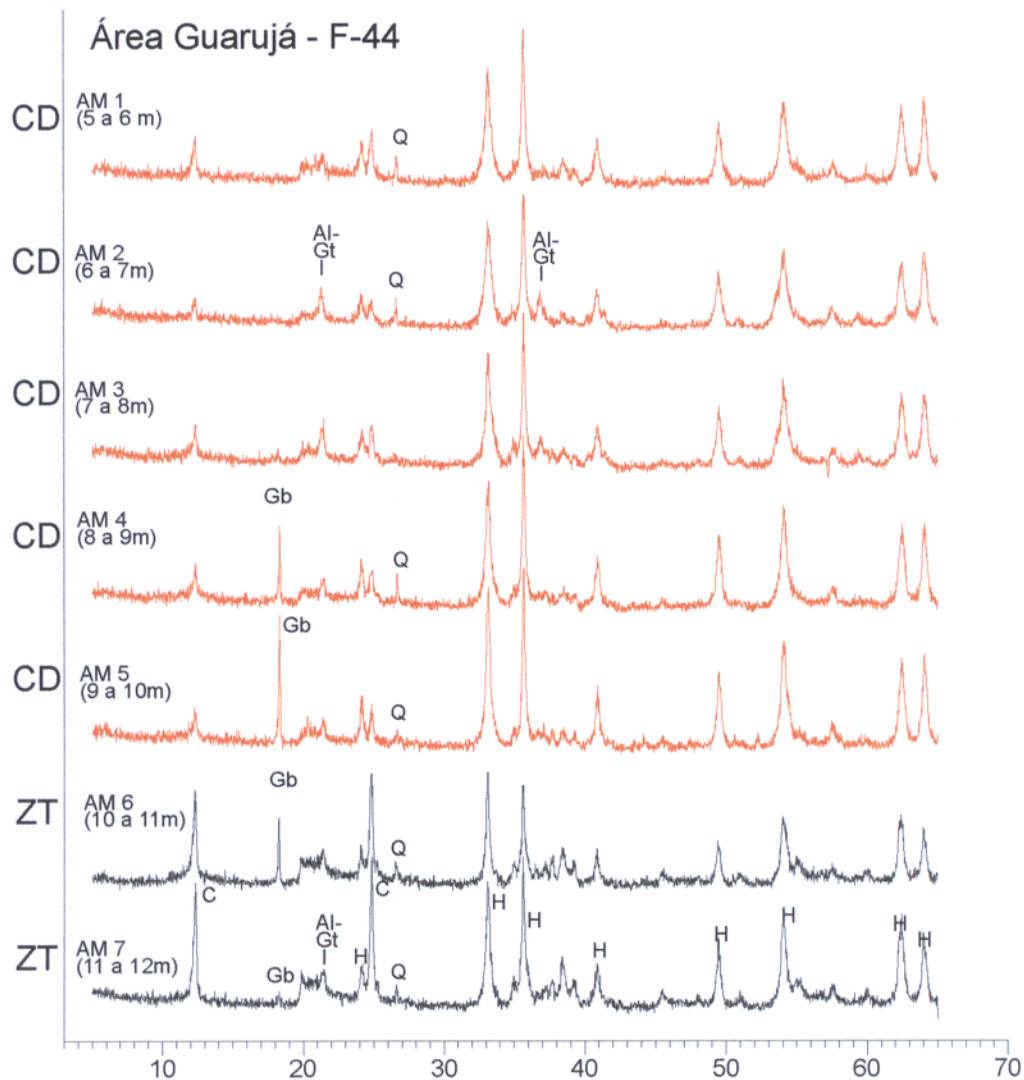


Figura 3.17 – Distribuição mineralógica do perfil do furo FT-44.
 ZT (zona de transição), CD (crosta desmantelada)
 LS (latossolo).

em alguns minerais, uma nítida queda no grau de cristalinidade, representados por padrões difratométricos mais abertos e mal delineados.

Um estudo do comportamento individual dos minerais ao longo de todo perfil do FT-73 mostra que o quartzo encontra-se bem representativo ao longo de todo o furo, especialmente nos horizontes de zona de transição e latossolo. A hematita tem discreta participação na zona de transição, torna-se o mineral dominante na crosta desmantelada e apresenta queda na quantidade e cristalinidade no latossolo. A caulinita e a Al-goethita ocorrem subordinadamente, tendo uma tendência de crescimento quantitativo para o topo do perfil. A gibbsita ocorre exclusivamente no latossolo e topo da crosta desmantelada. Salienta-se, ainda, a presença de pequenas quantidades de muscovita na base do horizonte de zona de transição.

O estudo da distribuição mineralógica ao longo do perfil de intemperismo foi desenvolvido, como já relatado, a partir de, apenas, 3 furos de trados. Apesar da pouca expressividade da amostragem, que impede uma discussão mais abrangente e conclusiva, algumas considerações importantes podem ser levantadas : a) A mineralogia observada, de uma maneira geral é representada por porções variáveis de óxidos e hidróxidos de ferro (hematita e goethita), caulinita, quartzo e gibbsita; b) Um aspecto importante está nas variações na composição mineralógica e no grau de cristalinidade observadas nos diferentes horizontes amostrados; c) A zona de transição, nos furos FT-17 e FT-44, é caracterizada por um domínio de caulinita e hematita. No furo FT-73, entretanto, a zona de transição é constituída predominantemente por quartzo. Esses comportamentos diferentes estão relacionados aos tipos de rochas subjacentes. O FT-44 encontra-se sobre quartzo-arenitos, com poucos minerais micáceos, enquanto os outros dois furos posicionam-se sobre pelitos e arenitos finos e impuros; c) O contato entre os horizontes de zona de transição e crosta desmantelada é marcado, normalmente, por uma queda brusca na quantidade da caulinita e por um predomínio de hematita; d) o horizonte de crosta desmantelada é sempre representado por um domínio de hematita e pela presença subordinada de caulinita, gibbsita, Al-goethita e quartzo; e) O contato entre os horizontes de crosta desmantelada e latossolo é evidenciado, principalmente, pela diminuição na quantidade da hematita e pela nítida queda no grau de cristalinidade de alguns minerais, especialmente a hematita e

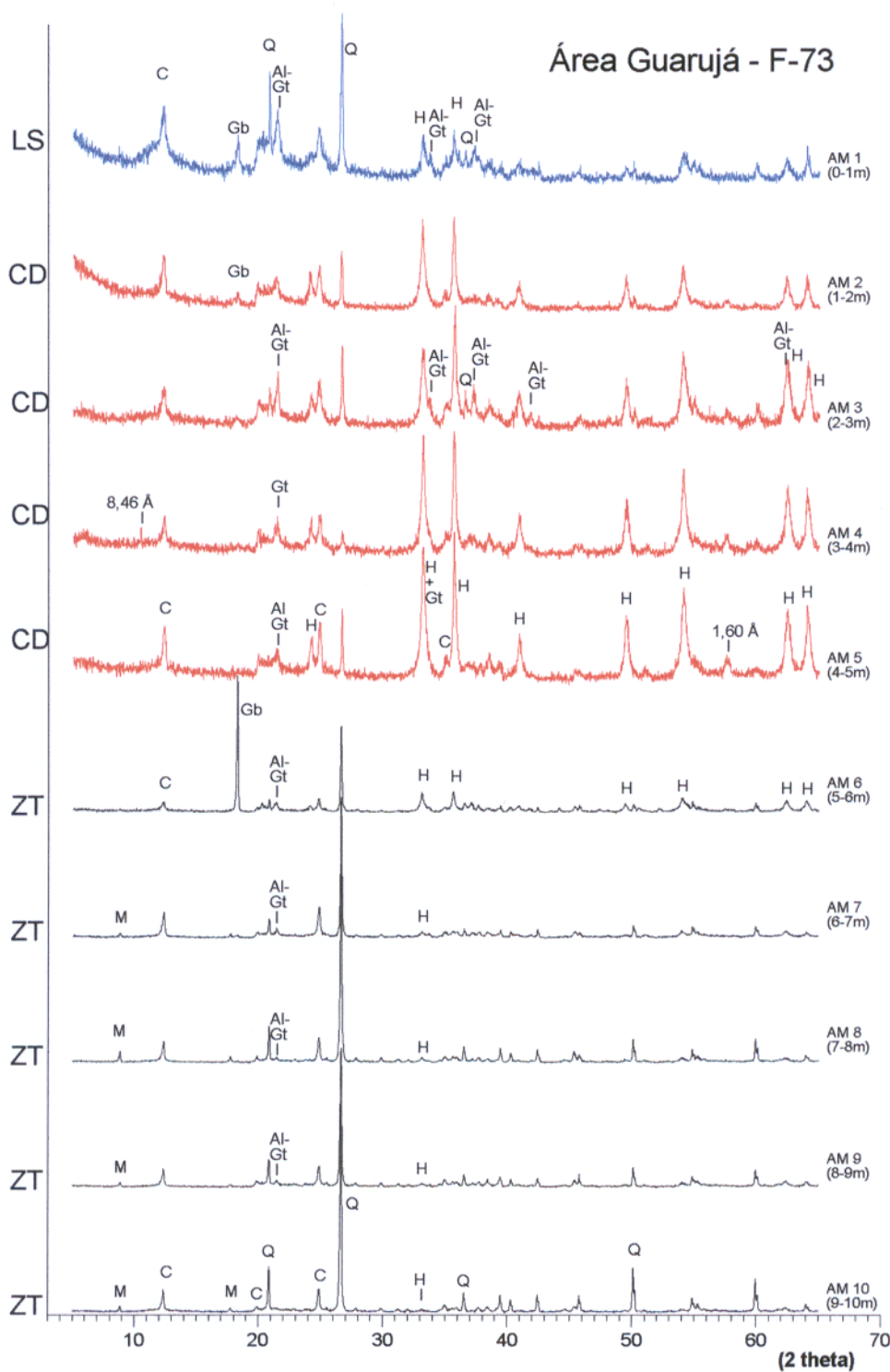


Figura 3.18 – Distribuição mineralógica do perfil do furo FT-73.
 ZT (Zona de Transição), CD (Crosta desmantelada); LS (Latossolo)
 C (Caulinita), Gb (Gibbsita), H (Hematita), Al-Gt (Al-Goethita)

caulinita; f) A Al-goethita ocorre de maneira subordinada, mas mostra-se mais representativa na parte superior da crosta desmantelada e no latossolo.

3.5 - DISCUSSÕES

3.5.1 – Sobre a estruturação e a classificação do perfil de intemperismo das áreas trabalhadas

Os horizontes regolíticos, definidos nas três áreas deste trabalho, foram comparados com alguns perfis estabelecidos em trabalhos anteriores, em Carajás.

Costa (1991) classificou os lateritos na Amazônia em dois grandes grupos: maduros e imaturos. Os lateritos maduros, em geral, compoem o relevo mais elevado, sob a forma de platôs e morros. Esses perfis são sempre compostos, segundo este autor, dos seguintes horizontes: crosta ferruginosa, horizonte bauxítico e/ou de fosfato de alumínio, horizonte argiloso e horizonte pálido ou transicional. A crosta estaria posicionada, normalmente, no topo dos perfis e estaria recoberta por latossolos areno-argilosos autóctones e alóctones. O horizonte bauxítico seria encontrado logo abaixo da crosta ferruginosa, em contato direto e quase abrupto, sendo constituído de rocha amarela, creme a avermelhada, localmente formando uma camada dura (crosta aluminosa). O horizonte bauxítico e/ou de fosfato de alumínio foi definido como o melhor critério para distinguir lateritos maduros dos imaturos. O horizonte argiloso seria constituído fundamentalmente por argilominerais e apresentaria feições de zona mosqueada e saprolítica. O horizonte pálido ou transicional seria encontrado abaixo do horizonte argiloso, em contato direto com a rocha-mãe, numa espécie de base do saprolito.

Costa (1993) descreveu o perfil laterítico do Igarapé Bahia, classificando-o dentro dos perfis de lateritos maduros mais antigos. O perfil imediatamente acima da mineralização foi definido como um gossan submetido a lateritização, apresentando, na superfície, um chapéu de ferro intemperizado parcialmente ou completamente para solos vermelhos.

Medeiros Filho et al. (1994) descreveram os perfis lateríticos nos alvos Tanque e Breves, localizados em platôs na região ao redor do Igarapé Bahia. Dividiram o perfil em três componentes principais: pedolítico, saprolítico e *bedrock*. O componente pedolítico

mostrava-se subdividido, do topo para a base, em três unidades : a) Solo argiloso ou pós-laterítico; b) Zona pisolítica; c) Zona de mistura, correspondendo a uma unidade argilosa (mosqueada) que gradava para o componente saprolítico.

Angélica (1996) estudando a área do depósito do Igarapé Bahia, descreveu o perfil laterítico-gossânico sobre o corpo de minério e o perfil laterítico sobre as encaixantes. Neste último foram individualizados 4 horizontes acima da rocha fresca: zona de transição, saprolito, crosta laterítica e latossolo. O topo do perfil seria, freqüentemente, recoberto por latossolos argilosos a areno-argilosos amarelos, com espessura variando de poucos centímetros (próximos as encostas do platô) até cerca de 10 m, na parte central, assemelhando-se às coberturas do tipo Belterra-Clay. O contato com a crosta laterítica seria, em geral, abrupto, irregular e sem conformidade com a superfície atual. A crosta laterítica apresentava espessura variável (em média 10 m), podendo aflorar nas encostas do platô. No topo do horizonte de saprolito foi posicionada uma zona com feição mosqueada.

O **horizonte de latossolo** definido neste trabalho coincide com os horizontes de latossolos de Costa (1991, 1993) e de Angélica (1996) e com a unidade de solo pós-laterítico de Medeiros Filho et al (1994). O **horizonte de crosta desmantelada**, aqui definida, corresponde a crosta ferruginosa de Costa (1991), a zona pisolítica de Medeiros Filho et al. (1994) e, ainda, a crosta laterítica de Angélica (1996). O **horizonte de zona de transição** descrita neste trabalho, corresponde a zona de mistura de Medeiros Filho et al. (1994), a parte superior (zona mosqueada) do horizonte argiloso de Costa (1991) e a parte superior do horizonte de saprolito de Angélica (1996).

Os perfis de intemperismo das três áreas trabalhadas se posicionam dentro dos relevos mais altos de Carajás, em forma de platôs, e estão expostos aos processos de intemperismo desde o final do Cretáceo (Vasconcelos, 1996). Estas características permitem classificá-los dentro dos perfis maduros de Costa (1991). Entretanto, a ausência de um horizonte bauxítico e/ou de fosfato de alumínio, imediatamente abaixo da crosta ferruginosa ou crosta desmantelada, tornam os perfis das três áreas trabalhadas diferentes do perfil maduro clássico postulado por Costa (1991). Esta diferença é significativa, na medida que Costa (1991) postula que a presença do horizonte bauxítico e/ou de fosfato de alumínio seria o fator determinante de diferenciação entre os perfis maduros e imaturos. A explicação para esta ausência pode ser creditada a litodependência, já que as rochas em

Carajás por serem portadoras de teores relativamente altos de Fe, poderiam inibir o desenvolvimento de uma crosta aluminosa ou fosfática. Por outro lado, o grau de fragmentação ou desmantelamento das crostas nas áreas trabalhadas também parece ser algo contrastante com o perfil maturo proposto por Costa (1991). Então, o enquadramento das áreas trabalhadas dentro do perfil laterítico maturo de Costa (1991) permanece válida no que se refere ao seu posicionamento geomorfológico e na idade de formação, mas apresentam diferenças importantes em relação ao perfil padrão proposto.

Serão apresentadas, a seguir, algumas discussões sobre a estruturação e classificação do perfil de intemperismo descritos neste trabalho, em comparação com trabalhos desenvolvidos em áreas não localizadas em Carajás.

Lecomte e Zeegers (1992) discutem e propõem diversos perfis lateríticos em terrenos tropicais úmidos (*rainforest*), caracterizados por precipitações pluviométricas na ordem de 1600 a 3000 mm /ano e elevadas temperaturas médias anuais. Eles afirmam, ainda, que os processos de intemperismo relacionados ao clima atual parecem apenas modificar ou prolongar perfis já existentes e que foram formados dentro de condições climáticas diferentes. Os perfis de intemperismo são subdivididos de acordo com a intensidade de alteração atual. Dentre as diversas divisões propostas, os perfis nas áreas trabalhadas apresentam similaridades com os tipos A 20{1}, correspondendo a perfis pré-existent preservados, submetido a alteração recente em grau moderado, e A 30{1}, correspondendo a perfis submetidos a alteração recente de grau forte e denominado perfis de *stone lines* lateríticos. O perfil de intemperismo A 20{1} consiste de um horizonte superior de argilas vermelhas a amareladas com variadas quantidades de nódulos ferruginosos (horizonte So) em contato com um horizonte nodular (No) que grada para uma zona mosqueada (Mz) e saprolito (Sa) (fig.3.19). Comparando-se com os perfis das áreas trabalhadas, observa-se não existir um horizonte correspondente ao latossolo, já que o horizonte So é pouco desenvolvido e apresenta quantidades variáveis de nódulos ferruginosos, inexistentes no latossolo. Por outro lado, existem similaridades entre o horizonte de crosta desmantelada e zona de transição das áreas trabalhadas com, respectivamente os horizontes No e Mz do perfil A 20{1}.

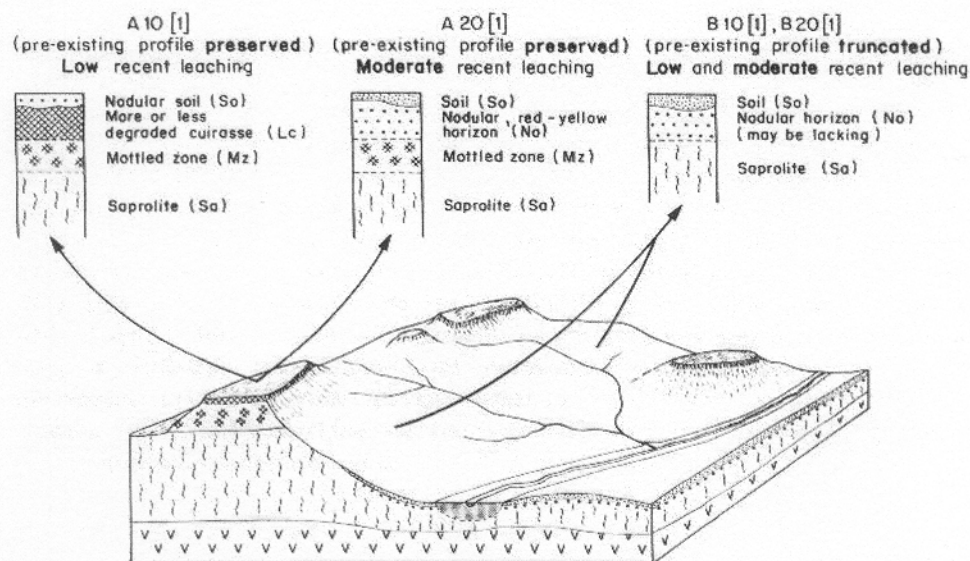


Figura 3.19 – Diagrama apresentando a paisagem geral e os perfis de intemperismo relacionados a modelos de alteração recente de graus baixo a moderado. Lecomte & Zeegers (1992).

O perfil de *stone lines* laterítico A 30{1} de Lecomte e Zeegers (1992) é dividido em três horizontes principais H1, H2 e H3. O horizonte H1 corresponde a argilas arenosas friáveis homogêneas, amareladas e livres de fragmentos grosseiros. O horizonte H2 corresponde ao denominado *stone line*, subdividido em três tipos, de acordo com a natureza do material grosseiro: 2a (pisolitos e nódulos ferruginosos esféricos); 2b (blocos lateríticos de vários tamanhos) e 2c (litorelictos mais ou menos ferruginizados). O horizonte H3 relaciona-se ao saprolito (Fig. 3.20). Comparando-se aos perfis propostos neste trabalho, pode-se perfeitamente relacionar o horizonte de latossolo ao H1. O horizonte de crosta dismantelada corresponderia bem aos horizontes H2a e H2b, divididos nos níveis de concreções e de fragmentos. Pode incorporar, ainda, constituintes do H2c, já que é comum, na crosta dismantelada, a presença de litorelictos. Lecomte e Zeegers (1992) comentam que a transição entre o horizonte de *stone line* e saprolito é progressiva, com o decréscimo da proporção de nódulos e litorelictos, devendo corresponder, então, ao horizonte zona de transição das áreas aqui trabalhadas.

Com base nos dados mineralógicos obtidos na área Guarujá (Figs. 3.16, 3.17 e 3.18), observa-se que, apesar da paragênese mineral simples, as variações quanto ao grau de cristalinidade dos mesmos reflete as mudanças/transformações que esses perfis vem sofrendo. Um bom exemplo é a caulinita, dominantes na base dos perfis (horizontes de transição/saprolito), caracterizada nos difratogramas de raios-X por picos/reflexos fechados

e bem delineados. Já a caulinita dos latossolos apresentam picos abertos e mal definidos, refletindo o baixo grau de cristalinidade ou aumento da desordem estrutural, muitas vezes relacionados a presença de ferro em sua estrutura, que pode alcançar até um valor de 3 % (Tardy & Nahon, 1985). A relação entre a atividade biológica de florestas tropicais e a composição mineralógica dos solos é estudada por Lucas et al. (1993), que descrevem um domínio de caulinita sobre gibbsita nos horizontes superiores do solo, como é verificado, também, nos perfis mineralógicos aqui estudados. Esses autores relatam que medidas quantitativas do movimento dos elementos químicos no *litterfall* em um ecossistema da Amazônia, leva a uma circulação de uma apreciável quantidade de elementos, principalmente sílica. Como resultado, segundo esses autores, os fluidos que percolam os horizontes superiores do solo contém sílica dissolvida, permitindo a estabilidade da caulinita nessa porção do perfil de intemperismo.

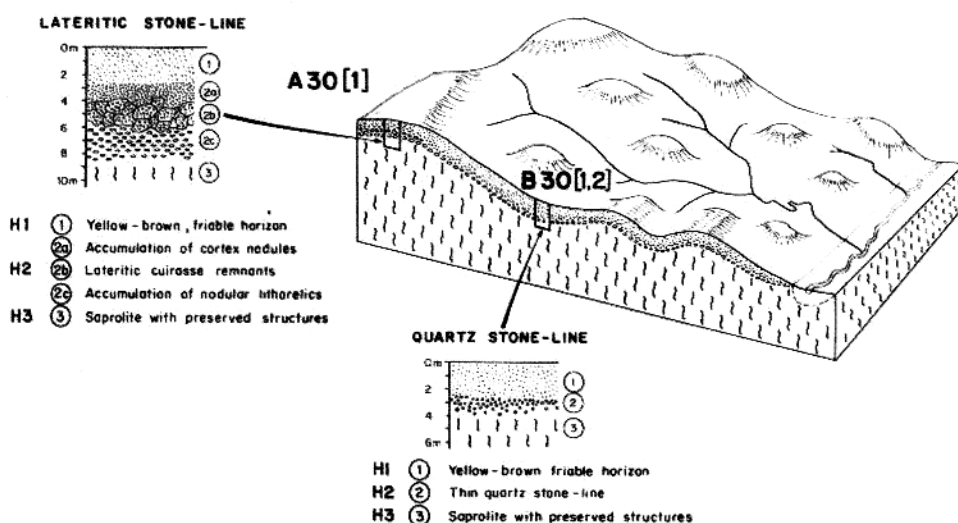


Figura 3.20 – Diagrama apresentando a paisagem geral e perfis de intemperismo relacionados a modelos submetidos a alteração recente de grau forte. Lecomte e Zeegers (1992).

Freyssinet (1998) relata que a maioria dos perfis de intemperismo em zonas tropicais, são resultantes do desenvolvimento e transformações de antigos perfis. Dois tipos de perfis de intemperismo, não perturbados por processos de erosão, são classificados por este autor : a) perfis de *duricrust*, principalmente desenvolvido em zonas de savanas e b) perfis de latossolo, em clima tropical úmido, desenvolvidos a partir de perfis lateríticos antigos. Descreve, ainda, que nas zonas úmidas da Amazônia e África, os perfis de

intemperismo são, geralmente, remanescentes de perfis de *duricrust* lateríticos ferruginosos, que se alteram para solos argilosos vermelhos ou amarelos, podendo conter nódulos ferruginosos e são denominados de *gravelly* latossolos (Fig. 3.21). O dismantelamento do *duricrust*, segundo este autor, começa com o desenvolvimento de blocos métricos, sendo progressivamente reduzidos a fragmentos centimétricos a milimétricos. Relata, ainda, que o perfil de *gravelly* latossolo é composto da base para o topo pelo saprolito, por um horizonte intermediário e por um horizonte nodular. O horizonte intermediário é descrito como de aspecto homogêneo, com 0,5 a 10 m de espessura e composto por material argiloso vermelho ou amarelado, enquanto que o horizonte nodular é caracterizado por material argiloso, contendo nódulos ferruginosos, consistindo de hematita com texturas similares as do *duricrust* ferruginoso. Fazendo-se uma correlação com os perfis das áreas, aqui, trabalhadas, pode-se afirmar que o horizonte de zona de transição corresponde ao horizonte intermediário de Freyssinet (1998), enquanto que o horizonte nodular, desse autor, abrange os horizontes de crosta dismantelada e latossolo definidas nas áreas trabalhadas.

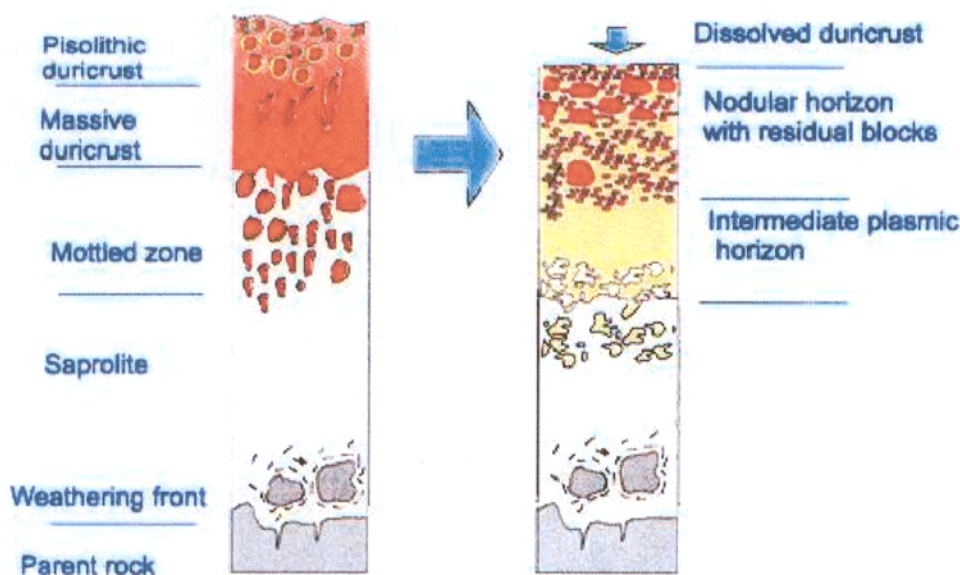


Figura 3.21 - Perfil esquemático de *duricrust* em zona de savana e sua transformação para *gravelly latosols* em clima tropical úmido. (modificado de Freyssinet, 1998).

3.5.2 – Geomorfologia

A forma e as características dos platôs das áreas Jaca e Guarujá assemelham-se a muitos outros encontrados na Serra dos Carajás, especialmente aqueles desenvolvidos sobre os metassedimentos de Formação Águas Claras. O topo do platô do Jaca mostra-se, em linhas gerais, mais homogêneo e menos recortado do que o do Guarujá. Esses platôs, portanto, devem representar registros da superfície Sul-Americana, modificada por eventos erosivos e intempéricos posteriores a sua formação. Por outro lado, a área Paulo Afonso é caracterizada por terrenos arrasados a ondulados, com serras e platôs que ocorrem como ressaltos dentro dessa superfície. O platô do Paulo Afonso Norte, portanto, seria remanescente da superfície Sul-Americana dentro dos terrenos de baixo relevo da superfície Velhas. Estas interpretações coincidem com as apresentadas por Santo (1999) e Lopes (1999).

Lucas e Chauvel (1992) definem que a transformação *in situ* da crosta endurecida antiga (*duricrust*), começa, geralmente, na parte central dos platôs, explicando porque os *gravelly latosols* são muito mais desenvolvidos no centro dos platôs, enquanto que a crosta endurecida preservada aflora, preferencialmente, nas suas bordas. Nas áreas aqui trabalhadas, especialmente no Guarujá e Jaca, os dados indicam que o melhor desenvolvimento dos horizontes de latossolo no centro e de crosta dismantelada nas bordas dos platôs, está relacionado principalmente a fatores erosionais. Existe, naturalmente, uma maior proteção da erosão, na zona de platô, na medida que se afasta das suas margens. O processo erosivo atuante nas cabeceiras de igarapés explica, também, a denudação do latossolo e a exposição de horizontes regolíticos subjacentes. A menor quantidade de latossolo e, conseqüentemente, maior presença de crosta dismantelada em porções dos platôs (como no Guarujá I e leste do Jaca) pode ser justificada, em parte, pela maior densidade, nestas porções, de nascentes de drenagens.

Anand & Smith (1997) relatam que o relacionamento entre a estratigrafia dos regolitos e modelos de regolitos e formas de relevo permitem melhor selecionar e definir uma amostragem e as feições de dispersão geoquímica. Afirmam, ainda, que é fundamental, em um mapeamento de regolitos e em um trabalho de exploração em terrenos lateríticos, definir se o resíduo laterítico está presente ou foi removido por erosão. Por essas razões, os autores acham que é útil considerar as relações dos regolitos com o relevo, em termos de

regimes de regolitos e formas de relevo. Em termos gerais, eles descrevem, para a região do W-Austrália, 3 regimes maiores: residual, erosional e deposicional (Fig.3. 22).

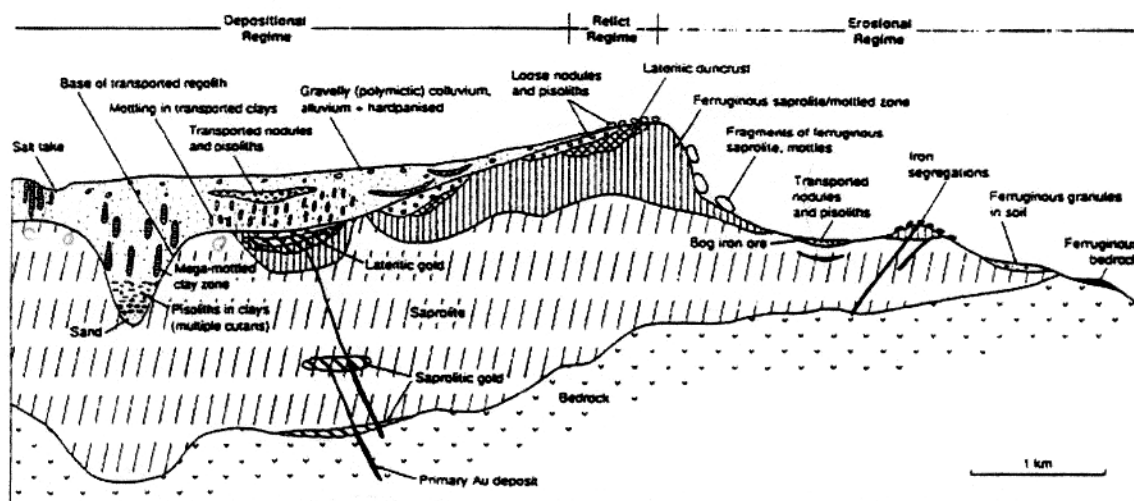


Figura 3.22 – Diagrama mostrando relações entre forma de relevo e regolito no Cráton de Yilgarn, Western Australia. (Anand & Smith 1997)

Butt & Zeegers (1992) reportam que os materiais que formam a camada de superfície são comumente críticos na determinação do meio de amostragem apropriado para um programa de exploração. Segundo esses autores, o material superficial pode estar ausente, permitindo que aflore o *bedrock* fresco ou a carapaça laterítica não transformada; pode estar residual (p.ex., solo residual); transportado (aluvião, talus) ou uma mistura semi-residual (p.ex., colúvio). Lecomte & Zeegers (1992) descrevem, em ambientes de *rainforest*, que material transportado ocorre, de forma representativa, nos vales onde o relevo é suave a moderado.

Procurou-se, então, neste trabalho efetuar uma classificação de regime geomorfológicos, adaptado as condições amazônicas, aproveitando-se exemplos de outras regiões como os dos trabalhos descritos anteriormente, que evidenciasse as relações das formas de relevo e regolitos e, conseqüentemente, auxiliasse no mapeamento e na exploração geoquímica. A classificação de regimes geomorfológicos é, como visto, interessante para um programa de exploração geoquímica, já que eles auxiliam na definição do material regolítico aflorante, quanto aos aspectos de ser residual, transportado ou uma mistura semi-residual. Os horizontes de latossolo e crosta dismantelada situam-se, essencialmente, dentro do regime de topo de platô, tendo um caráter residual a semi-

residual. O horizonte de zona de transição, ao contrário, abrange diversos regimes geomorfológicos e, conseqüentemente, com variadas características do material aflorante. Quando situado dentro dos regimes de encosta suave, o material superficial tem caráter semi-residual com relativamente pouco transporte. Quando posicionado dentro do regime de encosta forte ou abrupta, a material aflorante corresponde a uma mistura semi-residual com transporte mais acentuado. No regime de baixo relevo, o material aflorante, normalmente, é do tipo residual a semi-residual, mas podendo apresentar locais com coberturas de constituintes deposicionais. Material predominantemente transportado ocorre no regime de planície de inundação, ocorrendo ao longo de drenagens, sendo mais expressivo em vales abertos.

3.5.3 – Latossolos

O horizonte de cobertura de latossolo é assunto, ainda, muito controvertido, tanto no que se refere a sua origem, como no seu caráter residual ou transportado. Existe, na literatura, duas hipóteses principais e contrastantes sobre a origem dessa cobertura; a) os lateritos, desenvolvidos em uma superfície mais antiga, foram cobertos por esse material argiloso (origem alóctone) e b) a cobertura argilosa foi formada *in-situ* como o horizonte superior do perfil laterítico (origem autóctone).

Sombroek (1966) interpretou esse horizonte como um depósito lacustriano originado dos Andes, denominando-o como Argila Belterra. Diversos autores, posteriormente, postularam a hipótese autóctone, afirmando que a cobertura de argila seria o horizonte superior do perfil de intemperismo, tendo sido formado concomitante a laterita/bauxita subjacente ou originado posteriormente a evolução do perfil laterítico/bauxita (Dennen & Norton, 1977; Aleva, 1981; Kobilsek & Lucas, 1988; Lucas et al., 1989). Dentro da conceituação de hipótese alóctone, Grubb (1979) identificou características de colúvio dentro da cobertura argilosa e Truckenbrodt & Kotschoubey (1981) admitiram a idéia de origem sedimentar para Argila Belterra, baseados em propriedades texturais dessa argila e dos lateritos subjacentes. Esses autores sugerem a redistribuição do material de argila da zona de laterita por *mud flow* ou *sheet flood* em um clima semi-árido. Os latossolos próximos a Manaus foram descritos por Chauvel et al.

(1983) como correspondentes a Argila Belterra e afirmaram serem produtos de transformação da camada nodular subjacente.

Truckenbrodt et al. (1991) estudando a composição e origem das coberturas argilosas, admitiram que as análises detalhadas não permitiram conclusões definitivas sobre a origem da Argila Belterra. Três hipóteses foram discutidas: a) formação *in-situ* por processos intempéricos; b) deposição por transporte lateral, oriundo de elevações pré-existentes e c) transporte vertical para a superfície através de termitas. Esta última hipótese, devido as grandes espessuras observadas, não poderia, segundo os autores, ser a causa única de explicação desse processo.

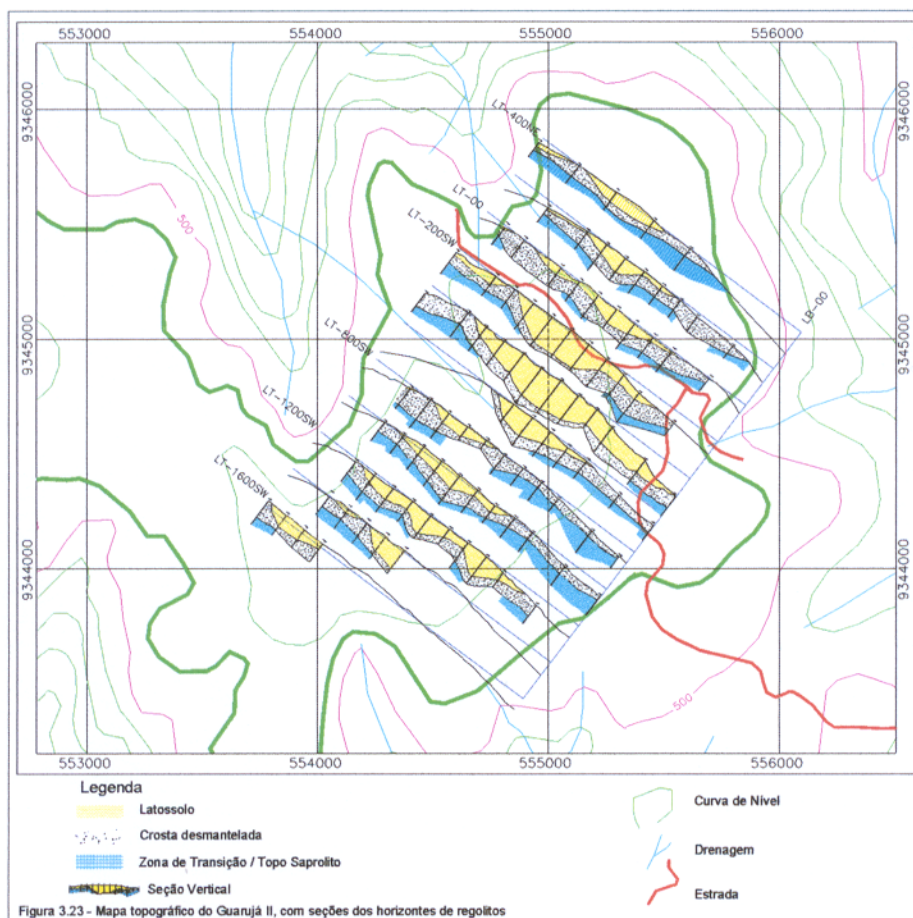
Lecomte (1988) descreve um perfil laterítico padrão em terrenos tropicais úmidos e conclui que este perfil é originado da transformação *in situ* de uma antiga superfície laterítica. Lucas e Chauvel (1992) explicam que na Amazônia, os *gravelly latosols* resultam do desmantelamento da *duricrust* em terrenos tropicais úmidos, que se inicia com o desenvolvimento de blocos de tamanho médio, que são progressivamente reduzidos a tamanhos centimétricos a milimétricos. Lecomte & Zeegers (1992) traçam as características de diversos perfis lateríticos desenvolvidos em terrenos tropicais úmidos. Esses perfis seriam formados por uma combinação de processos químicos, físicos e biológicos e embora o mecanismo preciso seja incerto, existe uma concordância mais ampla para um caráter residual desses perfis. Freyssinet (1998) relata que em sistema de *rain forest*, o antigo relevo foi fortemente modificado pela precipitação pluviométrica e cobertura da vegetação e, como consequência, a maior parte da crosta endurecida anterior foi dissolvida e transformada em restos endurecidos envolvidos numa matriz argilosa (*gravelly latosols*).

Horbe (1995) trabalhando na área do Igarapé Bahia e outros perfis lateríticos na Amazônia, conclui que os latossolos se desenvolveram a partir do intemperismo químico de crostas lateríticas subjacentes. Angélica (1996) afirma que os latossolos, que recobrem os perfis lateríticos-gossânicos do platô do Igarapé Bahia, são interpretados como paleossolos formados por intemperismo químico em climas úmidos. Horbe & Costa (1996) estudaram a evolução mineralógica e geoquímica dos solos sobre lateritos e gossans. Correlacionaram a formação dos solos com os processos de saprolitização e argilização que ocorrem durante o intemperismo/lateritização em condições de clima úmido. Salientam, também, que este

processo leva a atenuação das características geoquímicas das crostas e rochas-mães subjacentes.

Alguns comentários, a seguir, feitos a partir de observações e dados obtidos no desenvolvimento desse trabalho, podem vir a ajudar na discussão sobre a origem da cobertura argilosa e de seu caráter residual ou transportado, mesmo que não permita uma conclusão definitiva sobre essas questões.

- a) Nas áreas trabalhadas, a passagem entre o latossolo e a crosta desmantelada é, quase sempre, abrupta, apresentando, assim, um contato bem marcado. Essa observação é, segundo Trunckenbrodt et al. (1991), argumento para uma hipótese alóctone, já que perfis de intemperismo autóctone apresentariam, geralmente, transições contínuas dos horizontes de intemperismo.
- b) O contato abrupto entre os horizontes de latossolo e crosta desmantelada é nitidamente irregular e sem conformidade com a superfície atual, como já relatado por Angélica (1996). Os trabalhos de sondagem rasa no platô do Guarujá II, mostraram que o topo do horizonte de crosta desmantelada mostra-se irregular com suaves e constantes ondulações. A cobertura de latossolo, por sua vez, amolda-se a estas ondulações, tornando-se mais espessa onde o topo da crosta encontra-se mais aprofundada. Esse comportamento, comum em todas as seções, faz com que o horizonte de latossolo tenha uma forma de pequena e suave calha, com a parte mais profunda e espessa na zona central do platô (Fig.3.23). Caso este estilo de relevo do topo da crosta seja um reflexo da conformação da antiga superfície de erosão Sul-Americana, haveria, então, diferenças de cotas topográficas que permitiriam a deposição, nos relevos mais rebaixados, de material erodido proveniente de locais mais elevados. A heterogeneidade do relevo dos platôs sobre as crostas ricas em ferro, como N1 e N5, favorecem a hipótese de que a antiga superfície de erosão tinha caráter ondulatório. No platô do Guarujá II, as discretas diferenças de nível que marcam o topo da crosta desmantelada, implicaria na hipótese de que o possível transporte e deposição de material erodido percorreria pequenas distâncias.
- c) O comportamento geoquímico dos elementos ao longo do perfil de intemperismo (detalhado no capítulo 4) mostra que, mesmo havendo o empobrecimento da maioria dos elementos no latossolo, este horizonte guarda características geoquímicas dos



horizontes subjacentes (crosta desmantelada e até do saprolito). Existe, então, uma litodependência entre o latossolo e os horizontes inferiores e isto é um forte argumento do caráter residual da cobertura argilosa. Horbe & Costa (1996) afirmam que sobre as crostas se desenvolveu um novo perfil que, quando completo, grada desde uma crosta sã, passando para uma crosta intemperizada e solo. Segundo esses autores, nota-se, da base para o topo, em um perfil completo, um processo crescente de fissuramento e fraturamento da crosta que leva ao aumento na sua porosidade, proporcionando maior percolação de soluções que intensificam sua degradação. O processo evolui formando

nódulos com córtex que são gradativamente cominuídos até seu total desaparecimento. Ao longo das fraturas e fissuras, ocorreria a neoformação de um material argiloso a areno-argiloso que tenderia a predominar em relação aos relictos até formar o solo do topo do perfil, em um típico processo residual.

- d) Thomas (1994) discute os processos de geração de horizontes superficiais pela ação de termitas. Os termitas transportam material fino das partes mais profundas do perfil para a superfície, para construir pequenos montes que, quando abandonados, tornam-se sujeitos a rápida erosão e os materiais trazidos para cima são espalhados sobre a superfície de solo adjacente. A atuação deste processo, nos dias atuais, é facilmente perceptível nas regiões de Carajás, especialmente nas áreas desmatadas. A interpretação da origem do latossolo por ação de termitas explicaria o relacionamento geoquímico entre a cobertura argilosa e os horizontes subjacentes. Esse processo é independente de condições geomorfológicas que são requeridas para uma interpretação sedimentar. Truckenbrodt et al. (1991) sugerem, entretanto, que espessuras consideráveis da cobertura de argila, com mais de 20 m, dificilmente poderia ser explicada somente pela atuação de termitas, mas sim numa combinação com movimento de massa lateral.
- e) A ausência de acamamento ou outros tipos de estruturas sedimentares poderia ser um argumento contra a deposição sedimentar, mas segundo Truckenbrodt et al. (1991) processos de solifluxão, *mudflows*, etc. geralmente não causam estratificação, além de processos de intemperismo subsequentes que poderiam ter obliterado estruturas prévias.
- f) As discussões apresentadas nos itens acima, levam a uma idéia para a formação do latossolo, envolvendo uma combinação de processos químicos, físicos e biológicos. A importância e a quantificação da atuação de cada processo carece, evidentemente, de trabalhos de pesquisa mais aprofundados. No momento, a classificação de material semi-residual para o horizonte de latossolo é o mais apropriado.

4 – GEOQUÍMICA

4.1 – INTRODUÇÃO

Estudos geoquímicos foram desenvolvidos nas áreas Guarujá, Jaca e Paulo Afonso. Malhas topográficas, nessas três áreas, foram executadas com picadas espaçadas, em geral, em 200 m. onde foram coletadas, a cada 40 m, amostras do material regolítico aflorante. Concomitante a esta amostragem, efetuou-se o mapeamento dos horizontes com o estabelecimento dos regimes regolíticos (figuras 3.9, 3.12 e 3.13).

A metodologia adotada, para esta amostragem de superfície, envolveu os seguintes procedimentos principais: a) A cada 40 m era coletada uma amostra de cerca de 2 kg do material regolítico aflorante; b) As amostras eram coletadas numa profundidade entre 20 a 50 cm sendo desprezado o capeamento mais rico em matéria orgânica; c) Nos domínios dos horizontes de latossolo e crosta desmantelada, que ocorrem quase que exclusivamente no regime de platô, procurou-se obter, quando possível, duas amostras, sendo uma do latossolo e outra da zona de concreções (pisolitos e nódulos), representando a crosta desmantelada; d) A amostragem da zona de concreções tornava-se possível quando o horizonte de crosta desmantelada encontrava-se aflorante ou encoberto por uma camada de latossolo de no máximo de 1.00 m.

Em resumo, em todos os locais determinados coletou-se uma amostra do horizonte regolítico aflorante e nos regimes de platô procurou-se coletar duas amostras, representando os horizontes de latossolo e crosta desmantelada. A tabela 4.1 mostra o quantitativo de amostras coletadas, em cada área, nos horizontes regolíticos.

Tabela 4.1 – Quantitativo das amostras coletadas

Horizonte / Área	Guarujá	Jaca	Paulo Afonso
Latossolo	503	483	137
Crosta desmantelada	242	306	102
Zona de transição	2090	852	724
Total	2837	1641	963

Todas as amostras foram preparadas no laboratório físico da DOCEGEO, em Carajás e analisadas quimicamente no laboratório da CVRD em Santa Luzia (MG). As amostras dos horizontes de latossolo e zona de transição foram peneiradas a 120 mesh, enquanto que as da crosta desmantelada foram trituradas a 150 mesh. Foi feita análise multielementar, com abertura parcial, para todas as amostras, abrangendo 18 elementos (Al, As, Au, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mg, Mn, Ni, Pb, Sb, Ti, V e Zn). O método de análise para multielementos consiste, inicialmente, na calcinação das amostras a 650°C por aproximadamente duas horas e, depois, lixiviação a quente, com água régia, sob refluxo, durante 1 hora. Terminada a abertura da amostra, completa-se o volume com água destilada e deixa-se decantar por 16 horas. Após a decantação, uma alíquota é retirada e preparada para leitura por espectrometria de emissão em plasma (ICP/OES). Os valores de ferro e alumínio foram calculados em percentagem, o do ouro em ppb e os demais elementos em ppm.

Foram feitos, para cada meio amostral, estudos estatísticos envolvendo análise descritiva básica (mínimo, máximo, média e desvio padrão), estudo de correlação entre elementos e análise fatorial. Devido a quantidade relativamente expressiva das amostras coletadas para cada horizonte regolítico, acredita-se que este estudo possa representar, mesmo com algumas limitações, o comportamento geoquímico desses elementos ao longo do perfil laterítico, bem como das suas distribuições / dispersões em superfície. Análises estatísticas foram desenvolvidas para cada área de estudo e, posteriormente, procurou-se estudar as correlações existentes entre elas. As tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam os sumários estatísticos dos dados analíticos obtidos para cada área.

Trabalhos geoquímicos mais detalhados foram desenvolvidos no platô NW da área Guarujá (Guarujá II). Neste local foram executadas algumas seções de sondagem rasa através de furos de trado mecânico, que tiveram profundidade média de 11 m, com máximo de 18 m. Nesses furos foram individualizados, amostrados e analisados, separadamente, os horizontes de latossolo, crosta desmantelada e zona de transição, cujos resultados serão discutidos no item 4.3. O processo de preparação física e análise química foi semelhante ao adotado, nas amostras de superfície, para a crosta desmantelada.

4.2 – ANÁLISE DA DISPERSÃO GEOQUÍMICA NO PERFIL DE INTEMPERISMO (AMOSTRAS DE SUPERFÍCIE).

A média para cada elemento das amostras de superfície, nos três horizontes regolíticos e nas três áreas de estudo, foi calculada e foram confeccionados perfis, nos quais se pode visualizar e estudar o comportamento desses elementos ao longo do perfil de intemperismo. Procedeu-se uma análise individual de cada área e, posteriormente, um estudo comparativo entre essas áreas, objetivando definir tendências gerais de comportamento dos elementos ao longo do perfil laterítico em Carajás.

4.2.1 – Guarujá

A figura 4.1.a apresenta os valores médios para Al e La nos três horizontes regolíticos estudados : zona de transição (ZT), crosta desmantelada / zona de concreções (CD) e latossolo (LS). Para o Al existe um claro enriquecimento no LS (5.91 %) em relação aos outros dois horizontes. O valor na ZT (2.93 %) é um pouco mais alto do que na CD (2.47 %). Para o La, o valor mais elevado se encontra na ZT (5 ppm), caindo para a CD e LS que têm média em torno de 2 ppm. Esses dois elementos apresentam, portanto, comportamentos bem distintos, enquanto o Al é enriquecido no topo do perfil, o La mostra valores mais elevados na base.

A figura 4.1.b mostra os resultados médios para As, Co e Ni. O As mostra valor mais elevado na CD (8 ppm) e valores de 4 ppm para a ZT e LS. O Co apresenta valores de 8 ppm para a ZT, 9 ppm para a CD e 4 ppm para o LS e o Ni mostra valores de 7 ppm para a ZT, 3 ppm para a CD e 4 ppm para o LS. Os comportamentos de As e Co guardam semelhanças no que se refere a valores mais elevados na CD, sendo que para As o contraste, em relação aos outros dois horizontes, é mais nítido. O Ni, ao contrário, têm valores mais altos na base do perfil.

Tabela 4.2 – Sumário estatístico área Guarujá.

Elemento	Horizonte	N	Med	Min	Max	Desvio Padrão
Al (%)	Latossolo	503	5.91	1.54	13.35	1.5
	Crosta desm.	242	2.47	1.33	6.41	0.8
	Transição	1996	2.93	0.03	9.75	1.5
As (ppm)	Latossolo	28	4	1	42	8.67
	Crosta desm.	100	7	1	59	8.99
	Transição	255	4	1	55	6.17
Au (ppb)	Latossolo	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	Crosta desm.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	Transição	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ba (ppm)	Latossolo	503	6	2	20	2.79
	Crosta desm.	242	8	5	15	1.6
	Transição	1996	22	0.31	405	34.25
Ca (ppm)	Latossolo	448	99	3	943	110.95
	Crosta desm.	182	111	4	972	113.05
	Transição	1520	325	3	5153	572.69
Co (ppm)	Latossolo	503	4	2	11	1.21
	Crosta desm.	242	9	5	13	1.4
	Transição	2084	8	1	133	13.43
Cr (ppm)	Latossolo	503	135	31	516	45.2
	Crosta desm.	242	729	253	2642	360.5
	Transição	2090	78	0.4	484	45.2
Cu (ppm)	Latossolo	503	33	4	280	40.5
	Crosta desm.	242	45	8	477	46.5
	Transição	2090	94	2	653	85.3
Fe (%)	Latossolo	503	10	1	18	2.4
	Crosta desm.	242	31	14	63	8
	Transição	2067	7	1	20	3
La (ppm)	Latossolo	454	2	0	7	1.2
	Crosta desm.	230	2	0.3	6	1.1
	Transição	1801	5	0.2	69	5.7
Mg (ppm)	Latossolo	492	89	3	643	77.7
	Crosta desm.	162	55	4	849	91
	Transição	1992	195	3	15472	577.5
Mn (ppm)	Latossolo	499	63	0	331	38.9
	Crosta desm.	240	103	5	1289	173.4
	Transição	1944	584	1	9033	1341.8
Ni (ppm)	Latossolo	400	4	0	14	1.8
	Crosta desm.	149	3	0.2	24	2.8
	Transição	1688	7	0.2	66	7
Pb (ppm)	Latossolo	503	54	18	100	13.5
	Crosta desm.	242	58	40	92	6.5
	Transição	2089	38	6	96	14.3
Sb (ppm)	Latossolo	503	30	11	59	8.3
	Crosta desm.	242	113	55	166	18.8
	Transição	1993	25	3	73	11.4
Ti (ppm)	Latossolo	503	323	22	1008	203.3
	Crosta desm.	242	1134	245	2640	507.4
	Transição	1996	191	3	1894	260.9
V (ppm)	Latossolo	503	208	49	521	88.2
	Crosta desm.	242	779	180	1295	261.6
	Transição	1996	136	1	642	106.6
Zn (ppm)	Latossolo	503	20	6	107	10.9
	Crosta desm.	242	32	17	58	5.8
	Transição	2082	18	3	170	11.9

(n.a.) = não analisado

Tabela 4.3 – Sumário estatístico área Jaca

Elemento	Horizonte	N	Med	Min	Max	Desvio Padrão
Al (%)	Latossolo	483	2.93	0.08	6.79	1.27
	Crosta desm.	306	1.82	0.57	4.35	0.60
	Transição	852	1.18	0.04	6.11	0.76
As (ppm)	Latossolo	349	11	1	82	12.3
	Crosta desm.	267	39	1	387	46.5
	Transição	490	9	1	136	14.1
Au (ppb)	Latossolo	354	11	1	85	10.7
	Crosta desm.	248	16	5	365	23.2
	Transição	568	15	1	184	13.3
Ba (ppm)	Latossolo	483	7	3	17	2.4
	Crosta desm.	306	9	2	19	2
	Transição	852	23	3	900	51.8
Ca (ppm)	Latossolo	209	52	3	609	63.1
	Crosta desm.	275	57	3	399	39.9
	Transição	525	182	3	5556	446.8
Co (ppm)	Latossolo	479	3	1	8	1.3
	Crosta desm.	306	10	2	19	2.7
	Transição	797	5	1	79	8
Cr (ppm)	Latossolo	483	73	14	183	27.5
	Crosta desm.	306	369	91	896	126.3
	Transição	852	51	2	239	31.7
Cu (ppm)	Latossolo	483	23	2	157	22
	Crosta desm.	306	36	4	276	33.8
	Transição	852	46	2	1230	64.2
Fe(%)	Latossolo	483	6	1	16	2.5
	Crosta desm.	306	27	6	46	7.3
	Transição	852	5	1	23	2.9
La (ppm)	Latossolo	99	2	1	6	1
	Crosta desm.	102	1	1	4	0.6
	Transição	570	5	1	82	6.8
Mg (ppm)	Latossolo	131	32	3	107	25.9
	Crosta desm.	221	37	4	87	13.9
	Transição	466	85	3	1830	167.1
Mn (ppm)	Latossolo	311	38	2	162	26.8
	Crosta desm.	301	84	7	324	62.3
	Transição	640	412	1	6295	880.3
Ni (ppm)	Latossolo	447	3	1	25	2.3
	Crosta desm.	298	6	2	20	3
	Transição	722	6	1	77	6.5
Pb (ppm)	Latossolo	141	34	30	47	3.6
	Crosta desm.	293	47	30	65	7.2
	Transição	79	35	30	55	4.5
Sb (ppm)	Latossolo	483	13	2	27	5.4
	Crosta desm.	306	50	15	94	13
	Transição	836	11	1	45	6.8
Ti (ppm)	Latossolo	483	90	9	367	58.9
	Crosta desm.	306	800	67	1991	334.2
	Transição	852	102	5	1855	183.5
V (ppm)	Latossolo	483	113	22	258	49
	Crosta desm.	306	539	25	1481	205.2
	Transição	852	83	1	464	68
Zn (ppm)	Latossolo	19	36	30	67	14
	Crosta desm.	262	49	30	95	12.9
	Transição	85	49	30	210	28.1

Tabela 4.4 – Sumário estatístico área Paulo Afonso.

Elemento	Horizonte	N	Med	Min	Max	Desvio Padrão
Al (%)	Latossolo	137	4.47	2.28	8.15	1.2
	Crosta desm.	102	2.75	1.22	4.36	0.7
	Transição	724	2.06	0.17	5.73	0.9
As (ppm)	Latossolo	0	-	-	-	-
	Crosta desm.	2	2	1	3	1.4
	Transição	2	2	2	2	0
Au (ppb)	Latossolo	93	12	4	74	10
	Crosta desm.	78	16	5	36	6.7
	Transição	620	18	3	138	16.8
Ba (ppm)	Latossolo	137	7	3	16	2.2
	Crosta desm.	102	12	6	49	6
	Transição	724	11	2	110	9
Ca (ppm)	Latossolo	127	126	6	725	209.2
	Crosta desm.	102	99	34	793	98.5
	Transição	703	179	4	7829	418
Co (ppm)	Latossolo	137	8	3	16	3.1
	Crosta desm.	102	12	7	24	4.1
	Transição	722	8	1	42	4.4
Cr (ppm)	Latossolo	137	107	37	376	50
	Crosta desm.	102	582	209	1612	308.5
	Transição	724	110	3	1267	134.6
Cu (ppm)	Latossolo	137	51	8	235	38.6
	Crosta desm.	102	43	10	236	38.9
	Transição	724	106	7	488	60.6
Fe (%)	Latossolo	137	12	1	22	3.6
	Crosta desm.	102	26	1	42	7.4
	Transição	724	11	1	26	4.9
La (ppm)	Latossolo	77	2	1	7	1.5
	Crosta desm.	63	1	1	2	0.4
	Transição	541	2	1	20	2.1
Mg (ppm)	Latossolo	137	78	13	203	35.1
	Crosta desm.	102	53	18	199	23.8
	Transição	724	94	3	2394	115.2
Mn (ppm)	Latossolo	137	214	42	749	128.2
	Crosta desm.	102	283	67	1121	196.4
	Transição	724	421	19	3914	537
Ni (ppm)	Latossolo	137	15	3	47	9.2
	Crosta desm.	102	12	4	73	7.9
	Transição	719	17	1	147	16.8
Pb (ppm)	Latossolo	114	40	30	58	6.2
	Crosta desm.	101	55	31	77	10.1
	Transição	457	39	30	57	5.8
Sb (ppm)	Latossolo	137	20	10	42	6.4
	Crosta desm.	102	38	23	60	7.4
	Transição	722	18	1	55	8.1
Ti (ppm)	Latossolo	137	524	206	949	148.4
	Crosta desm.	102	1136	556	1802	321.4
	Transição	724	366	16	1003	198.3
V (ppm)	Latossolo	137	212	79	404	61.2
	Crosta desm.	102	484	204	790	138.4
	Transição	724	192	6	711	119.4
Zn (ppm)	Latossolo	60	44	30	64	10.4
	Crosta desm.	103	63	33	175	23.8
	Transição	372	44	30	84	10.2

(-) abaixo do Limite de detecção

A figura 4.1.c apresenta os dados de valores médios para Ba, Fe e Pb. O Ba mostra uma queda dos valores da base para o topo do perfil, tendo 22 ppm na ZT, 8 ppm na CD e 6 ppm no LS. O Fe apresenta um nítido enriquecimento na CD (31 %) em relação a ZT (7 %) e o LS (10 %). O Pb também mostra valor mais elevado na CD (58 ppm) em relação a ZT (38 ppm) e o LS (54 ppm). O Fe e Pb têm, portanto, comportamentos relativamente semelhantes, com enriquecimento na CD e com o LS mostrando valores mais elevados do que a ZT. Esta segunda característica é mais forte para o Pb. O Ba mostra valor mais elevado na base do perfil, com queda forte em direção aos horizontes superiores.

A figura 4.1.d apresenta os resultados médios para Ca, Mg e Mn. O valor médio de Ca na ZT é de 325 ppm, caindo para 111 ppm na CD e para 99 ppm no LS. Os valores médios de Mn mostram uma queda forte e constante da base para o topo do perfil, passando de 584 na ZT para 103 na CD e 63 no LS. O comportamento do Mg evidencia uma queda no valor médio na CD (55 ppm) em relação ao LS (89 ppm) e, principalmente, em relação a ZT (195 ppm). Os três elementos mostram, portanto, um comportamento relativamente similar, com valores nitidamente mais altos na zona de transição. O Ca e, principalmente, o Mn apresentam um caimento constante da base para o topo do perfil, enquanto que para o Mg os valores no LS são mais altos do que na CD.

A figura 4.1.e mostra os valores médios de Cr, Ti e V. Esses três elementos mostram um comportamento muito similar ao longo do perfil, com nítido enriquecimento dos valores na CD em relação a ZT e LS. O Cr tem valor de 729 ppm na CD e de 78 e 135 ppm na ZT e LS respectivamente. O Ti mostra valores de 191 na ZT e 323 ppm no LS, bem inferiores a 1134 ppm na CD. O V apresenta valor de 136 ppm na ZT, crescendo para 779 ppm na CD e caindo para 208 ppm na LS. Salienta-se ainda que esses três elementos mostram valores médios no LS sempre discretamente superiores a ZT.

A figura 4.1.f apresenta os resultados médios para Cu, Sb e Zn. Os valores de Cu decrescem da ZT (94 ppm) em direção a CD (45 ppm) e LS (33 ppm). O Sb mostra um nítido enriquecimento na CD (113 ppm) em relação a ZT (25 ppm) e LS (30 ppm). O zinco mostra um valor discretamente mais elevado na CD (32 ppm) em relação a ZT (18 ppm) e LS (20 ppm). O Zn e Sb apresentam, portanto, comportamentos relativamente similares, com um aumento na CD, sendo mais forte e nítido no Sb. Esses dois elementos também

mostram valores do LS discretamente mais elevados do que na ZT. O Cu, por outro lado, tem um comportamento distinto com uma queda contínua da base para o topo do perfil.

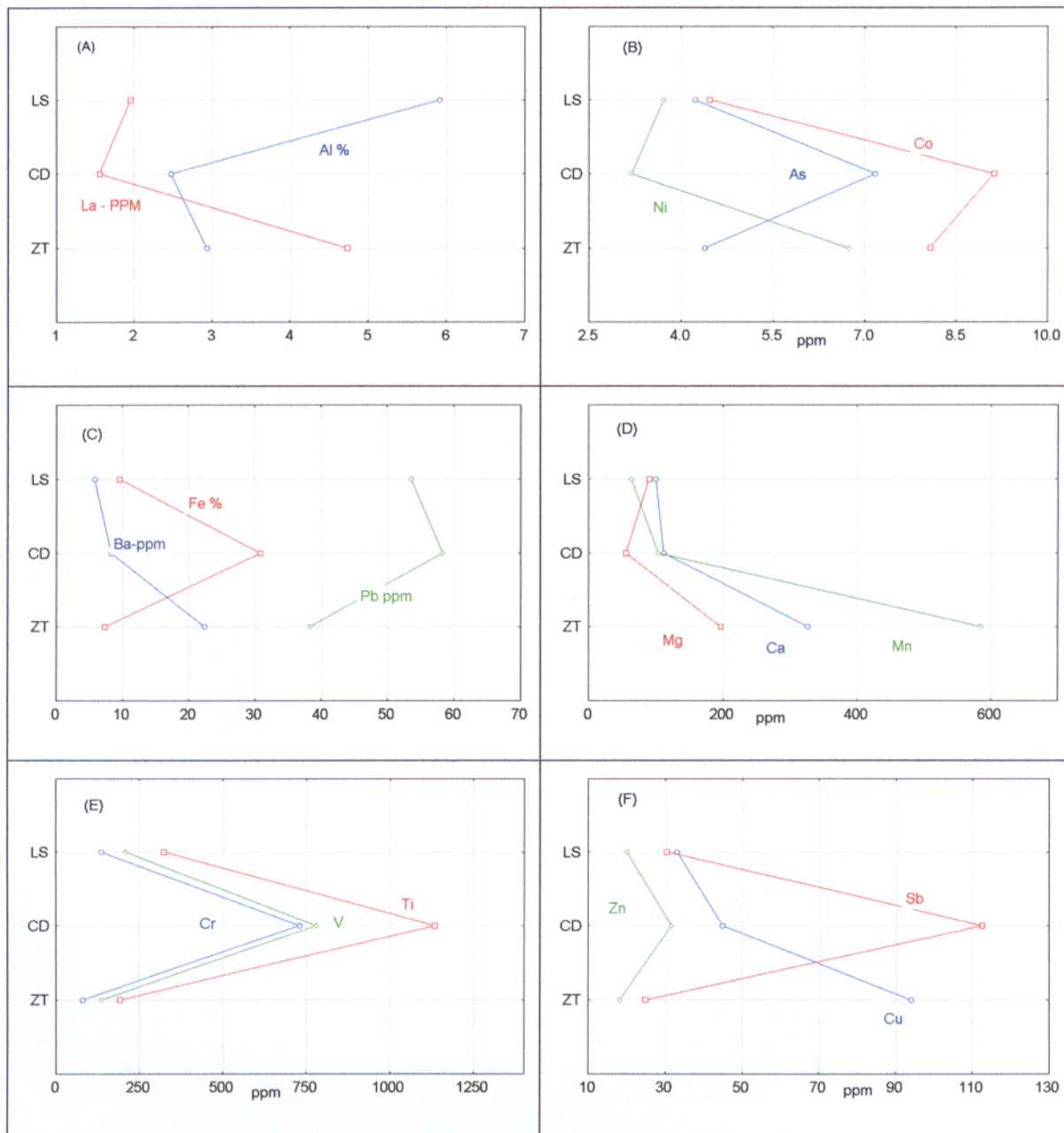


Figura 4.1 – Área Guarujá – dispersão geoquímica no perfil de intemperismo

4.2.2 – Jaca

A figura 4.2.a apresenta os valores médios para Al e La nos três horizontes regolíticos estudados : zona de transição (ZT), crosta desmantelada / zona de concreções (CD) e latossolo (LS). Esses dois elementos mostram comportamentos bem distintos. O Al mostra um crescimento constante para o topo do perfil, com valor mais elevado no LS (2.93 %), decrescendo para CD (1.82 %) e ZT (1.18 %); enquanto que o La apresenta valor mais alto na ZT (5 ppm), decaindo para os horizontes superiores de CD (1 ppm) e LS (2 ppm).

A figura 4.2.b mostra os resultados médios para As, Au, Co e Ni. O As mostra valores de 9 ppm na ZT, 39 ppm na CD e 11 ppm no LS. O Au tem 15 ppb para a ZT, 16 ppb para CD e 11 ppb para o LS. O Co mostra 5 ppm na ZT, 10 ppm na CD e 3 ppm no LS. O Ni apresenta valores de 6 ppm para a ZT e CD e 3 ppm para o LS. Observa-se, então, um comportamento relativamente similar para As, Au e Co, com um aumento na CD, sendo mais expressivo para o As. Para o Ni, pode-se comentar, apenas, um empobrecimento para o horizonte superior de LS.

A figura 4.2.c apresenta os dados de valores médios para Ba, Fe e Pb. O Ba mostra uma queda dos valores da base para o topo do perfil, tendo 23 ppm na ZT, 9 ppm na CD e 7 ppm no LS. O Fe apresenta um nítido enriquecimento na CD (27 %) em relação a ZT (5 %) e LS (6 %). O Pb também mostra valor mais elevado na CD (47 ppm) em relação a ZT (35 ppm) e LS (34 ppm). O Fe e Pb têm, portanto, comportamentos relativamente semelhantes, com enriquecimento na CD. O Ba mostra valor mais elevado na ZT e uma queda para os horizontes superiores.

A figura 4.2.d apresenta os resultados médios para Ca, Mg e Mn. O valor médio de Ca na ZT é de 182 ppm, caindo para 57 ppm na CD e para 52 ppm no LS. Para Mn, o valor de 412 ppm na ZT é bem mais elevado do que na CD (84 ppm) e no LS (38 ppm). Para Mg, o valor na ZT é de 85 ppm, caindo em direção da CD (37 ppm) e do LS (32 ppm). Os três elementos mostram, portanto, comportamentos similares com valores mais elevados na ZT e queda contínua em direção ao topo do perfil. Este comportamento é mais acentuado no caso do Mn.

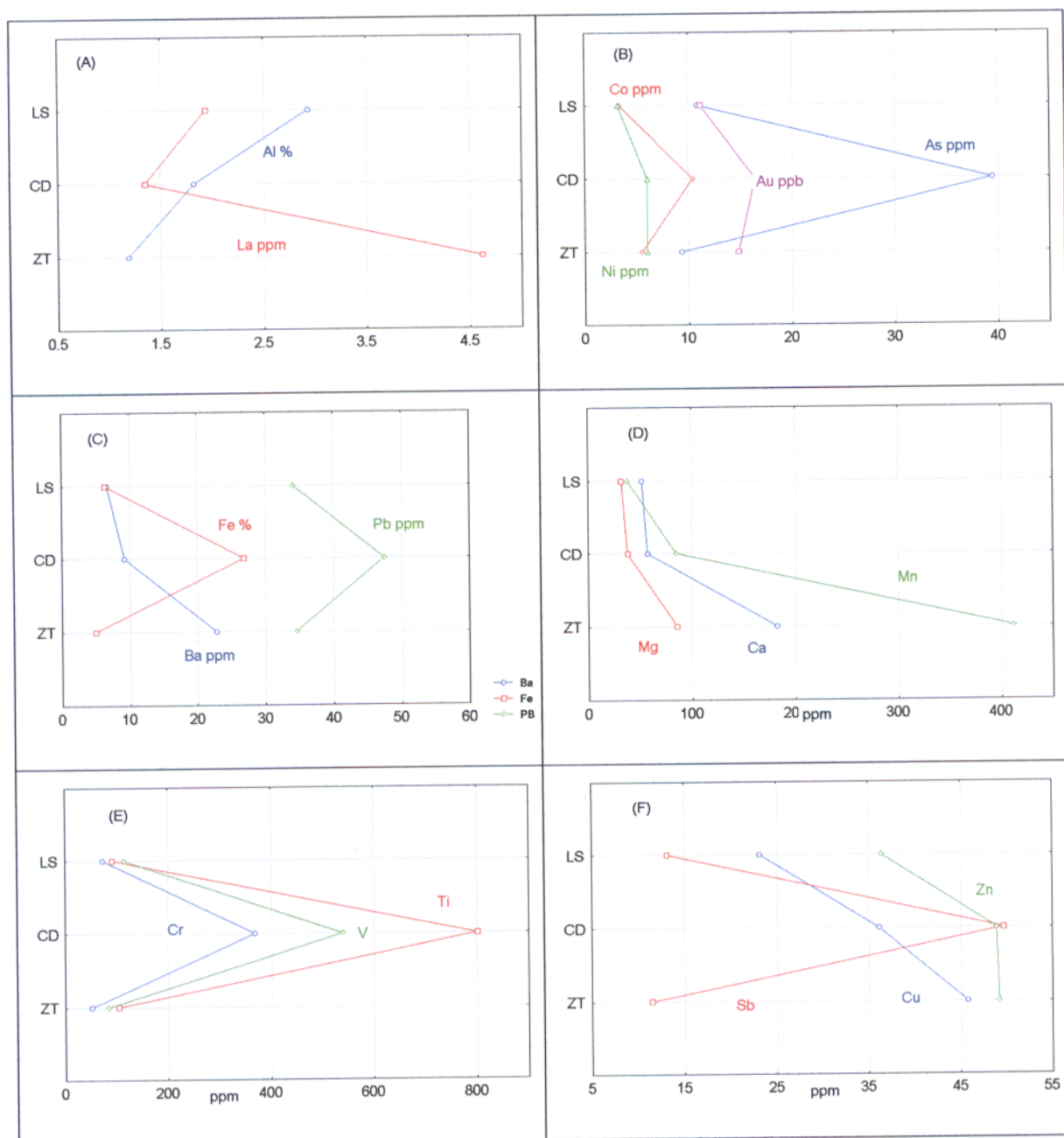


Figura 4.2 – Área Jaca – dispersão geoquímica no perfil de intemperismo

A figura 4.2.e mostra os valores médios de Cr, Ti e V. Esses três elementos mostram um comportamento muito similar ao longo do perfil, com um nítido enriquecimento dos valores na CD em relação a ZT e LS. O Cr tem valor de 369 ppm na CD e de 51 ppm e 73 ppm na ZT e LS, respectivamente. O Ti mostra valores de 102 ppm na ZT e de 90 ppm no LS, bem inferiores a 800 ppm na CD. O V apresenta valor de 83 ppm na ZT, crescendo para 539 ppm na CD e caindo para 113 no LS.

A figura 4.2.f apresenta os resultados médios para Cu, Sb e Zn. Os valores de Cu decrescem da ZT (46 ppm) em direção da CD (36 ppm) e LS (23 ppm). O Sb mostra um nítido enriquecimento na CD (50 ppm) em relação a ZT (11 ppm) e LS (13 ppm). O Zn mostra valores idênticos na ZT e CD (49 ppm) e uma queda no LS (36 ppm). Os três elementos apresentam, portanto, comportamentos distintos. O Cu mostra uma queda dos valores em direção ao topo do perfil, o Sb mostra um enriquecimento na CD, em relação aos outros dois horizontes e o zinco tem um empobrecimento no LS e valores semelhantes na CD e ZT.

4.2.3 – Paulo Afonso

A figura 4.3.a mostra os resultados médios para Al e La nos três horizontes regolíticos amostrados : zona de transição (ZT), crosta desmantelada / zona de concreções (CD) e latossolo (LS). O Al mostra um aumento contínuo de valores em direção topo do perfil, com 2.06 % na ZT, 2.75 % na CD e 4.47 % no LS. Os valores de La são todos próximos ao limite de detecção, com 2 ppm na ZT e LS e 1 ppm na CD.

A figura 4.3.b apresenta os dados de valores médios para As, Au, Co e Ni. Os valores de As são todos próximos ao limite de detecção. O Au mostra uma tendência de queda para o topo do perfil, com 18 ppm na ZT, 16 ppm na CD e 12 ppm no LS. O Co apresenta valor discretamente mais destacado na CD (12 ppm) em relação a ZT e LS ambas com 8 ppm. O Ni mostra valor discretamente mais destacado na ZT (17 ppm) em relação ao LS (15 ppm) e, especialmente, a CD (12 ppm).

A figura 4.3.c mostra os resultados de Fe, Pb e Ba. Os perfis para Fe e Pb têm comportamentos semelhantes, com nítido enriquecimento na Crosta desmantelada. O Fe tem 11 % na ZT, 26 % na CD e 12 % no LS. O Pb tem 39 ppm na ZT, 55 ppm na CD e 40 ppm no LS. O Ba mostra valor mais baixo no LS (7 ppm), enquanto os horizontes de ZT (11 ppm) e CD (12 ppm) têm valores bem similares.

A figura 4.3.d apresenta os resultados médios para Ca, Mg e Mn. O Ca apresenta os valores de 179 ppm na ZT, 99 ppm na CD e 126 ppm no LS. Para Mg, os valores obtidos foram de 94 ppm na ZT, 53 ppm na CD e 78 ppm no LS. O Mn mostra 421 ppm na ZT, 283 ppm na CD e 214 ppm no LS. O comportamento para o Mg e Ca são relativamente idênticos, havendo uma queda de valores na CD e mostrando o horizonte de CD como o de

resultado mais alto. O Mn apresenta uma queda contínua de valores em direção ao topo do perfil.

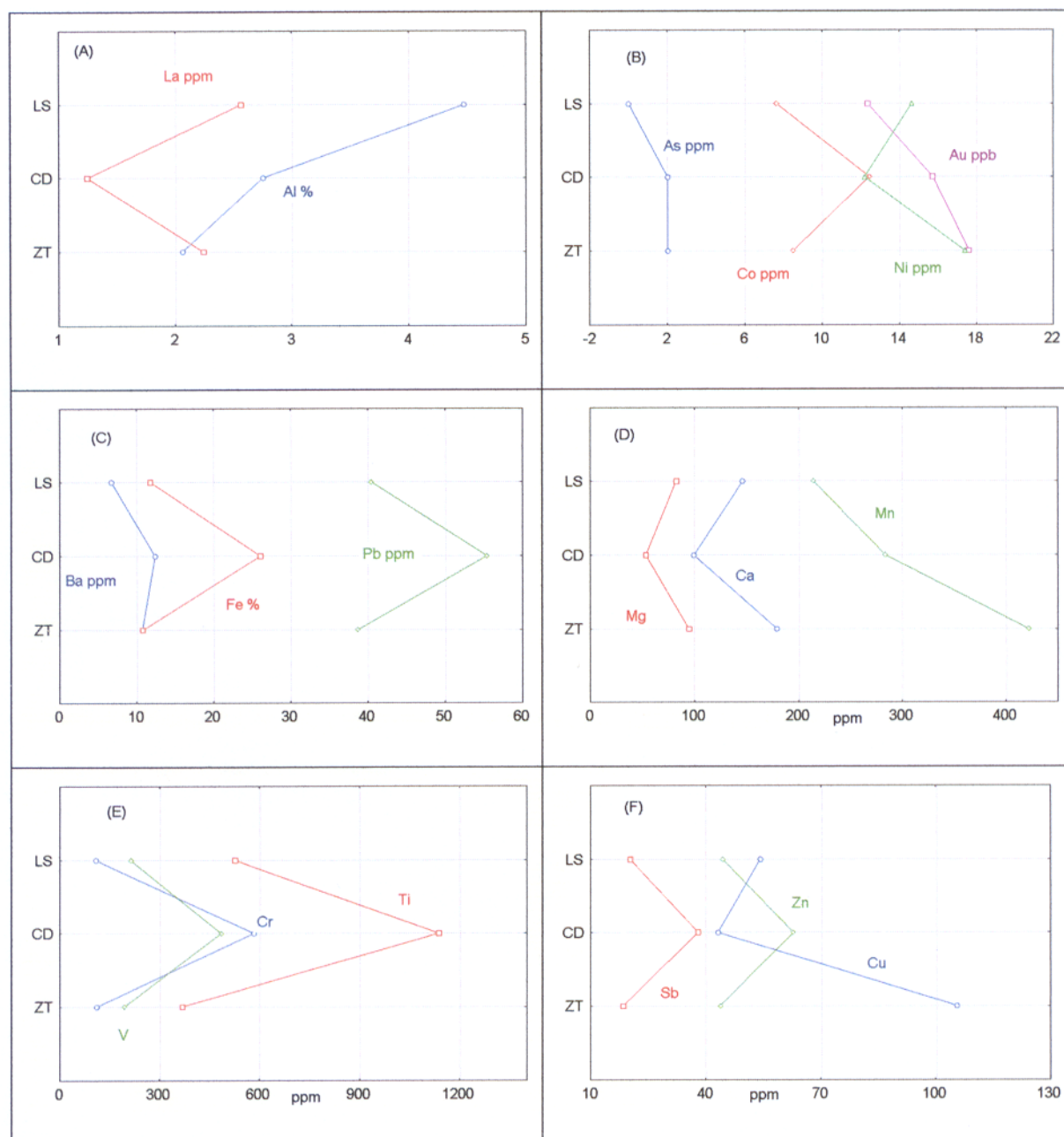


Figura 4.3 – Área Paulo Afonso – dispersão geoquímica no perfil de intemperismo.

A figura 4.3.e mostra os valores médios de Cr, Ti e V. Os três elementos apresentam perfis similares com nítido enriquecimento na crosta dismantelada. Para Cr temos 110 ppm na ZT, 582 ppm na CD e 107 ppm no LS, enquanto que para Ti temos 366 ppm na ZT,

1136 ppm na CD e 524 ppm no LS, e para o V temos 192 ppm na ZT, 484 na CD e 212 ppm no LS.

A figura 4.3.f apresenta os valores médios para Cu, Sb e Zn. Os valores de Cu decrescem fortemente da ZT (106 ppm) para a CD (43 ppm) e têm ligeiro crescimento para o LS (51 ppm). O Zn mostra valor mais forte na CD (63 ppm) em relação a ZT (44 ppm) e LS (44 ppm). O Sb mostra, também, valor mais elevado na CD (38 ppm) em relação a ZT (18 ppm) e LS (20 ppm).

4.2.4 – Dispersão geoquímica no perfil de intemperismo – integração entre áreas (amostras de superfície)

Executou-se uma integração de dados para cada elemento analisado em amostras de superfície, a partir do estudo conjunto de seus perfis geoquímicos nas três áreas trabalhadas. Este método comparativo pode permitir definir tendências gerais do comportamento dos elementos ao longo do perfil laterítico.

Alumínio

Os perfis de Al nas três áreas trabalhadas (figura 4.4) possuem a característica em comum de apresentar o LS como o horizonte com valores mais elevados. Nas áreas Jaca e Paulo Afonso, o comportamento deste elemento é muito similar, com um crescimento contínuo dos valores em direção ao topo do perfil. Na área Guarujá, entretanto, o horizonte de ZT mostra valor mais alto do que CD.

Arsênio

Os perfis de As (figura 4.4) mostram para as áreas Jaca e Guarujá um aumento na CD em relação a ZT e LS. Na área Jaca, entretanto, este aumento é bem mais nítido e expressivo do que no Guarujá. Na área Paulo Afonso, os valores de As posicionam-se próximos ao limite de detecção e não permitem definir um comportamento ao longo do perfil.

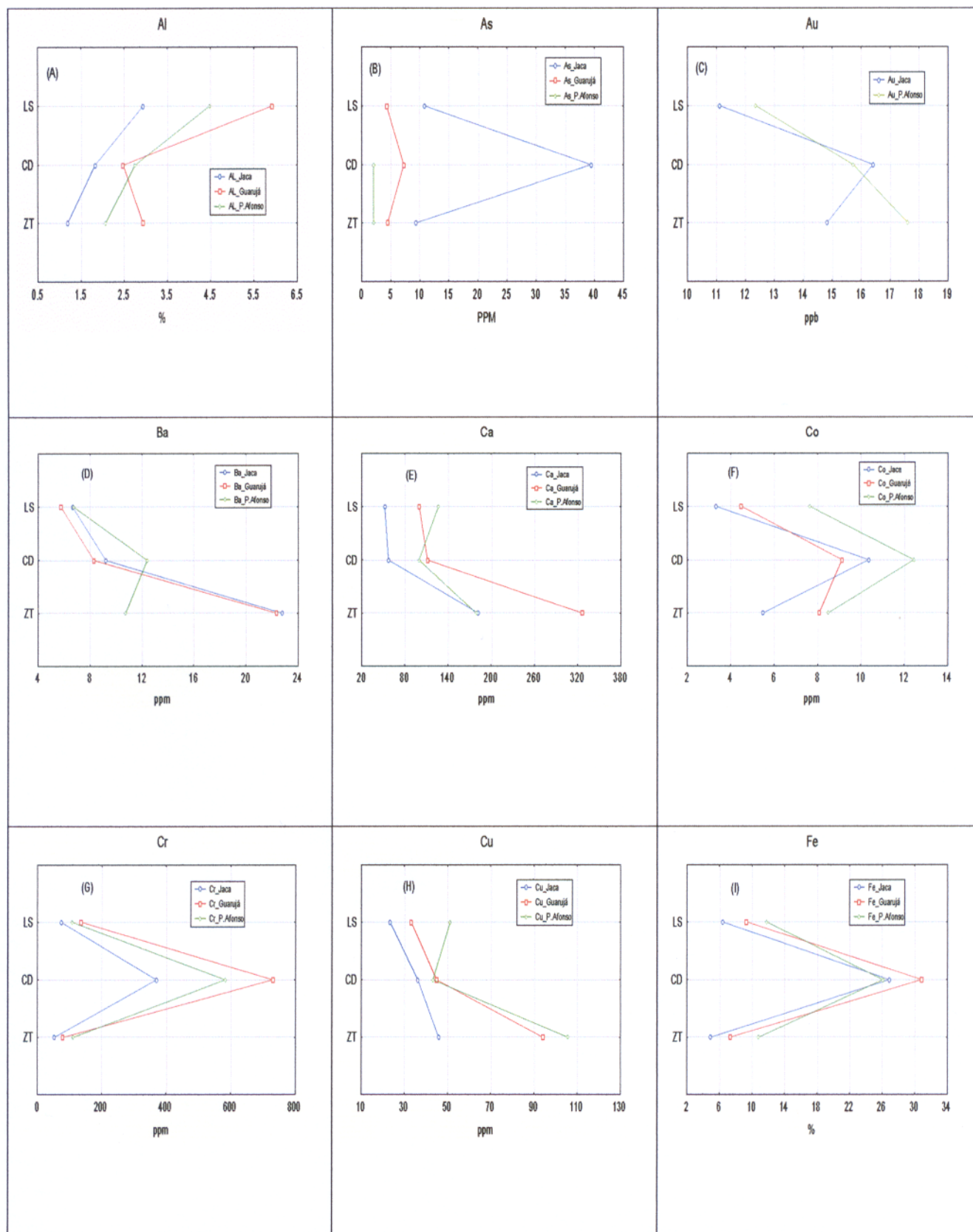


Figura 4.4 – Perfis geoquímicos de Al, As, Au, Ba, Ca, Cr, Cu e Fe nas áreas trabalhadas.

Ouro

Os perfis para ouro (figura 4.4) mostram, sempre, um empobrecimento dos valores no LS, em relação aos outros dois horizontes. Na área Jaca, a CD é o horizonte com valor mais expressivo, enquanto que no Paulo Afonso a ZT mostra valor mais elevado.

é mais marcante nas áreas Guarujá e Paulo Afonso. É interessante observar que, nas áreas Guarujá e Jaca, existe uma diminuição contínua dos resultados da base para o topo do perfil. No Paulo Afonso, entretanto, o valor do LS é ligeiramente superior a CD.

Ferro

O comportamento do Fe é bastante similar nas três áreas trabalhadas (figura 4.4). Caracteriza-se por um forte enriquecimento na CD, em relação a ZT e LS. Este contraste é mais acentuado nas áreas Jaca e Guarujá e um pouco mais suave no Paulo Afonso. Os valores na ZT e LS são relativamente semelhantes, com resultados ligeiramente mais altos no LS.

Lantânio

A figura 4.5 apresenta os perfis de lantânio nas três áreas trabalhadas. As áreas Jaca e Guarujá mostram comportamento similares, com valores mais elevados na ZT, diminuindo para CD e tendo um leve aumento no LS. No Paulo Afonso, o perfil de La mostra, também, uma diminuição na CD, mas os valores na ZT e LS são praticamente iguais.

Magnésio

A figura 4.5 mostra os perfis de Mg nas três áreas trabalhadas. A ZT, nas três áreas, é a unidade que apresenta valores mais elevados, sendo que o contraste da ZT em relação a CD e LS, é mais acentuado na área Guarujá. Por outro lado, nas áreas Guarujá e Paulo Afonso os valores no LS são levemente mais altos do que na CD, enquanto que na área Jaca esta relação é invertida.

Manganês

O comportamento de Mn nas três áreas trabalhadas (figura 4.5) guardam boa similaridade. Existe, sempre, um decaimento de valores para Mn da base para o topo do perfil. Na área Paulo Afonso esta diminuição se processa de forma mais contínua e homogênea do que nas áreas Jaca e Guarujá, onde existe uma queda mais abrupta da ZT para a CD.

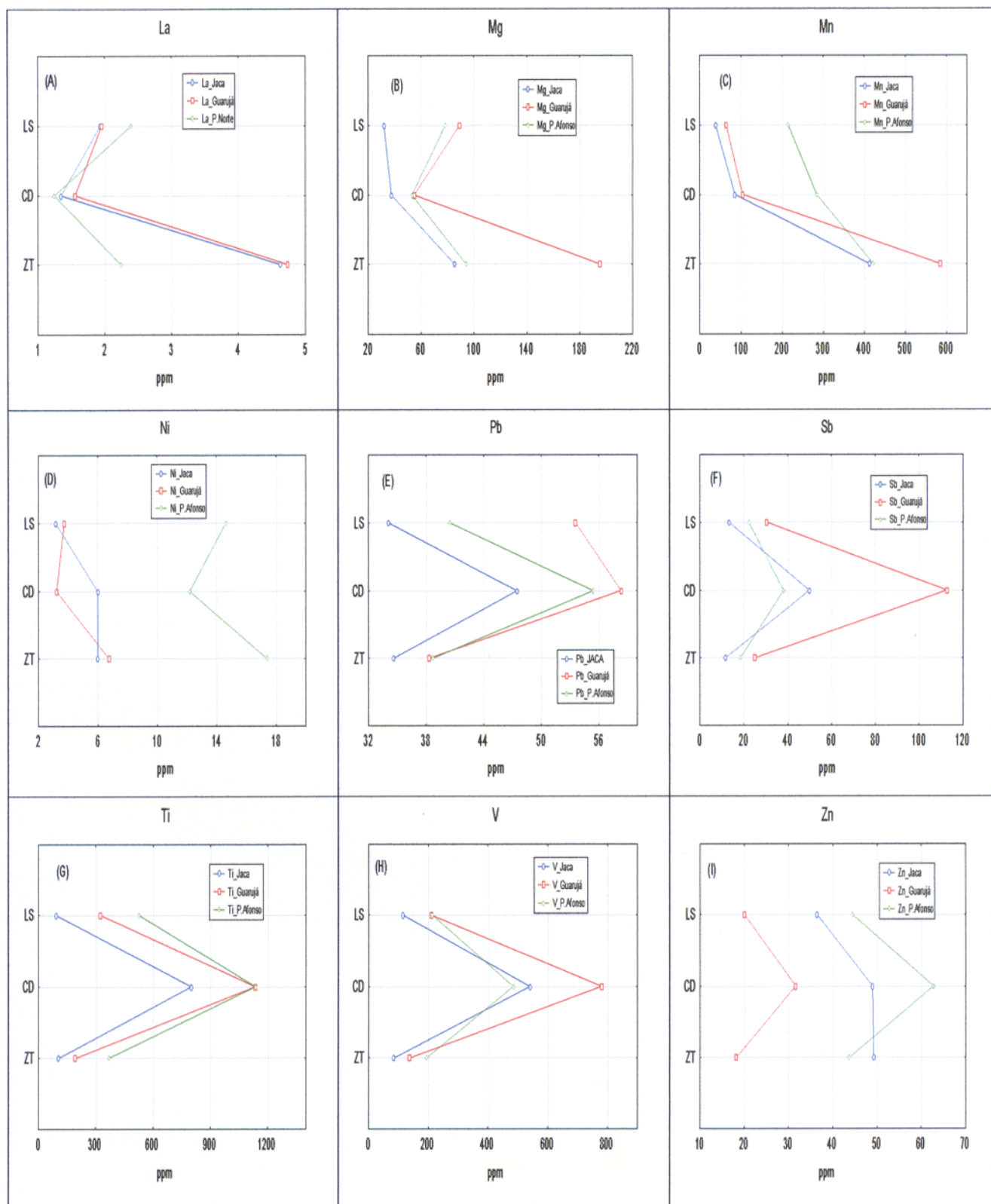


Figura 4.5 – Perfis geoquímicos de La, Mg, Mn, Ni, Pb, Sb, Ti, V, Zn nas áreas trabalhadas.

Níquel

Os perfis de Ni nas três áreas trabalhadas (figura 4.5) mostram para as áreas Paulo Afonso e Guarujá valores mais elevados na ZT, que são discretamente mais altos do a CD e LS. Na área Jaca, os valores na ZT e CD são relativamente similares e levemente mais altos do que no LS. Salienta-se que, para este elemento, os valores geoquímicos são, em geral, baixos, sendo mais representativos na área Paulo Afonso.

Chumbo

A figura 4.5 apresenta os perfis de Pb nas três áreas trabalhadas. Os valores na CD são, sempre, mais elevados do que nos dois outros horizontes. O perfil da área Guarujá distingue-se das duas outras áreas por mostrar o resultado no LS bem superior ao da ZT.

Antimônio

Os perfis de Sb nas três áreas trabalhadas (figura 4.5) apresentam comportamento muito similar, com um nítido aumento dos valores na CD, em relação aos outros dois horizontes. Este enriquecimento é mais acentuado na área Guarujá. Os valores no LS são, sempre, discretamente mais elevados do que na ZT.

Titânio

Os perfis de Ti nas três áreas trabalhadas (figura 4.5) mostram características semelhantes. com um claro enriquecimento na CD em relação aos dois outros horizontes.

Vanádio

Os perfis de V nas três áreas trabalhadas (figura 4.5) mostram comportamento muito similar, caracterizado por um nítido aumento na CD em relação ao LS e ZT. Este contraste é mais acentuado na área Guarujá. Salienta-se, ainda, que os valores no LS são, sempre, levemente mais altos do que na ZT.

Zinco

Os perfis de Zn nas três áreas trabalhadas (figura 4.5) apresentam, em linhas gerais, valores mais elevados na CD. Nas áreas Paulo Afonso e Guarujá visualiza-se de maneira

mais nítida o enriquecimento da CD em relação aos outros dois horizontes. Na área Jaca, entretanto, os valores na ZT e CD são similares.

4.3 – DISPERSÃO GEOQUÍMICA NO PERFIL DE INTEMPERISMO (AMOSTRAS DE TRADO)

Um programa de sondagem rasa, via trado mecânico, foi desenvolvida, pela DOCEGEO, no topo do platô W da área Guarujá. O objetivo desse programa foi atingir e amostrar os horizontes de crosta desmantelada e zona de transição em profundidade e, por isso, na maior parte dos furos, o horizonte de latossolo não foi recuperado para análise. Entretanto, em quatro furos (FTs 44, 73, 83 e 88), a amostragem contemplou todo o perfil de intemperismo, sendo amostrados os três horizontes regolíticos. O FT-44 encontra-se sobre quartzo-arenitos, enquanto os outros três furos estão localizados sobre arenitos finos e siltitos. Os resultados analíticos desses quatro furos, para Al, Fe, Cr e Mn, são apresentados na figura 4.6 e serão discutidos a seguir. Posteriormente, esses dados serão comparados com os obtidos nas amostras de superfície, com o intuito de aprofundar o estudo do comportamento, desses quatro elementos, ao longo do perfil de intemperismo.

O furo FT-44 atingiu uma profundidade de 12 m, interceptando os horizontes de latossolo (LS) de 0 a 5 m, de crosta desmantelada (CD) de 5 a 10 m e de zona de transição (ZT) de 10 a 12 m. O perfil para Fe apresenta um nítido enriquecimento na CD, com valores variando de 28 a 32 %, sendo seu valor máximo obtido na parte central desse horizonte. Os resultados de Fe caem de maneira mais acentuada no LS (7 a 9 %) do que na ZT (15 a 17 %). Os valores de Al são claramente mais elevados no LS (média de 4.35 %) do que nos dois horizontes subjacentes, sendo que a média de Al na CD (1.76 %) é discretamente maior do que na ZT (1.39 %). O perfil de Mn mostra valores mais elevados na ZT (média de 204 ppm) e na base da CD (média de 96 ppm) e resultados mais baixos na parte superior da CD (média de 38 ppm) e no LS (53 ppm). Para Cr, o perfil mostra um nítido enriquecimento na CD, com valores variando de 306 a 493 ppm, em relação ao LS e ZT, que apresentam resultados muito semelhantes.

O furo FT-73 teve um total de 10 m perfurados, sendo 1 m de LS (0 a 1 m), 4 m de CD (1 a 5 m) e 5 m da ZT (5 a 10 m). O perfil de Fe mostra valores muito baixos (média de 4 %) na parte mais basal da ZT (7 a 10 m) e valores progressivamente mais elevados para

o topo desse horizonte, chegando a atingir 16 %. Na CD, os valores de Fe são mais elevados, variando de 22 a 28 %. A única amostra no LS mostrou resultado, para Fe, de 25 %. O perfil para Al apresenta valores mais baixos na base da ZT (6 a 10 m), com média de 1.01 % e valores mais elevados no topo (5 a 6 m) da ZT (2.89 %) e no LS (2.91 %). Na CD, o valor médio de Al é de 2.06, sendo discretamente mais altos nos seus dois metros mais superiores. O perfil de Mn mostra, para a ZT, valores relativamente baixos e tendendo a decrescer em direção ao topo. Os resultados de Mn, nesse horizonte, variam de 138 ppm no intervalo de 9 a 10 m até 52 ppm de 5 a 6 m. Na CD, os resultados de Mn são irregulares, variando de 39 a 203 ppm e no LS, o valor de Mn foi de 142 ppm. O perfil para Cr apresenta, para a ZT, valores crescentes da base (62 ppm) para o topo do horizonte (373 ppm). Na CD, os valores de Cr são mais elevados, variando de 354 a 722 ppm e no LS, o valor obtido, no único intervalo amostrado, foi de 441 ppm.

O furo FT-83 atingiu uma profundidade de 11 m, com os seguintes horizontes interceptados : latossolo (0 a 3 m), crosta desmantelada (3 a 7 m) e zona de transição (7 a 11 m). O perfil para Fe apresenta um claro enriquecimento na CD, com valores variando de 23 a 26 %. Na ZT, os valores de Fe apresentam uma tendência de queda em direção ao topo, variando de 22 a 18 %, enquanto que no LS, os resultados de Fe são mais baixos e mostram. Também, uma queda gradativa para o topo do horizonte, variando de 9 a 12 %. O perfil para Al mostra, nitidamente, valores mais elevados no LS, com média de 5.3 %, enquanto que para os outros dois horizontes, os resultados, desse elemento, são bem similares, com médias de 1.5 % na CD e 1.6 % na ZT. O perfil para Mn apresenta valores claramente mais elevados na ZT, com variações entre 140 e 261 ppm e resultados similares na CD (média de 69 ppm) e LS (média de 68 ppm). O perfil para Cr mostra um enriquecimento na CD (média de 330 ppm) em relação aos outros dois horizontes, sendo o valor médio no LS (178 ppm) discretamente superior ao da ZT (126 ppm).

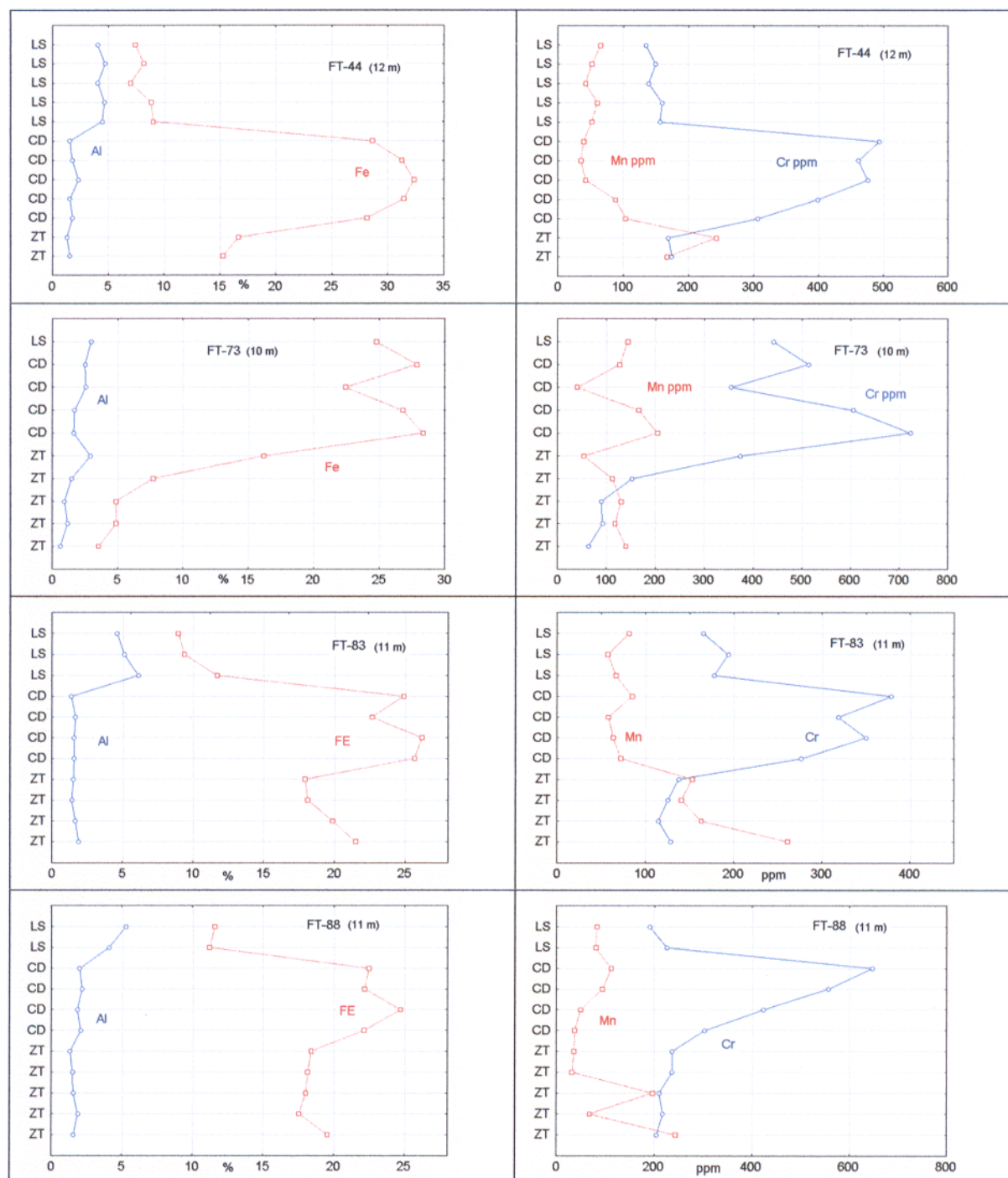


Figura 4.6 – Perfis geoquímicos de Al, Fe, Cr e Mn em furos de trado mecânico, na área Guarujá. ZT (zona de transição); CD (crosta dismantelada) e LS (latossolo). Amostras coletadas de metro a metro.

O furo FT-88 teve um total de 11 m perfurados, interceptando latossolo de 0 a 2 m, crosta dismantelada de 2 a 6 m e zona de transição de 6 a 11 m. O perfil de Fe mostra um aumento na CD, com valor médio de 23 %, com queda forte no LS (média de 11 %) e menos acentuada na ZT (média de 18 %). O perfil de Al mostra um claro aumento na LS,

com valor médio de 4.7 % e valores discretamente mais elevados na CD (média de 2 %) do que na ZT (média de 1.5 %). O perfil de Mn apresenta valores mais altos na parte basal da ZT (média de 168 ppm). Os resultados, para esse elemento, caem no topo da ZT e base da CD, com média de 38 ppm, apresentam ligeiro aumento no topo da CD (média de 102 ppm) e voltam a cair no LS (média de 81 ppm). O perfil de Cr mostra claro enriquecimento na CD (média de 482 ppm) e valores médios relativamente semelhantes na ZT (220 ppm) e LS (208 ppm).

Analisando conjuntamente os resultados obtidos nos furos de trado, apresentados acima, e comparando-os com os dados de amostras de superfície, pode-se traçar as seguintes considerações :

- a) Os resultados para Fe nas amostras de sondagem rasa e de superfície mostram grande similaridade quanto ao nítido enriquecimento na CD. É interessante observar que em 3 furos (FT 44, 83 e 88), os valores médios, para Fe, na ZT foram mais altos do que no LS, ao contrário do observado no furo FT-73, que apresenta resultados muito baixos na maior parte da ZT. Esse comportamento deve corresponder a uma litodependência, já que o FT-73 posiciona-se sobre quartzos arenitos, puros, com valores originalmente fracos para Fe. Nas amostras de superfície, os resultados médios de LS e ZT são relativamente similares.
- b) Os resultados para Al mostram, para a maioria dos furos, valores nitidamente mais elevados no LS, o que concorda com o comportamento observado nas amostras de superfície. Os valores para ZT e CD são, normalmente, relativamente semelhantes, o que, também, está de acordo com os dados de superfície.
- c) Os resultados de Mn em 3 furos (FT 44, 83 e 88) mostram valores mais elevados na ZT, concordando com a análise feita para as amostras de superfície. No FT-73, entretanto, os valores de Mn na ZT são baixos e devem decorrer do processo de litodependência, já comentado para o Fe.
- d) Os resultados para Cr nas amostras de sondagem rasa mostram, sempre, um claro enriquecimento na CD, concordando com o visualizado nas amostras de superfície. Os valores, desse elemento, na ZT e LS são relativamente similares na maioria dos furos, o que, também, coincide com a interpretação das amostras de superfície. Entretanto, no

furo FT-73, posicionado sobre quartzos-arenitos, os valores de Cr, na ZT, são marcadamente baixos.

4.4 – ANÁLISE FATORIAL (AMOSTRAS DE SUPERFÍCIE)

Análises fatoriais foram efetuados para amostras de superfície nas três áreas trabalhadas. Esse método estatístico é útil na avaliação de dados geoquímicos multivariados. sendo possível, comumente, interpretar os fatores resultantes em termos geológicos, tais como processos ou tipos. Dessa forma, na aplicação de análise fatorial para dados geoquímicos, os fatores, normalmente, indicam elementos geoquimicamente coerentes que se relacionam a tipos de rochas ou processos que tenham afetado as rochas. A análise de fator, aqui desenvolvida, objetivou comparar os fatores principais definidos para cada área, analisar as possíveis correspondências geoquímicas e tentar interpretá-las em termos de processos ou populações geológicas.

Foram selecionados neste estudo, os seguintes elementos, por apresentarem uma maior quantidade de casos válidos (tabelas 4.2, 4.3 e 4.4) : Al, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Sb, Ti, V e Zn. Utilizou-se, como método de extração, a análise de fator principal (*cummunalities* = *multiple R²*) e procurou-se selecionar fatores com *eigenvalues* maiores do que 1 (Critério de Kaiser). A tabela 4.5 apresenta a matriz dos fatores para cada área trabalhada.

Tabela 4.5 – Matriz de fator (*varimax normalized*). Método de extração : análise fator principal (*cummunalities = multiple R²*).

Área Guarujá			Área Jaca			Área Paulo Afonso		
	Fator 1	Fator 2		Fator 1	Fator 2		Fator 1	Fator 2
Al	-.3912	.1791	Al	-.3642	.2786	Al	-.0087	-.2338
Ba	.8585	-.0382	Ba	.8437	.2200	Ba	.2012	.6225
Ca	.7554	.0635	Ca	.8210	.1330	Ca	-.1251	.7135
Co	.9269	.1803	Co	.9764	-.1128	Co	.4775	.6527
Cr	-.1185	.7896	Cr	-.3610	-.6294	Cr	.6235	-.2016
Cu	.6191	.0742	Cu	.2134	.0576	Cu	-.2449	.3032
Fe	-.0530	.9276	Fe	-.1889	-.9344	Fe	.8975	.0037
Mg	.1499	-.0505	Mg	.7892	.3127	Mg	-.1761	.7156
Mn	.9189	.0241	Mn	.8596	.2912	Mn	-.0807	.6936
Ni	.8827	.0742	Ni	.8004	.0571	Ni	-.0533	.1904
Pb	-.1620	.5681	Pb	-.1406	-.8420	Pb	.8779	.0266
Sb	-.0467	.9486	Sb	-.2694	-.8556	Sb	.8417	-.0569
Ti	.3817	.8262	Ti	.2280	-.8144	Ti	.8381	-.1874
V	.1018	.9397	V	-.1722	-.6318	V	.7897	-.1744
Zn	.6242	.4982	Zn	.5658	-.5800	Zn	.7608	.3089

Este estudo permitiu, portanto, separar, para cada área, dois fatores, com *eigenvalue* maior que 1 e assim caracterizados :

Guarujá – Fator 1 : Co, Mn, Ni, Ba, Ca, Cu *eigenvalue* = 5.38

Fator 2 : Sb, V, Fe, Cr, Ti *eigenvalue* = 4.16

Jaca – Fator 1 : Co, Mn, Ba, Ca, Ni, Mg *eigenvalue* = 5.86

Fator 2 : Fe, Sb, Pb, Ti, V, Cr *eigenvalue* = 3.76

Paulo Afonso – Fator 1 : Fe, Pb, Ti, Sb, Zn, Cr *eigenvalue* = 4.97

Fator 2 : Ca, Mg, Mn, Ba *eigenvalue* = 2.69

Uma análise, entre as áreas, dos fatores obtidos revela algumas similaridades. Os fatores 2 das áreas Guarujá e Jaca e o fator 1 do Paulo Afonso mostram uma boa correspondência, evidenciada pela participação constante de Sb, Fe, Cr e Ti e pela presença em dois casos de V e Pb. Por outro lado, os fatores 1 das áreas Guarujá e Jaca e o fator 2 do Paulo Afonso também mostram-se correspondentes, exemplificados pela presença constante de Mn, Ba e Ca e pela participação em dois casos de Co, Ni e Mg. A discussão

sobre o significado geoquímico e geológico dessas similaridades será apresentada, mais adiante, no item 4.5.2.

4.5 – DISCUSSÕES

4.5.1 – Aspectos gerais do comportamento geoquímico dos elementos no perfil de intemperismo.

As análises dos dados geoquímicos para cada área estudada, descritas nos itens anteriores, permitem levantar algumas considerações importantes para o entendimento do comportamento geoquímico do perfil laterítico.

A observação individual dos perfis dos elementos em todas as áreas estudadas mostram que, na grande maioria dos casos, existe uma heterogenidade nos valores ao longo do perfil de intemperismo. Raramente foram visualizados perfis onde os valores médios de um elemento permaneciam semelhantes nos três horizontes analisados e, quando ocorriam, referiam-se a elementos que apresentavam valores discretos, próximos ao limite de detecção. Como exemplo, podem-se citar o As na área Paulo Afonso e Ni na área Jaca. Esses mesmos elementos, em outras áreas, mostravam sempre alguma heterogenidade. Os comportamentos mais comuns observados nos perfis seriam, então, um elemento apresentar diferenças marcantes nos três meios amostrais ou mostrar um valor nitidamente mais alto ou baixo em um determinado horizonte e resultados semelhantes ou discretamente diferentes nos dois outros horizontes.

O comportamento individual dos elementos ao longo dos horizontes que compõem o perfil de intemperismo, discutidos no parágrafo anterior, tem implicações óbvias, mas de grande importância na exploração geoquímica. Elementos que apresentam, nos horizontes regolíticos, diferentes valores de *background* e, consequentemente, distintas expressões de anomalias, não podem, evidentemente, ser tratados como uma única população estatística. Fica demonstrado, com estas constatações, a grande importância e utilidade do mapeamento de regolitos em um programa de exploração. Este mapeamento objetiva, entre outras coisas, a discriminação dos diferentes meios amostrais que devem, a princípio, ser tratados separadamente no processo de interpretação de dados de uma prospecção geoquímica de solos.

Outra consideração interessante, que se pode desprender do que foi discutido anteriormente, refere-se a conduta de alguns elementos apresentarem valores nitidamente mais destacados em determinado horizonte do perfil laterítico. Isto pode, evidentemente, traduzir em um maior contraste entre anomalia e background neste determinado horizonte. Então, em determinadas situações num programa exploratório, pode-se privilegiar a coleta de um meio amostral na busca de zonas anômalas para um elemento ou um grupo de elementos.

A importância do mapeamento de regolito no que se refere a exploração geoquímica foi reportada em diversos trabalhos anteriores. Anand (1997) afirma que a dispersão geoquímica de elementos só pode ser entendida e modelada com o conhecimento das formas de relevo e estratigrafia dos regolitos. Relata, ainda, que a variedade de materiais regolíticos expostos apresentam distintos graus de enriquecimento e depleção de elementos provenientes de um corpo de minério. Anand & Butt (2001) reportam que valores diferentes de *thresholds* se aplicam para distintos meios amostrais e, portanto, para diferentes unidades regolíticas. Afirmam, ainda, que uma das propostas de se produzir mapas de regolitos - formas de relevo é delimitar áreas de unidades regolíticas que possam ser tratadas uniformemente do ponto de vista geoquímico.

4.5.2 – Análise conjunta das áreas. Estilos de comportamento dos elementos no perfil de intemperismo.

No estudo particular de cada área, procurou-se, inicialmente, separar os elementos analisados em classes com características semelhantes em relação ao comportamento geoquímico ao longo do perfil de intemperismo. Posteriormente, procurou-se fazer um estudo comparativo entre as áreas com o intuito, entre outros, de se definir possíveis comportamentos padrões para um elemento ou grupo de elementos. Salienta-se que como as áreas trabalhadas apresentam particularidades geomorfológicas e geológicas distintas, comportamentos homogêneos de um elemento ou grupo de elementos podem sinalizar um *trend* comportamental para a região de Carajás.

A análise conjunta das três áreas, permite separar os elementos analisados em três distintos padrões ou estilos de comportamentos geoquímicos :

Estilo 1 - Corresponde a um grupo de elementos que apresenta um nítido enriquecimento no horizonte de crosta desmantelada em relação aos outros horizontes. Estão enquadrados nesta classe os elementos **Fe, Pb, Zn, Sb, Cr, Ti, V, Co, As**. Com exceção do As, todos os elementos mostraram a mesma conduta, em todas as três áreas, traduzido por um claro aumento nos seus valores médios na crosta desmantelada. O As apresentou comportamento típico dessa classe nas áreas Guarujá e Jaca, mas na área Paulo Afonso mostrou praticamente o mesmo resultado nos três meios amostrais, que correspondia a valores próximos ao limite de detecção analítico. Isso deve significar a discreta presença, desse elemento, naquele ambiente ou situação geológica. Normalmente esses elementos apresentam um perfil aproximadamente simétrico em relação a crosta desmantelada, refletindo valores relativamente similares na zona de transição e latossolo. Numa análise mais detalhada, entretanto, nota-se uma tendência da maioria dos elementos (Fe, Pb, Sb, Cr, Ti, V) apresentarem valores discretamente mais elevados no latossolo em relação a zona de transição. O comportamento do Co. ao contrário, mostra sempre valores mais altos na zona de transição em comparação ao latossolo.

Estilo 2 - Corresponde a um grupo de elementos caracterizado por apresentar valores mais elevados no horizonte de zona transição. Estão incluídos nessa classe, por apresentar essa característica em todas as áreas estudadas, os elementos **Ca, Mn, Cu, Ba, Mg, Ni e La**. A partir do horizonte de zona de transição, onde são observados os teores mais altos, o perfil geoquímico desses elementos pode mostrar dois tipos principais de comportamento : 2a) uma queda contínua dos valores da base para o topo do perfil, tendo, conseqüentemente, os resultados mais baixos no horizonte de latossolo; 2b) Os valores da crosta desmantelada são inferiores aos outros dois horizontes. Neste caso, observa-se uma queda mais forte dos valores entre a zona de transição e crosta desmantelada e, então, um aumento, normalmente pouco acentuado, no horizonte de latossolo. O Mn, nas três áreas estudadas, apresenta um empobrecimento da base para o topo do perfil, enquadrando-se, sempre, no primeiro tipo de comportamento (2a). Para Cu, Ca, Ba, Ni e Mg são observados comportamentos dos dois tipos. O La enquadra-se, nas três áreas, no tipo (2 b).

Estilo 3 - Corresponde ao comportamento do alumínio que apresenta valor médio nitidamente mais elevado no latossolo. Nas áreas Jaca e Paulo Afonso, o Al mostra um

contínuo enriquecimento em direção ao topo do perfil. Na área Guarujá, entretanto, o valor médio na zona de transição é um pouco mais alto do que na crosta desmantelada.

Os resultados de Au só foram estudados em duas áreas (Jaca e Paulo Afonso). Em uma área (Jaca), o Au mostrou valores mais elevados na crosta desmantelada, enquanto que no Paulo Afonso, os resultados mais altos foram encontrados na zona de transição. É comum nas duas áreas, entretanto, o nítido empobrecimento no horizonte de latossolo. Então, com os dados disponíveis, o Au poderia se enquadrar tanto no estilo 1 quanto no estilo 2. Trabalhos desenvolvidos pela DOCEGEO em outras áreas (Medeiros Filho & Lopes. 2001; Medeiros Filho. 2002) mostram uma tendência do Au ter valores médios mais altos na crosta desmantelada e, portanto, uma maior possibilidade de enquadramento no estilo 1

Dessa forma, foram definidos 9 elementos no estilo 1 (Fe, Pb, Zn, Sb, Cr, Ti, V, As e Co); 7 elementos no estilo 2 (Ca, Mn, Cu, Ba, Mg, La e Ni) e 1 elemento no estilo 3 (Al). Os dados para Au mostram uma tendência para o posicionamento dentro do estilo 1.

A análise de fator principal, efetuada com amostras de superfície nas três áreas trabalhadas (item 4.4), permite indicar que os fatores 2 das áreas Guarujá e Jaca e o fator 1 do Paulo Afonso apresentam quase que sempre os mesmos elementos e todos, sem exceção, estão enquadrados dentro do estilo 1, caracterizados por valores mais altos no horizonte ferruginoso de crosta desmantelada. Por outro lado, os fatores 1 das áreas Guarujá e Jaca e o fator 2 na área Paulo Afonso correspondem, de maneira geral, a elementos (Mn, Ni, Ba, Ca, Mg e Cu) que se posicionam dentro do estilo 2, que apresentam resultados mais elevados na base do perfil de intemperismo ou zona de transição. Vale observar, ainda, que na área Paulo Afonso o valor maior de *eigenvalue* corresponde a elementos do estilo 1, enquanto que nas áreas Guarujá e Jaca os valores mais altos de *eigenvalues* estão relacionados a elementos do estilo 2. Isto pode refletir ambientes geológico distintos, já que nas áreas Jaca e Guarujá existe um predomínio de metassedimentos, enquanto que no Paulo Afonso existe uma maior contribuição de formações ferríferas e rochas básicas. Em resumo, este estudo de análise de fator vem reforçar a separação de estilos de comportamentos geoquímicos, apresentada acima.

O estudo das distribuições geoquímicas de Al, Fe, Mn e Cr, ao longo de quatro furos de trado (item 4.3), mostra, de maneira geral, que esses elementos apresentaram

comportamentos similares aos observados para as amostras de superfície e com a separação de estilos geoquímicos. Os resultados para Al mostraram, para a maioria dos furos, valores nitidamente mais elevados no horizonte de latossolo, coerente com o estilo 3, enquanto que as distribuições para Fe e Cr sempre apresentaram um enriquecimento no horizonte de crosta desmantelada, típico do estilo 1 e, finalmente, os resultados de Mn, na maioria dos furos, apresentaram valores mais elevados no horizonte de zona de transição, coerentes com o estilo 2.

4.5.3 – Comparação dos dados geoquímicos com outras áreas

As informações geoquímicas obtidas nas áreas Guarujá, Jaca e Paulo Afonso foram confrontadas com alguns trabalhos anteriores desenvolvidos em Carajás ou em outras regiões com características similares quanto a situação morfoclimática ou de evolução do perfil de intemperismo. Procurou-se ressaltar, especialmente, o comportamento dos elementos nos horizontes regolíticos no sentido de se comparar com a distribuição em estilos, proposta no item anterior.

Em um estudo sobre o comportamento geoquímico em um perfil laterítico em Mali, na África, efetuado por Freyssinet (1993), observa-se que da zona mosqueada para o *duricrust* existe um nítido enriquecimento de Fe, V, Cr e As, um discreto aumento de Co e Ni, uma ligeira queda nos valores de Al e um empobrecimento mais expressivo em Cu e Mg. Correlacionando a zona mosqueada e o *duricrust* de Freyssinet (1993) com, respectivamente, os horizontes de zona de transição e crosta desmantelada das áreas aqui trabalhadas, pode-se admitir que, de uma maneira geral, os dados geoquímicos são compatíveis. O Fe, V, Cr, As e Co estão enquadrados dentro do estilo 1 proposto, caracterizado por um nítido aumento na crosta desmantelada. O Cu e Mg, enquadra-se no estilo 2, apresentam sempre resultados mais elevados na zona de transição. Para o Al observou-se uma tendência, mais geral, de enriquecimento para o topo do perfil, mas na área Guarujá os valores na crosta desmantelada são ligeiramente mais baixos do que na zona de transição. O Ni apresenta, em geral, valores mais elevados na zona de transição (estilo 2). Na área Jaca, entretanto, os resultados médios de Ni, nos horizontes de crosta desmantelada e zona de transição, são similares.

Costa et al. (1993) estudaram o perfil laterítico maturo do Morro da Mina, em Cassiporé (Amapá). Informações geoquímicas sobre o horizonte concrecionário de ferro e latossolo foram apresentados e podem ser comparados com a crosta desmantelada e latossolo das áreas Guarujá, Jaca e Paulo Afonso. Os resultados geoquímicos no Morro da Mina mostram valores mais elevados no horizonte de concreção para Fe, Cr, Pb, Cu e V e mais baixos para Al e Ti, quando comparados com o horizonte de latossolo. Comparando-se com os dados das três áreas aqui trabalhadas, observa-se que os resultados de Fe, Cr, Pb e V sempre mostram valores mais elevados na crosta desmantelada em relação ao latossolo (estilo 1). Para Cu, o resultado também é compatível, já que existe uma tendência geral de queda de valores deste elemento para o topo do perfil (estilo 2). O comportamento do Al é, também, similar nos dois trabalhos, com valores mais elevados no horizonte de latossolo (estilo 3). Existe, entretanto, discordância quanto ao comportamento do Ti. Nas áreas Guarujá, Jaca e Paulo Afonso, os perfis de Ti mostram características semelhantes, com um claro enriquecimento na crosta desmantelada, que tem, portanto, sempre valores mais elevados do que no latossolo.

Em termos de Carajás, o perfil intempérico sobre a crosta laterítica matura do platô de N5 foi estudada por Horbe (1995), com ênfase para relação entre crosta/solo. O perfil foi dividido nos seguintes horizontes : crosta ferro-aluminosa, crosta parcial a totalmente desagregada e solo. Observou-se que os teores de Fe_2O_3 são mais elevados na crosta e decrescem para o solo. Os dados de Al_2O_3 , ao contrário, apresentam teores mais elevados no solo. Os padrões de distribuição para V, Cr, Ni, Mn e Cu mostram teores mais elevados no horizonte de crosta em relação ao de solo. Estes dados têm perfeita concordância com o comportamento observados nos perfis das áreas Guarujá, Jaca e Paulo Afonso.

Estudos geoquímicos sobre o perfil laterítico do depósito aurífero do Igarapé Bahia (Carajás) foram desenvolvidos por Angélica (1996). Neste trabalho, podemos observar a variação dos dados geoquímicos de alguns elementos nos horizontes de crosta laterítica e latossolo e comparar com os dados obtidos na crosta desmantelada e latossolo nas áreas Guarujá, Jaca e Paulo Afonso. O horizonte de crosta laterítica, no Igarapé Bahia, apresentou valores mais elevados em Fe, Pb, Cr, V, Cu e Ni e mais baixos de Al, Ti e Mn, quando comparados com o latossolo. Os resultados para Fe, Pb, Cr e V são perfeitamente compatíveis com os das três áreas trabalhadas, onde esses elementos apresentam um

enriquecimento na crosta desmantelada. Os resultados de Cu e Ni também são correlacionáveis, já que foi observado que existe uma tendência de diminuição dos valores desses elementos para o topo do perfil. Valores mais altos de Al no latossolo são, também, uma característica comum em todas as áreas trabalhadas. Existem, entretanto, discordâncias nos comportamentos de Ti e Mn. Os dados das três áreas trabalhadas evidenciam, sempre, um enriquecimento de Ti na crosta desmantelada (estilo 1). Para Mn existe uma tendência de queda nos valores para o topo do perfil (estilo 2). Deve-se considerar, entretanto, que, no Igarapé Bahia, os resultados de Mn nos gossans são, em geral, mais altos do que no latossolo.

Estudos sobre o desenvolvimento dos latossolos em diferentes perfis ou áreas na Amazônia, inclusive com sua relação com a crosta laterítica, foram desenvolvidos por Horbe e Costa (1996). Os autores relatam que da crosta laterítica em direção ao latossolo (topo do perfil) ocorre um processo de intensa desferrificação. A nível de elementos-traço, reporta-se que a transformação das crostas em matriz argilosa e finalmente em solo é acompanhada por uma diminuição de V, Cr, Ni, Cu, Mn e Pb. Estas informações coincidem, novamente, com os dados observados nas três áreas estudadas.

4.5.4 – Dados geoquímicos das áreas estudadas e evolução do perfil de intemperismo.

Os processos de intemperismo químico e físico, a formação de solo e o desenvolvimento do relevo estão essencialmente associados com a dispersão geoquímica secundária. Butt (1997) afirma que a distribuição dos elementos em regolitos profundamente intemperizados são determinados pela estabilidade dos seus minerais hospedeiros primários, a presença ou ausência de minerais hospedeiros secundários e pelas mobilidades químicas dos elementos submetidas as variações dos ambientes de intemperismo.

Thomas (1994) relata que íons liberados em reações de intemperismo ou temporariamente ligados dentro de complexos organo-metálicos podem ser liberados para o sistema com solutos em solos e sedimentos de corrente. Esses são, geralmente, os constituintes mais móveis das reações de intemperismo, tais como os cátions Na^+ , K^+ , (possivelmente Ca^{2+} , Mg^{2+}) e ânions incluindo Cl^- , SO_4^{2-} e NO_3^- . Outros elementos formam produtos amorfos, mas usualmente alteram para fases cristalinas que podem ser descritos

em termos de óxidos e hidróxidos (principalmente de Al e Fe) ou como minerais de argilas específicas. Butt (1997), descrevendo os processos de intemperismo no horizonte de saprolito inferior, mostra que a destruição de feldspatos e minerais ferromagnesianos leva a rápida lixiviação de Na, Ca e Sr, com Si e Al ficando retidos como caulinita ou argilas 2:1. Relata, ainda, que o Ba, comumente hospedado em feldspato, é liberado no início do intemperismo, mas pode ser reprecipitado como barita e permanecer dentro do regolito. O intemperismo de minerais ferromagnesianos menos estáveis (piroxênio, olivina, anfibólio, biotita) resulta na formação de óxidos e hidróxidos de Fe, retenção de elementos traços e menores como Ni, Co, Cu, Mn e Ni, e progressivamente perda de Mg e Si, exceto quando retidos em esmectitas (Mg, Si), caulinita (Si) ou quartzo (Si). Essas considerações explicam satisfatoriamente o comportamento geoquímico dos elementos Ca, Ba e Mg nos alvos Guarujá, Jaca e Paulo Afonso, que foram enquadrados dentro do estilo 2, caracterizados por valores mais elevados no horizonte de zona de transição. Como esses elementos estão, normalmente, dentre os primeiros a serem liberados no processo de intemperismo é de se esperar que suas maiores concentrações se encontrem na base do perfil laterítico.

Butt (1997) descreve que nas zonas mosqueadas e ferruginosas, a maioria dos minerais primários estão destruídos e que existe um domínio de Si, Al e Fe, residentes em caulinita, quartzo, óxidos de ferro (hematita e goethita) e, localmente, gibbsita. A distribuição de diversos elementos traços e menores seria controlada, segundo Butt (1997), pela presença desses elementos maiores. Sendo assim, Cr, As, Ga, Sc, V e, possivelmente, Au tendem a se acumular com óxidos de Fe no horizonte laterítico (*duricrust*). Segundo ainda Butt (1997), muitos dos elementos resistentes e imóveis, como Cr, Zr, Hf, Th, Nb, Ta, W, REE, Ti e V, tendem também a se concentrar na parte superior do perfil, dentro do horizonte laterítico ferruginoso. Essas informações servem para explicar, nas áreas aqui estudadas, o comportamento de boa parte dos elementos, como Fe, Cr, Ti, V e As, enquadrados dentro do estilo 1, que é caracterizado pelo, normalmente, nítido enriquecimento no horizonte de crosta desmantelada.

Lelong et al. (1976) fazem uma interessante revisão sobre os processos de concentração supergênica do Mn. Segundo esses autores este elemento e o ferro, elementos de transição, apresentam propriedades químicas similares, especialmente quando na forma de íons bivalentes, que é mais comum nas rochas. Como resultado dos processos

supergênicos (oxidação, hidratação, etc.), eles sofrem mudanças químicas e, normalmente, são redistribuídos no perfil de intemperismo. Então, em soluções aquosas, Fe e Mn mostram significativas diferenças no comportamento. Se o lixiviamento e transporte dos dois elementos ocorrem similarmente, o Eh em um dado pH deve ser mais alto para a deposição de Mn^{4+} do que para Fe^{3+} . No perfil laterítico, portanto, o Mn pode ser móvel nas partes superiores do perfil, onde o ambiente é suficientemente oxidante para favorecer a rápida precipitação de Fe. O Mn, portanto, pode ser carregado para baixo e acumular nas partes mais inferiores do perfil, ou ao longo de encostas, onde o pH é mais alto. Dentro deste escopo, o comportamento do Mn nas três áreas aqui trabalhadas mostra-se perfeitamente coerente, já que existe uma concentração maior deste elemento na base do perfil ou zona de transição.

Valores mais elevados de Al no horizonte superior de latossolo tem uma relação direta com uma maior concentração, neste horizonte, de minerais de alumínio (caulinita, gibbsita e Al-goethita). Horbe (1995) estudando os perfis de N5 e Igarapé Bahia postulou uma intensa desferriificação da crosta ferruginosa em direção ao topo do perfil. Este processo leva a um acréscimo linear no teor de Al_2O_3 no solo, traduzido pela dissolução de hematita, enriquecimento residual de gibbsita, devido a menor mobilidade do alumínio em relação ao ferro, e a neoformação de goethita e caulinita. Freyssinet (1998) afirma que na formação de *gravelly latosol*, em condições tropicais úmidas, a hematita é dissolvida ou rehidratada, e a caulinita sofre desferriificação, podendo ser parcialmente transformada em gibbsita.

O comportamento geoquímico ao longo do perfil de intemperismo mostra que, mesmo havendo um empobrecimento da maioria dos elementos no latossolo, este horizonte guarda características geoquímicas dos horizontes subjacentes (crosta desmantelada até saprolito). Favorecendo, então, para uma hipótese residual desta cobertura argilosa. Horbe & Costa (1996) afirmam que sobre a crosta se desenvolveu um novo perfil que, quando completo, grada desde uma crosta sã, passando para uma crosta intemperizada e solo. Segundo esses autores, nota-se da base para o topo, em um perfil completo, um processo crescente de fissuramento e fraturamento da crosta que leva ao aumento de sua porosidade, proporcionando maior percolação de soluções que intensificam sua degradação. O processo evolui formando nódulos de córtex que são gradativamente cominuídos até seu total

desaparecimento. Ao longo de fraturas e fissuras, ocorreria a neoformação de um material argiloso a areno-argiloso que tenderia a predominar em relação aos relictos até formar o solo do topo do perfil, em um típico processo residual.

4.5.5 – Mapas geoquímicos. Implicações na exploração geoquímica

O comportamento heterogêneo dos elementos ao longo do perfil de intemperismo tem, evidentemente, implicações diretas e importantes em todas as fases de um programa de exploração. Efetuou-se, aqui, amostragem em três horizontes principais de intemperismo: zona de transição (ZT), zona de concreções / crosta desmantelada (CD) e latossolo (LS). O comportamento mais comuns nos elementos, nesses 3 horizontes, seria alguns elementos apresentarem claras diferenças nos três meios amostrais ou mostrarem um valor nitidamente mais alto ou baixo em um horizonte e resultados relativamente similares nos outros dois. Uma consequência direta destes comportamentos é a possibilidade comum de um elemento apresentar diferentes escalas de *background* e *thresholds* nos três ou, em pelo menos, dois horizontes. Isto implica que um mesmo elemento pode apresentar distintas populações geoquímicas que devem ser consideradas no processo de confecção e interpretação de mapas geoquímicos.

A figura 4.7 mostra quatro diagramas de correlações envolvendo amostras de superfície da área Jaca e procura ilustrar algumas diferenças de comportamento geoquímico, ao longo do perfil, comentado no parágrafo anterior. A figura 4.7 (a) visualiza a correlação entre Fe x Mn. Para o Fe, observa-se um valores nitidamente mais alto na crosta desmantelada e relativamente semelhantes nos outros dois horizontes, com resultados discretamente mais elevados no horizonte de latossolo. Para Mn, pode-se constatar uma concentração de resultados mais altos na zona de transição e relativamente similares nos outros horizontes, tendo, entretanto, a crosta desmantelada valores discretamente mais elevados do que o latossolo. A figura 4.7 (b) mostra a correlação Fe x Al. O alumínio mostra valores claramente mais altos no horizonte de latossolo, decrescendo em direção a crosta desmantelada e, daí, para a zona de transição, o que evidencia a separação de três populações geoquímicas. A figura 4.7 (c) mostra o diagrama de correlação entre Fe x Cr. Esses dois elementos apresentam uma correlação bastante positiva, evidenciando comportamentos idênticos ao longo do perfil de intemperismo

(estilo 1). A figura 4.7 (d) apresenta a correlação Al x Mn, onde fica constatado o comportamento discordante desses dois elementos ao longo do perfil de intemperismo, com o Mn tendo valores crescentes para a base do perfil e o Al mostrando um aumento dos valores em direção ao topo.

Do que foi discutido acima, desprende-se que, na confecção e interpretação dos dados geoquímicos de uma área, é fundamental um entendimento do tipo de material que está sendo coletado ou, em outras palavras, é essencial o conhecimento do sistema composto pelos horizontes regolíticos e os regimes geomorfológicos. Serão apresentados, a seguir, alguns mapas geoquímicos da área Jaca que servirão de base para a discussão dessas questões.

A figura 4.8 apresenta o mapa geoquímico de Mn da área Jaca, tendo ao fundo as divisões dos horizontes de regolitos / regimes geomorfológicos. Os resultados geoquímicos das amostras dos horizontes de latossolo e zona de transição foram tratados conjuntamente, como uma única população estatística. e os valores divididos em cinco faixas de teores: 0 a 50 ppm; 50 a 200 ppm; 200 a 800 ppm; 800 a 2000 ppm e 2000 a 6295 ppm. As amostras da crosta desmantelada não foram, aqui, consideradas. Os dados foram gridados no software Oasis montaj. Pode-se observar, então, que os valores mais elevados de Mn (acima de 200 ppm) ocorrem exclusivamente na zona de transição e que nos locais de coleta de latossolo os resultados de Mn são, invariavelmente, baixos (< 200 ppm). Este mapa reflete, a princípio, as variações do comportamento do Mn nesses dois horizontes maiores de regolitos, com decréscimo dos valores para o topo do perfil de intemperismo, e evidencia a necessidade de tratamentos estatísticos para cada uma desses horizontes. É interessante observar, ainda, que no latossolo, no regime de platô, há porções com valores levemente mais altos de Mn (entre 50 a 200 ppm), localizados onde este horizonte é menos espesso (latossolo + crosta desmantelada) e valores constantemente baixos (< 50 ppm) nas faixas onde não afloram blocos da crosta desmantelada e o latossolo é, conseqüentemente, mais espesso. Este fato é importante, implicando na provável necessidade de mapeamento e amostragem mais criteriosos no horizonte de latossolo, já que existe a possibilidade de variações nos valores de background com o aprofundamento deste horizonte.

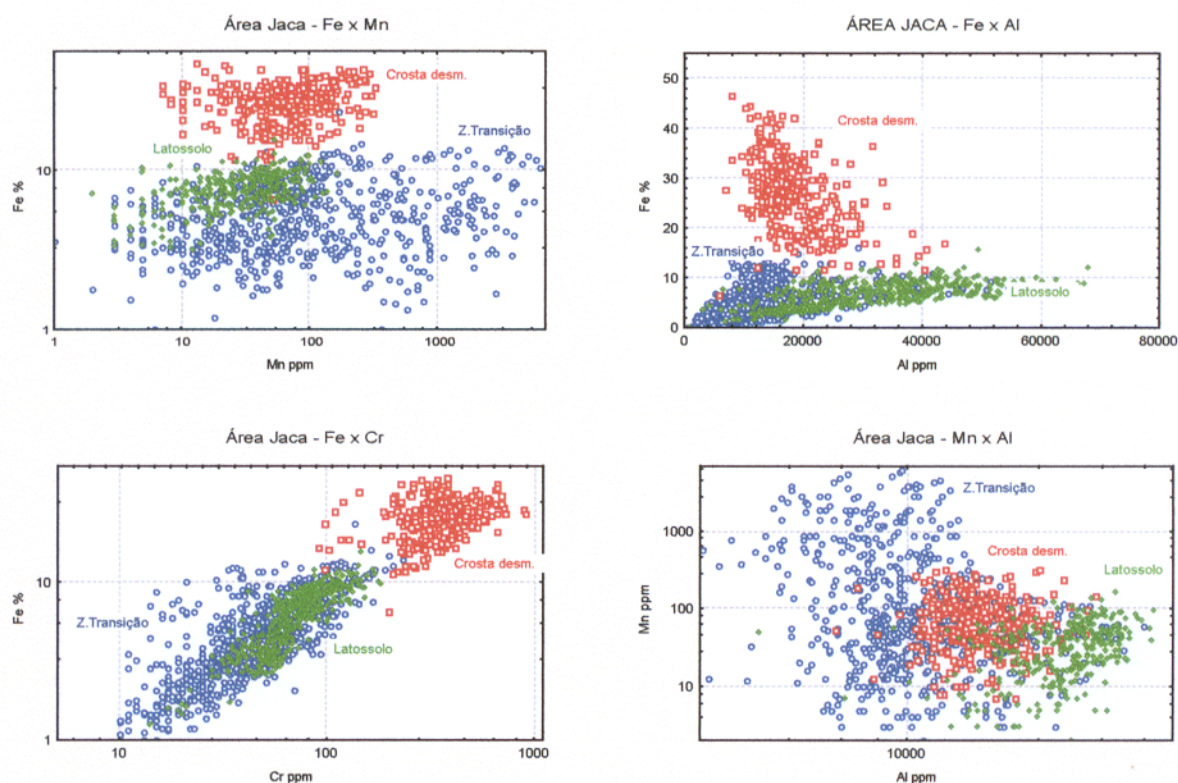


Figura 4.7 – Diagramas de correlações. Área Jaca

A figura 4.9 apresenta o mapa geoquímico para Al da área Jaca. Foram tratados, novamente, apenas amostras dos horizontes de latossolo e zona de transição e tratadas como uma única população estatística. Os dados analíticos foram divididos em cinco classes: 0 a 8000 ppm; 8000 a 18000 ppm; 18000 a 30000 ppm; 30000 a 45000 ppm e 45000 a 67952 ppm. Este mapa separa, novamente, os dois horizontes regolíticos trabalhados. Valores mais elevados de Al ocorrem quase que exclusivamente nos locais de afloramento de latossolos, enquanto que na zona de transição, especialmente no regime de encosta forte, os resultados são sempre baixos. Mais uma vez demonstra-se a necessidade de tratamento estatístico individualizado para cada meio amostral.

As figuras 4.10 e 4.11 representam mapas geoquímicos de cromo na área Jaca. Na figura 4.10 estão lançados os resultados de amostras de superfície dos horizontes de latossolo e zona de transição, tratadas como uma única população. Foram individualizadas cinco classes de valores: 0 a 30 ppm; 30 a 60 ppm; 60 a 100 ppm; 100 a 150 ppm e 150 a

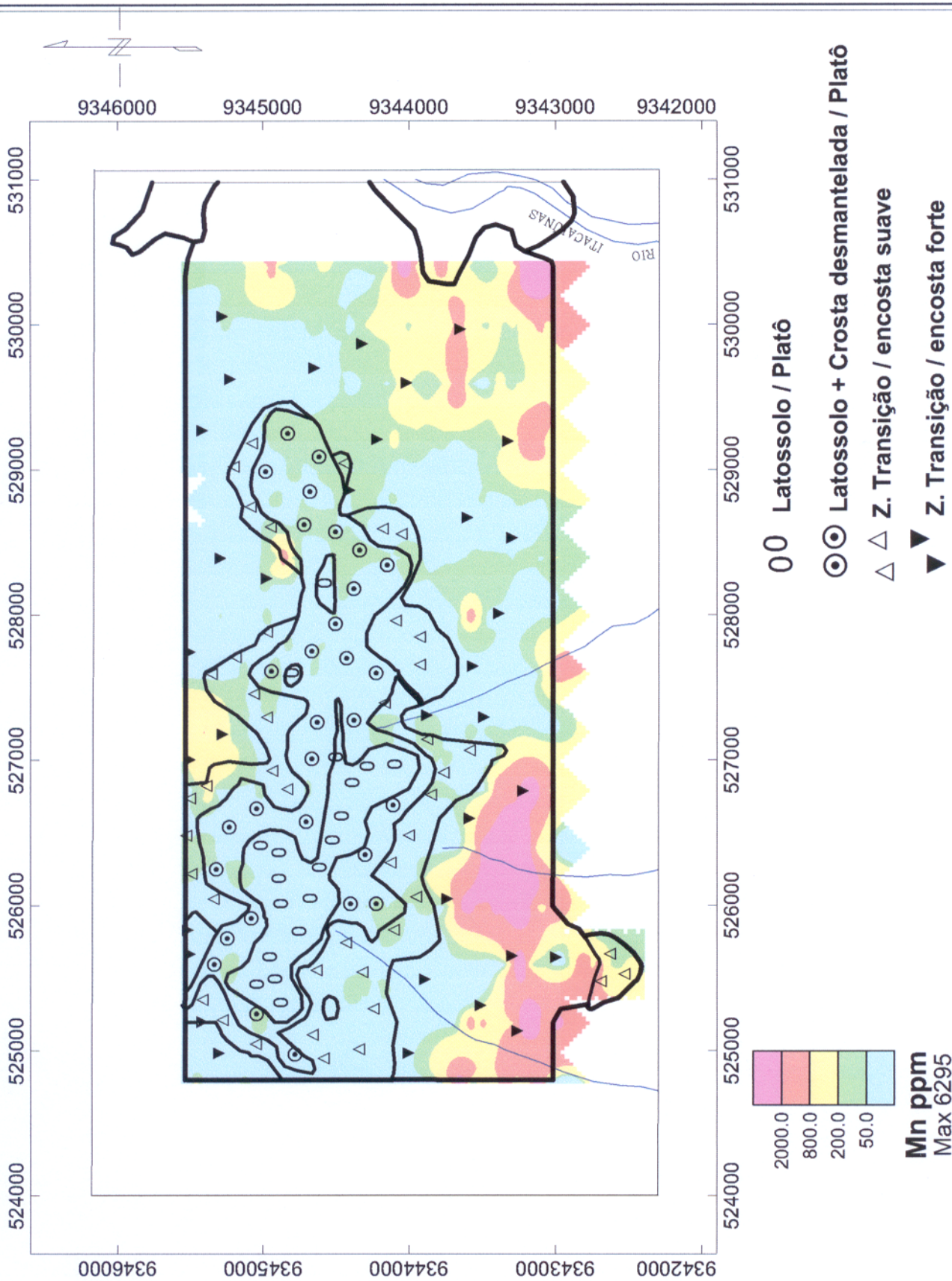


Figura 4.8 - Mapa geoquímico de Mn da área Jaca (zona de transição e latossolo)

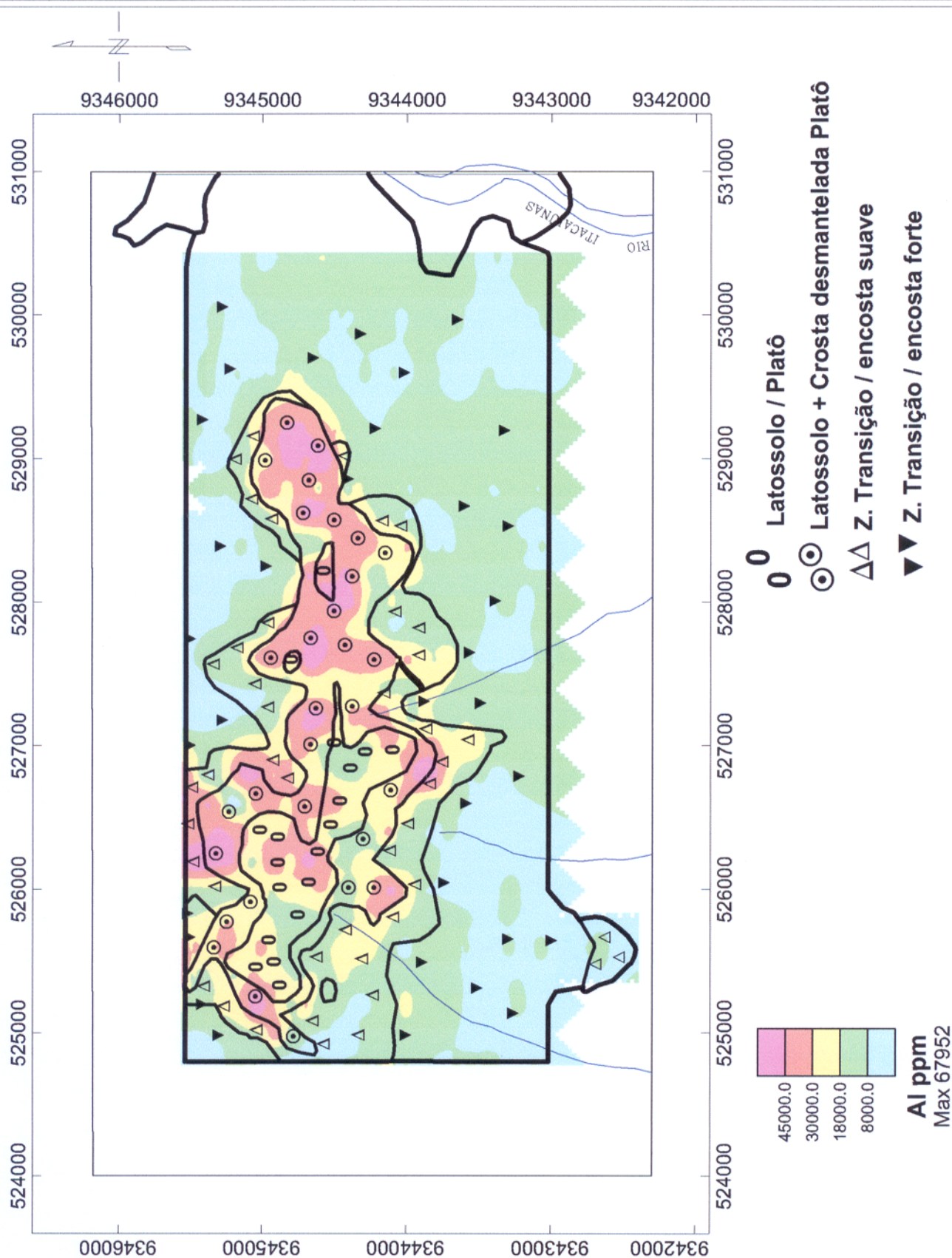


Figura 4.9 - Mapa geoquímico de Al da área Jaca (zona de transição e latossolo)

239 ppm. O comportamento do Cr no perfil de intemperismo (estilo 1) mostra valores relativamente similares para os horizontes de zona de transição e latossolo, com valores médios relativamente mais altos para o horizonte mais superior. Esta pequena diferença é sutilmente percebida em mapa, onde se observa uma maior concentração de resultados mais alto sobre os latossolos. Por outro lado, a pequena diferença entre os valores médios dos dois horizontes trabalhados, permite uma análise mais segura dos dados geoquímicos. *Trends* anômalos de Cr, por exemplo, com direção NS correspondem a diques básicos cortando rochas metassedimentares. A figura 4.11 corresponde ao mesmo mapa anterior onde foram acrescidos símbolos (pequenos quadrados) com os valores de amostras da crosta desmantelada. Foi mantida, para comparação, a mesma divisão de classe do exemplo anterior. A grande maioria dos resultados de Cr da crosta desmantelada se posicionam dentro da classe de valores mais altos (> 150 ppm). Isto se deve, evidentemente, ao comportamento do cromo no perfil de intemperismo que possui um forte enriquecimento na crosta desmantelada. Este exercício comprova, mais uma vez, a importância de se definir o tipo de amostra que está sendo coletada (mapeamento de regolito) e a necessidade de um tratamento estatístico diferenciado para populações ou meios amostrais distintos.

A partir das discussões apresentadas, pode-se enumerar alguns aspectos a serem considerados no planejamento e execução de um programa de exploração geoquímica de solos:

- a) O mapeamento de regolitos é de fundamental importância, como um critério de individualização de possíveis populações geoquímicas distintas.
- b) A delimitação de regimes geomorfológicos torna-se capital na caracterização do material amostrado quanto ao aspecto residual, semi-residual ou transportado.
- c) O entendimento do comportamento geoquímico do elemento-alvo ao longo do perfil de intemperismo, pode permitir a seleção do meio amostral ideal para este elemento, levando-se em conta questões como background e contrastes geoquímicos.
- d) Na impossibilidade de se coletar um único meio amostral, é recomendável fazer um tratamento estatístico diferenciado para cada população trabalhada. Salienta-se, entretanto, que existem casos que um horizonte regolítico pode se tornar um sítio de amostragem inviável devido a uma grande homogeneização de valores (falta de contraste) ou devido a um empobrecimento acentuado dos resultados geoquímicos.

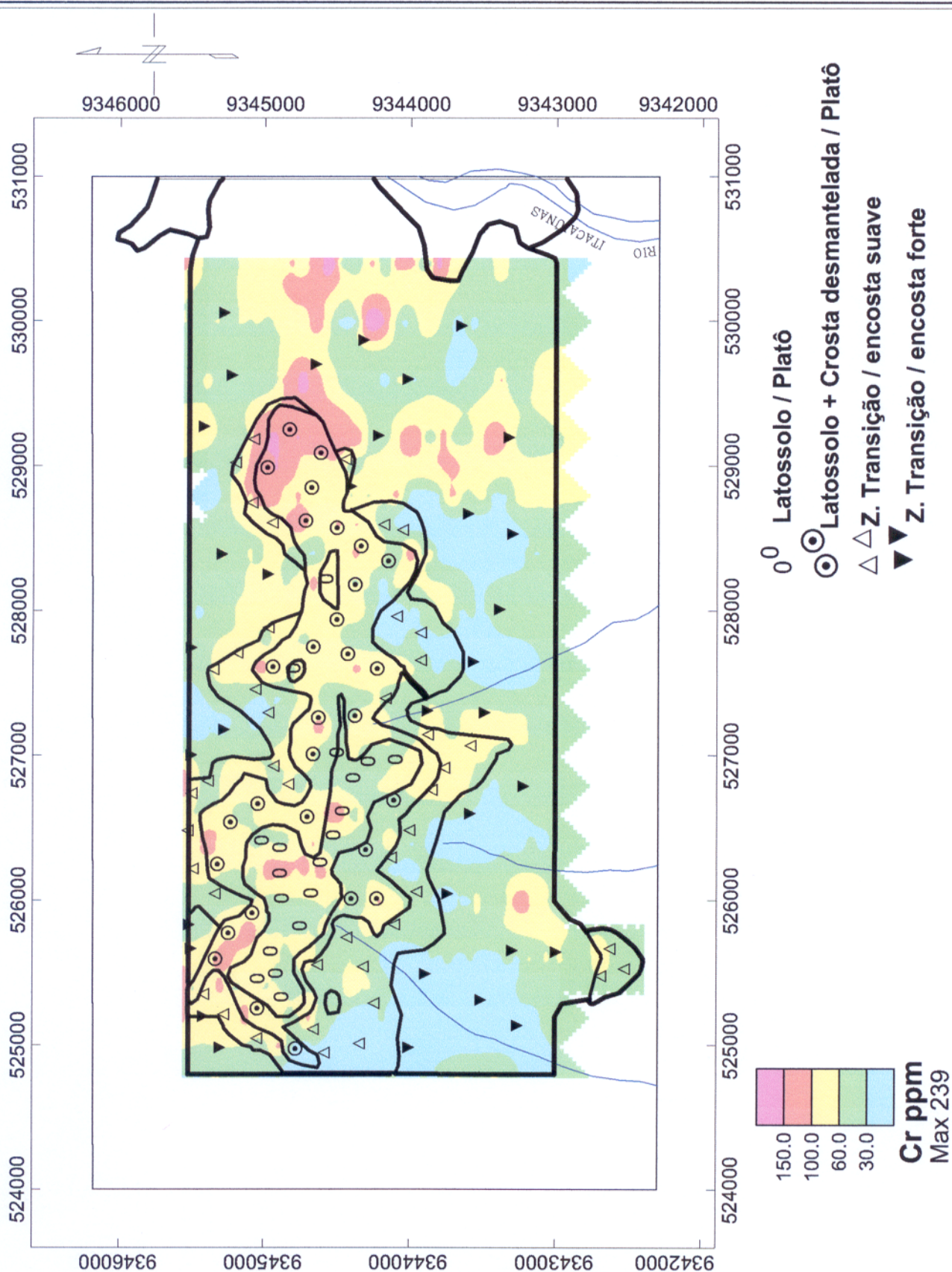


Figura 4.10 - Mapa geoquímico de Cr da área Jaca (zona de transição e latossolo)

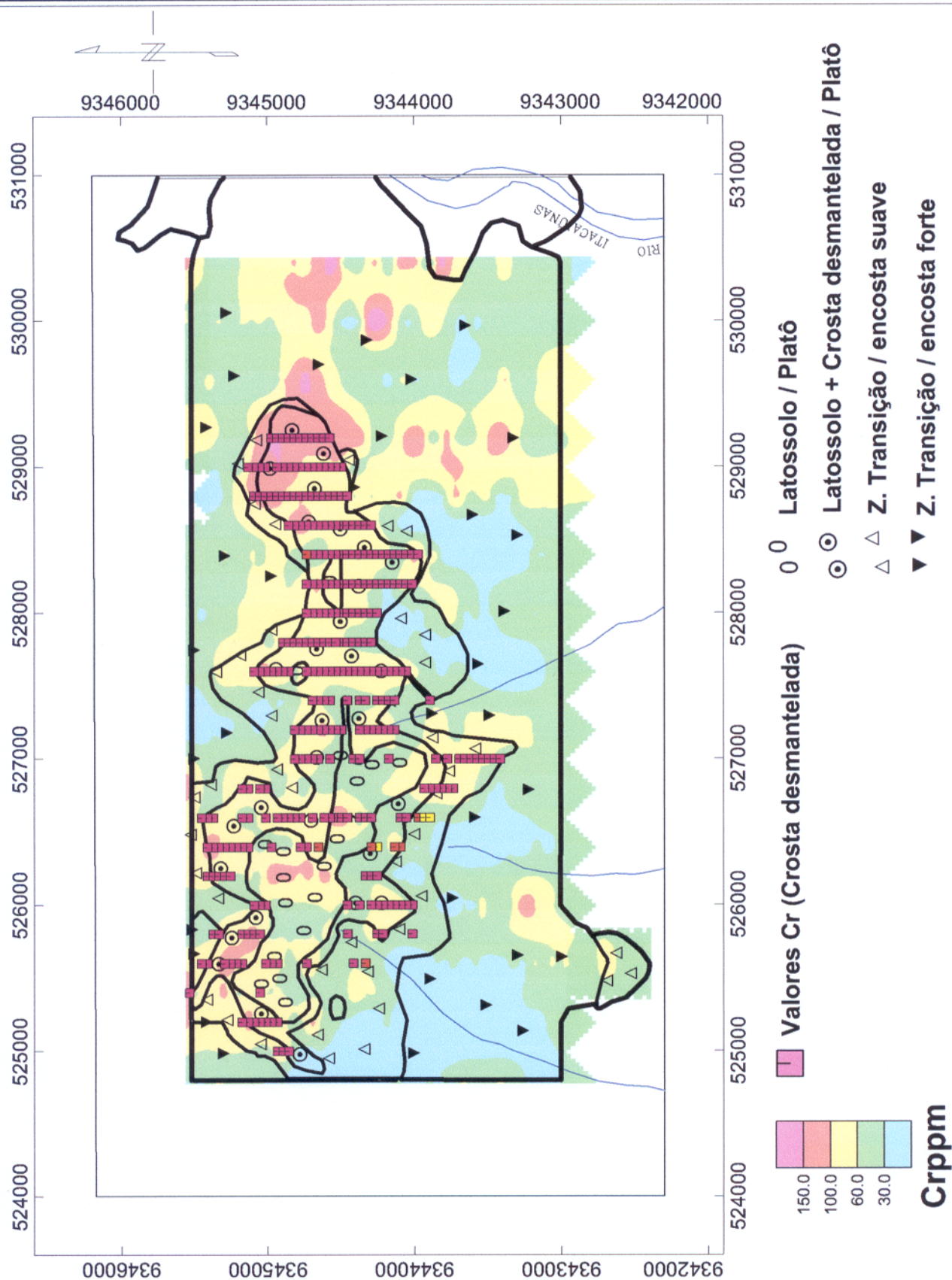


Figura 4.11 - Mapa geoquímico de Cr da área Jaca (zona de transição, latossolo e crosta desmantelada)

5 – EVOLUÇÃO DA PAISAGEM

5.1 – INTRODUÇÃO

A busca do entendimento da evolução do relevo de uma região é de imensurável importância, na medida que vai refletir no conhecimento mais aprofundado da história do intemperismo e do desenvolvimento e caracterização dos perfis lateríticos presentes. Na formulação de modelos e propostas, diversos aspectos devem ser analisados, já que influenciam diretamente ou são guias decisivos para o esclarecimento deste quadro evolutivo. Entre esses fatores, que normalmente estão interrelacionados, podem ser citados: a história climática, quadro geomorfológico atual, a caracterização e classificação dos perfis lateríticos, neotectônica e a geocronologia de intemperismo. Os trabalhos sobre esse assunto, na região de Carajás, são, ainda, em número reduzido e insuficientes. Um amplo leque de pesquisas científicas se faz necessário e devem ser desenvolvidas na geração de uma base de dados e conhecimentos que permitam a elaboração de modelos mais seguros da evolução da paisagem desta região. Este capítulo procura discutir aspectos da evolução da paisagem em Carajás, tendo como base, principalmente, trabalhos de pesquisa anteriores, além de observações adquiridas ao longo deste trabalho, inclusive aquelas provenientes de mapeamento de perfis regionais.

O clima tem função determinante nos processos de intemperismo e erosão, bem como na expressão do perfil de intemperismo e formas de relevos. Butt & Zeegers (1992) relatam que o clima tem variado, às vezes profundamente, durante o tempo geológico, o que leva a atuação de uma série de diferentes processos de intemperismo e dispersão. Esses processos estariam registrados como regolitos e formas de relevos que não estariam em equilíbrio com as condições atuais. Em geral, apenas os episódios climáticos mais atuais ou aqueles antigos mais expressivos permitiriam deixar registros pedológicos ou geomorfológicos significativos. Nas altas latitudes, segundo ainda esses autores, que apresentam atualmente climas, em geral, temperados, esses registros estariam evidenciados pelos efeitos da glaciação do Pleistoceno. Por outro lado, nas regiões tropicais e subtropicais, particularmente em áreas continentais de baixa altitude, os regolitos e formas de relevos seriam uma expressão dos efeitos cumulativos do intemperismo subaéreo que pode ter continuado por dezenas ou centenas de milhões de anos. A história da evolução do

intemperismo apresenta, portanto, uma relação direta com a análise geomorfológica e dos regolitos associados.

Thomas (1994) discute a evolução da paisagem no período de 10^8 anos e reporta que apesar de datações do Proterozóico (700 Ma) em regolitos da Austrália, a maioria das regiões tropicais úmidas mostra registros de formas relevos como produtos de processos de intemperismo que ocorreram nos últimos 100 – 140 Ma. Relata, ainda, que realmente a grande parte da paisagem que deriva da Era Mesozóica tem permanecido inalterada e, mesmo onde existem marcadores de expressivos platôs, suas superfícies e depósitos contém registros das muitas mudanças do ambiente.

5.2 – CLIMA DE CARAJÁS

O clima em Carajás é do tipo tropical úmido, caracterizado por precipitações sazonais, com uma estação úmida de novembro a maio e uma estação seca de junho a outubro. A umidade relativa da região apresenta valores elevados, com média anual de cerca de 76 % . A temperatura média anual é de cerca de 26°C, com máximas ocorrendo de agosto a setembro.

Dados coletados em estação meteorológica da CVRD, em Carajás, abrangendo os anos de 1968 a 2000, indicam uma média anual de precipitação pluviométrica de 1881 mm. A Fig. 5.1 apresenta as médias anuais de chuvas para este período estudado, na qual se pode observar que o recorde máximo de precipitação ocorreu em 1973, com mais de 3000 mm, enquanto o ano com menor registro de chuvas foi em 1998 com menos do que 1400 mm. A Fig. 5.2 mostra as médias mensais de precipitação pluvial, entre os anos de 1968 e 2000. Verifica-se que os quatro primeiros meses do ano (janeiro a abril) são caracteristicamente mais chuvosos, com médias acima de 250 mm, enquanto os meses de junho a agosto são tipicamente mais secos com médias inferiores a 50 mm.

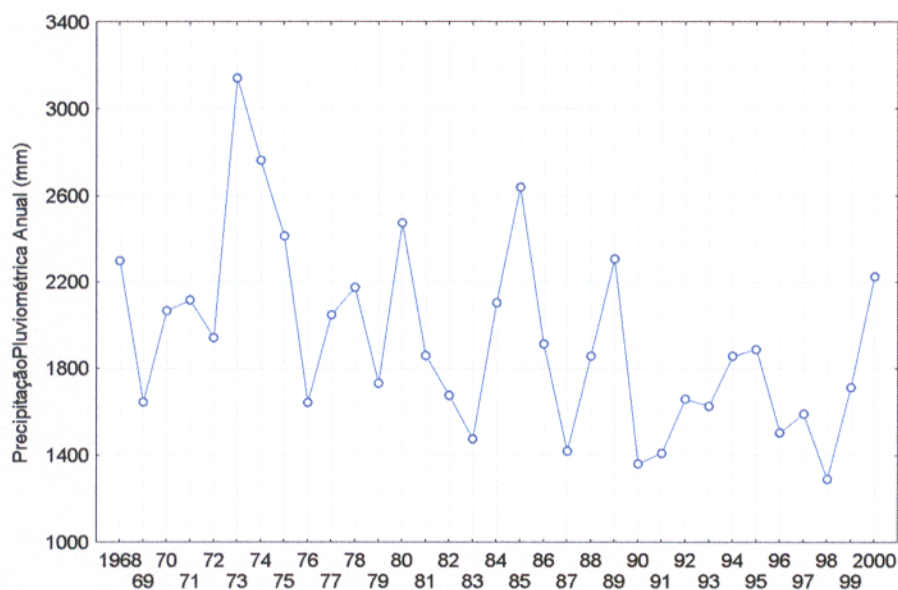


Figura 5.1 – Precipitações pluviométricas anuais em Carajás, no período de 1968 a 2000.

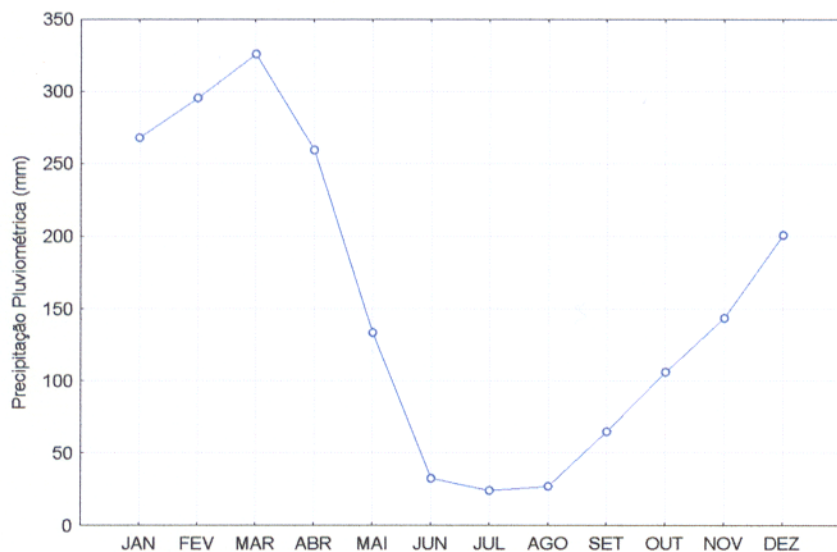


Figura 5.2 – Precipitações pluviométricas médias mensais em Carajás, compreendendo o período de 1968 a 2000.

Na Fig. 5.3 estão plotadas as médias pluviométricas, em Carajás, divididos em intervalos a cada três anos, registrados a partir do ano de 1968 até o ano 2000. O gráfico mostra uma tendência nítida de queda na quantidade de chuvas, acentuada a partir do triênio 86-88. O diminuto espaço de tempo de dados registrados impede, evidentemente, uma análise mais aprofundada sobre a questão. Esta tendência pode corresponder a fatores

meramente cíclicos, mas é sugestivo observar que a queda mais acentuada no regime de chuvas coincide com o incremento do desmatamento e queimadas na região, a partir da década de 80.

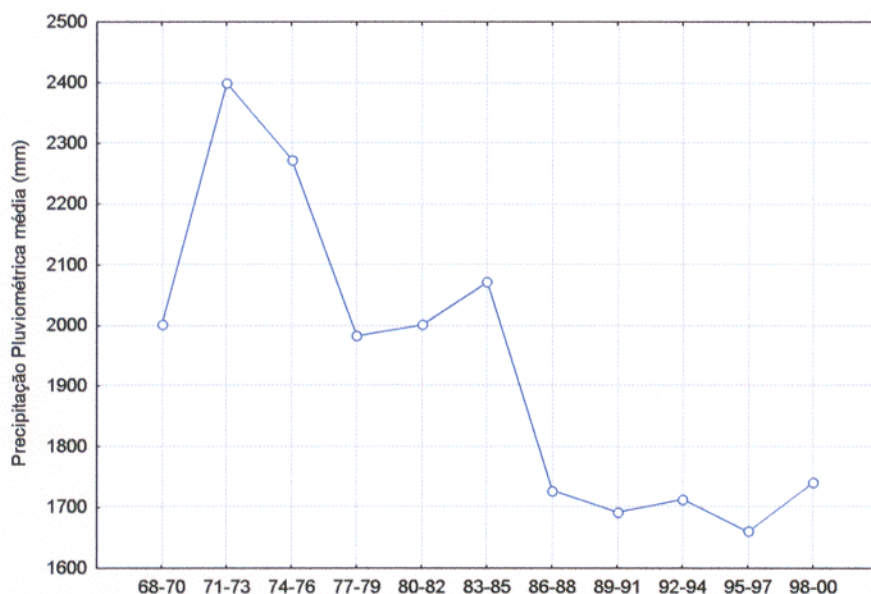


Figura 5.3 – Precipitações pluviométricas médias, em Carajás, a cada três anos, a partir de 1968 até 2000.

5.3 - PALEOCLIMA

5.3.1 – Introdução

O fator clima influencia decididamente na dispersão geoquímica dos elementos, no desenvolvimento do intemperismo, formação de solos e da paisagem. Em climas tropicais úmidos a quantidade de água percolando através dos regolitos é considerável, em torno de 600 mm/ano (Lucas & Chauvel, 1992), e o intemperismo atinge grandes profundidades. Em regiões áridas e semi-áridas, o processo erosional aumenta e o processo de intemperismo é bem menos intenso. Tardy et al.(1991) afirmam que a temperatura, umidade relativa da atmosfera e a atividade de água são os principais parâmetros climáticos e termodinâmicos que controlam os mecanismos de formação, os processos de evolução e a distribuição de bauxitas e ferricretes. Salientam, ainda, que a composição mineralógica e distribuição geográfica das bauxitas e ferricretes são controlados pelos diferentes climas atuais e, principalmente, pela sucessão de paleoclimas durante os últimos 150 milhões de

anos. Então, o intemperismo, laterítico ou não, depende essencialmente do clima, atual e passado, e para se entender a formação desses perfis e, conseqüentemente, da evolução da paisagem é importante estudar a história do clima tanto na forma global, como especificamente na área estudada. Como já relatado anteriormente (Thomas, 1994), nas regiões tropicais úmidas, a evolução do perfil lateríticos e o registro de formas de relevo são produtos de intemperismo desenvolvidos entre o final do Mesozóico e o presente. A caracterização do clima neste período, em escala global, será brevemente apresentada a seguir com base nos trabalhos de Crowley & North (1991) e Thomas (1994).

5.3.2 – Mesozóico

Uma das conclusões paleoclimáticas mais importantes, baseadas em estudos dos registros geológicos, é de que certos períodos da história da terra foram substancialmente mais quentes do que o presente. Neste sentido, o Cretáceo médio, 120 – 90 Ma, representa um dos últimos episódios em que existem evidências de um clima mais quente e quase sem a presença de gelo.

Qualquer discussão do paleoambiente do Cretáceo requer, inicialmente, uma descrição da distribuição terra-mar, que foi marcadamente diferente do presente. A América do Norte estava conectada a Europa, bem como a América do Sul à África e a Austrália à Antártica. A Índia era uma ilha e o nível do mar estava 100 a 200 m mais elevado do que o atual e cobria 20 % da área continental. Essa conformação pode ter favorecido a denudação nos continentes, como uma conseqüência de falhamentos nas margens continentais.

No final do Cretáceo, a abertura do Atlântico Norte e Sul continuou, depois do *rifting* inicial do Jurássico. O movimento das Américas para oeste provocou uma convergência de placas e a conseqüente formação das cadeias da Cordilheira dos Andes. Da mesma forma, as convergências da África contra a Europa e da Arábia e da Índia contra a Ásia levaram a formação dos Alpes e do Himalaia. Mudanças na circulação da atmosfera e oceanos podem ter ocorrido no Cretáceo Superior, e condições de clima tropical úmido foram estabelecidas na África e América do Sul. As condições climáticas mais quente neste período podem ser explicadas pelas mudanças na distribuição terra-mar, mudanças no transporte de calor dos oceanos e pelas concentrações mais altas de CO₂ na atmosfera.

A passagem do Mesozóico para o Cenozóico coincide com um dos mais extraordinários eventos da história da terra ocorreu ao final do Cretáceo e corresponde a extinção de cerca de 75 % de todas as espécies vivas, provocado, possivelmente, pela queda de um asteróide com aproximadamente 10 km de diâmetro. Este evento foi usado, também, para definir o fim de uma era geológica, marcando o limite Cretáceo / Terciário. As consequências ambientais deste impacto foram muito fortes. Cálculos recentes sugerem que mudanças químicas podem ter sido mais extremas do que os efeitos climáticos.

5.3.3 – Cenozóico

A temperatura do Cretáceo Superior, embora seja mais fria do que o máximo termal do Cretáceo Médio (120 – 90 Ma), permanece com valores altos até o início do Cenozóico, no Paleoceno e no Eoceno (65 – 40 Ma). No Eoceno Inferior (55 – 50 Ma) foi registrado o período mais quente dentro do Cenozóico. Crostas lateríticas, que são indicativas de clima quente com chuvas sazonais, estenderam-se a até 45° de latitude nos dois hemisférios. Este e outros indícios sugerem que as condições tropicais se estenderam por mais 10° a 15° de latitude, no sentido dos pólos, em relação aos limites atuais.

O Oligoceno (35-25 Ma) tem sido considerado uma transição entre os períodos quentes do Cenozóico Inferior para os de clima frio do Cenozóico Superior. Após o máximo termal do Eoceno Inferior, registrou-se um significativo resfriamento abrangendo um intervalo de 40 – 50 Ma. Erosão das margens continentais e significativa queda do nível do mar, ocorrida em torno de 31-29 Ma estão associados com evidências diretas da expansão da cobertura de gelo da Antártica.

No Mioceno Inferior houve um novo período de aquecimento, seguido por uma outra significativa mudança no clima que ocorreu no Mioceno Médio, entre 15-10 Ma.. Um aumento de $\delta^{18}\text{O}$ em 15-14 Ma tem sido descrito como um evento de esfriamento da água do mar com algum crescimento do volume de gelo. Expansão do gelo da Antártica pode ter causado a queda do nível do mar em 11-10 Ma. Variações mais fortes, a partir daí, nos registros de $\delta^{18}\text{O}$ são consistentes com flutuações do volume de gelo desde o Mioceno Médio. Decréscimo de $\delta^{18}\text{O}$ no Pacífico de baixa latitude têm sido interpretado como um aquecimento das regiões tropicais, ao mesmo tempo que o gelo acumulava em altas latitudes, acentuando o gradiente zonal de temperatura nos oceanos. Existem algumas

variações climáticas de considerável interesse que ocorreram no final do Mioceno e início do Plioceno. No final do Mioceno (5-7 Ma), o gelo da Antártica pode ter tido dimensões até 50 % superiores às atuais. Essa suposta expansão do gelo da Antártica no limite Mioceno-Plioceno foi acompanhada por um abaixamento do nível do mar de aproximadamente 50 m. Essa teoria é acompanhada da hipótese de que nessa ocasião houve o fechamento dos mares do Japão e Mediterrâneo.

Ocorreu, no Terciário Superior, um significativo aumento da aridez. Houve um incremento dos depósitos eólicos. Na Austrália, houve uma forte transição de amplas floresta tropicais no Mioceno para assembléias de plantas com abundância de relvas e gramas, coincidindo com o aumento da população de herbívoros, tipo cangurus. No este da África, plantas fósseis indicam a expressiva expansão de savanas.

A evolução de longo prazo do clima Terciário é caracterizada, portanto, pela tendência geral de esfriamento, passando do calor do Cretáceo e do início do Cenozóico para o frio do Plioceno, com um aumento da aridez acompanhando o frio.

As explicações para o esfriamento do Terciário são incompletas. As mudanças na localização dos continentes (movimento das placas) devem ter colaborado mas não explicam tudo. As concentrações de CO₂, que servem para explicar as mudanças do clima do Cretáceo, não parecem ter tido papel tão importante no Terciário. As mudanças orográficas e os movimentos de correntes oceânicas para transporte de calor podem ter colaborado.

No Quaternário, as regiões tropicais, de um modo geral, passaram a experimentar ciclos alternados de climas úmidos e áridos de menor duração do que no Terciário, com o predomínio de condições úmidas. Registros de diversas naturezas indicam a seguinte tentativa cronológica : 80000 a 63000 BP – indicações de condições mais seca e fria; 63000(?) a 52000 BP – registros esparsos de sedimentação indicando rápido aquecimento; 40000 BP – esfriamento, tornando clima mais seco; >32000 a 22000/20000 – condições mais frias, provavelmente úmido a sub-úmido; pós 22000 a 13000/12000 – condições frias nas terras altas e secas na maioria das terras baixas, redução de cerca de 50 % da precipitação pluviométrica; 12500 a 11000 – aquecimento rápido com instabilidade climática e chuvas intensas prolongadas, níveis de lagos muito alto; 11000 a 10500 - intervalo frio e seco, baixos níveis de lagos; 10500 a 8000 – período úmido com níveis

altos de lagos, retomada de florestas; 7800 a 7000 – redução nos níveis de lagos; 7000 a 5000 – incremento na umidade e discreto aumento nos níveis de lagos; 5000 /4500 a 3000 – fase seca do Holoceno Médio, provavelmente com forte intensidade; pós 3000 – aumento na umidade nas florestas tropicais, mas com concomitante desmatamento e ocupação humana.

Mapas paleogeográficos dos últimos 100 M.a., apresentam propostas de reconstruções do arranjo dos continentes e as prováveis distribuições das principais zonas climáticas da terra. Tardy et al. (1991) relatam que durante o Jurássico, o equador estava posicionado próximo a atual Mauritânia e Egito na África, e na extremidade norte da América do Sul. A maior parte do escudo Brasileiro encontrava-se sujeito a climas áridos. Durante os tempos Cretáceo e Cenozóico ocorreu um deslocamento para norte dos dois continentes, além de uma lenta rotação na África. Registram-se, portanto, a partir especialmente do Cretáceo Superior, diversos períodos de climas equatoriais, com alta taxa de precipitação pluviométrica, afetando a região Amazônica e em porções da África. Na região Amazônica estão evidenciados períodos de clima equatorial no Cretáceo Superior (70 M.a.); Eoceno Médio (50 M.a.); Mioceno Médio (15 M.a.) e Recente.

5.4 – GEOCRONOLOGIA DE INTEMPERISMO

5.4.1 – Introdução

O entendimento do desenvolvimento, no tempo, dos registros regolíticos é fundamental no estudo da história do relevo de uma região. Informações sobre datações de episódios de intemperismo em Carajás e Escudo das Guianas são apresentadas a seguir. Os dados de Carajás correspondem a datações pelos métodos K-Ar e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, obtidas, principalmente, dos trabalhos de Vasconcelos (1992), Vasconcelos et al. (1993) e Vasconcelos (1996). As informações sobre o Escudo das Guianas são compiladas, especialmente, da pesquisa sobre paleomagnetismo de Théveniaut & Freyssinet (2001).

5.4.2 – Datação por K-Ar e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

Perfis de intemperismo profundos foram sempre considerados potencialmente úteis para registro de tempo para eventos paleoclimáticos, mas a avaliação temporal do

desenvolvimento desse perfis era prejudicada pela ausência de técnicas confiáveis de datação. Técnicas geocronológicas para datações absolutas do intemperismo começaram a ser, recentemente, mais utilizadas (Vasconcelos et al, 1992; Vasconcelos, 1992; Vasconcelos, 1996). Estudos sobre a região de Carajás estão reportados nos trabalhos de Vasconcelos (1992), Vasconcelos et al. (1993) e Vasconcelos (1996), que servem de base para as informações descritas a seguir, neste item.

Os métodos K-Ar e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ têm sido aplicados ao estudo de minerais formados durante o intemperismo. Avanços no método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, permitindo uma maior resolução espacial através de aplicação de raio laser, facilitaram a datação de minerais formados pelo intemperismo. Os minerais supergênicos mais apropriados à datação por esses métodos são os sulfatos do grupo alunita e óxidos de Mn do grupo da holandita (holandita, criptomelana, coronadita, etc.). Os minerais do grupo da holandita são comuns na Amazônia, ocorrendo em abundância nos depósitos do Azul, N4E, Salobo, Sereno, Igarapé Bahia, Serra Pelada, Cumaru, Serra do Navio, etc. Minerais deste grupo, oriundos de vários depósitos, foram datados por Vasconcelos (1996).

Vasconcelos et al. (1993) sugerem, para Carajás, um forte controle orgânico no comportamento geoquímico do manganês e postulam que os eventos de dissolução e reprecipitação de manganês medidos nos perfis de intemperismo de Carajás, registram períodos em que quantidades significativas de componentes orgânicos estavam presentes nas soluções de intemperismo. Esses eventos de dissolução e reprecipitação de óxidos de manganês indicam, portanto, períodos em que Carajás estava coberta por abundante vegetação e, provavelmente, com condições de clima úmido e quente.

Vasconcelos (1996) sintetiza os dados de análises obtidos em Carajás. Foram identificados os seguintes períodos mais propícios ao avanço do intemperismo na região : 70-65 Ma; 55-50 Ma; 44-40 Ma; 25 Ma; 20-12 Ma, e o recente (250 ka – presente). Os resultados das datações, dados de campo e análises geoquímicas indicam que os perfis lateríticos presentes nos topos e flancos dos platôs da Serra de Carajás estão expostos aos processos de intemperismo desde o final do Cretáceo.

Final do Cretáceo – Os resultados obtidos indicam que as idades de intemperismo variam de 70 a 65 Ma. A ausência de óxidos de Mn anteriores a 70 Ma sugere que os mantos intemperizados mais antigos foram erodidos antes do final do Cretáceo ou que o

intemperismo no final do Cretáceo foi suficientemente intenso para causar a recristalização de minerais supergênicos previamente precipitados. Este evento de intemperismo foi intenso e abrangente (identificado na mina do Azul, em Serra Pelada e Sereno) e pode estar associado aos eventos drásticos que caracterizam a transição Cretácio-Terciário.

Eoceno – Um intemperismo intenso ocorreu no início do Eoceno (55-50 Ma) causou a recristalização de parte dos óxidos de Mn previamente formados e a nova geração de óxidos de Mn associada com este evento. Este período é associado com climas quentes a temperados e úmidos em altas latitudes, identificando um provável aquecimento da Terra nesta época. Estudos de sedimentologia e palinologia nas Bacias do Marajó e Parnaíba indicam níveis do mar altos e climas quentes e úmidos na região. O intemperismo que ocorreu a 44-40 Ma (Eoceno Inferior) causou a recristalização de óxidos de Mn nas minas do Azul, N4E e no Sereno. Os pisolitos na superfície da mina do Azul formados durante ou após este evento, que é identificado, também, em profundidade, parecem estar intimamente ligado com a formação dos minérios de bióxido de Mn eletrolítico do Azul. Este período do Eoceno é associado com o aquecimento abrupto e com níveis de mar altos.

Oligoceno Superior e Mioceno Inferior-Médio – As condições propícias à precipitação de óxidos de Mn nessa época corresponde ao retorno de condições úmidas na transição Oligoceno-Mioceno (25 Ma).

O Mioceno Inferior a Médio (20-12 Ma) indicam um intenso intemperismo na região nesta época, consistentes com os resultados geocronológicos e evidências geológicas. Além do intemperismo intenso identificado nos perfis de Carajás, o Mioceno também corresponde ao intemperismo mais antigo identificado nas planícies que circundam Carajás. Os dados coletados, apesar de ainda escassos, sugerem que as planícies circundando Carajás estão expostas ao intemperismo há menos tempo do que os platôs de Carajás.

Recente – Óxidos de Mn precipitados ao longo de falhas, no contato entre a zona intemperizada e rochas frescas no depósito do Igarapé Bahia, fornecem resultados equivalente a uma idade zero (a resolução do método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ na datação de óxidos de Mn é em torno de 250000 ka). Este resultado é consistente com as condições climáticas quentes e úmidas existentes, atualmente, na Amazônia.

Em conclusão, os eventos de dissolução e reprecipitação dos óxidos de Mn na região de Carajás representam períodos úmidos e quentes na história geológica da região, durante os quais havia abundância de biomassa. A datação de intemperismo fornece, portanto, informações sobre a evolução continental no Mesozóico/Cenozóico difíceis de se determinar por outros métodos.

5.4.3 – Paleomagnetismo

O uso de métodos paleomagnéticos para datar perfis lateríticos é baseado na hipótese de que magnetização remanescente é adquirida de um processo químico durante o intemperismo, e não é herdada das rochas originais. Perfis de intemperismo, especialmente as partes ferruginizadas, preservam sinais paleomagnéticos que podem ser usados como uma ferramenta de datação relativa. Essa técnica é particularmente eficiente na Índia e Austrália, devido o rápido deslocamento desses continentes durante o Terciário. O problema na utilização desse método na América do Sul é que este continente não apresentou grande movimentação nos últimos 200 Ma, com a latitude do pólo variando entre 90° N e 70°N.

Estudos paleomagnéticos em diversas paleosuperfícies com crostas lateríticas, na Guiana Francesa e Suriname foram desenvolvidos por Théveniaut & Freyssinet (1999, 2001) e servem de base para os comentários contidos, a seguir. Esses trabalhos objetivavam, entre outras coisas, identificar sinais paleomagnéticos das paleosuperfícies no Escudo da Guiana e melhorar o entendimento da estrutura geomorfológica através de datação paleomagnética relativa. Foram amostradas três paleosuperfícies de *duricrust* da região de Caiena, junto com estudos do depósito de Kaw Mountain no nordeste da Guiana Francesa e dos depósitos de Moengo e de Bakhuis, localizados respectivamente, na costa e interior do Suriname.

Na maioria dos perfis estudados, hematita é o único mineral com suporte magnético, enquanto que goethita usualmente não fornece qualquer sinal com contribuição significativa. Direções paleomagnéticas confiáveis foram observadas em *duricrust* maciços de Fe e em horizontes bauxíticos, embora este último tenha apresentado alguns sinais paleomagnéticos dispersos. Esses dados têm permitido a identificação de aspectos

importantes no desenvolvimento dos perfis de intemperismo, pela comparação dos pólos geomagnéticos virtuais (VGPs) com o deslocamento polar Sul Americano.

Os resultados obtidos, nos perfis estudados, apresentaram significativas variações nas direções magnéticas, que tem sido interpretadas como diferentes etapas de aquisição de remanescentes magnéticos em variáveis paleolatitudes. Na região de Caiena, a superfície mais antiga de composição bauxítica (*Cayenne Unit 1*), em elevação de 75-200 m, tem um VGP próximo do pólo de referência de 40 Ma, com margem de erro abrangendo o período de tempo de 20 a 60 Ma. Uma segunda superfície, com altitude de 20-50 m, apresenta um evento de ferruginização em 10 Ma e a superfície mais baixa (*Cayenne Unit 3*) registra uma direção paleomagnética em torno de 5-13 Ma. O depósito bauxítico de Kaw Mountain têm duas paleosuperfícies com elevações de 300 e 220 m, com direções paleomagnéticas médias dando, respectivamente, idades relativas em torno de 50 Ma e 10 Ma. A paleosuperfície mais antiga foi detectada em Bakhuis Mountain, com 400 m de altitude, que apresentou uma direção paleomagnética média próxima ao pólo de referência de 60 Ma.

As superfícies de bauxita de Bakhuis Mountain, Kaw Mountain (superfície superior) e provavelmente a *Cayenne Unit 1* apresentariam idade Paleoceno-Eoceno e poderiam ser atribuídas ao ciclo de lateritização Sul-Americano. A superfície inferior de Kaw Mountain, o depósito de Moengo e a superfície ferruginosa de *Cayenne Unit 2* foram relacionadas a superfície “Velhas Superior” do Mioceno. O *duricrust* de ferro da *Cayenne Unit 3*, próximo ao nível do mar, parece estar, também, relacionado ao evento de lateritização do Mioceno Superior. Esses resultados levaram a sugerir que o Paleoceno-Eoceno e o Mioceno foram os principais períodos de lateritização no Escudo das Guianas, enquanto que o Oligoceno parecia representar uma quebra maior no desenvolvimento dos perfis de intemperismo, com a erosão sendo o processo dominante.

Análises por K/Ar e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ por Vasconcelos (1996), em Carajás, nas minas do Azul, mina de ouro do Igarapé Bahia, depósito de Fe de N4E, depósito de ouro de Serra Pelada, depósito de Mn do Sereno e da região do Cumaru, identificaram os seguintes períodos como mais propícios ao avanço do intemperismo na região: 70-65 Ma, 55-50 Ma, 44-40 Ma, 25 Ma, 20-12 Ma e Recente. Ruffet et al. (1996) desenvolveram, em Carajás, análises de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de óxidos de K-Mn no perfil de intemperismo na mina de

Mn do Azul, e encontraram duas fases principais de intemperismo em 70-60 Ma e 48-46 Ma. Essas datações absolutas seriam, então, consistentes com a maioria das datações relativas a partir de dados paleomagnéticos, obtidas no Escudo das Guianas. Essa conjunção de informações confirmariam a ocorrência de fases de lateritização dominantes durante o Cretáceo Superior, Paleoceno e Eoceno, seguida por uma outra durante o Mioceno. Esses dados dariam suporte, ainda, a hipótese de que o principal evento de erosão ocorreu durante o Oligoceno com condições climáticas mais frias e baixo nível do mar (Fig. 5.4)

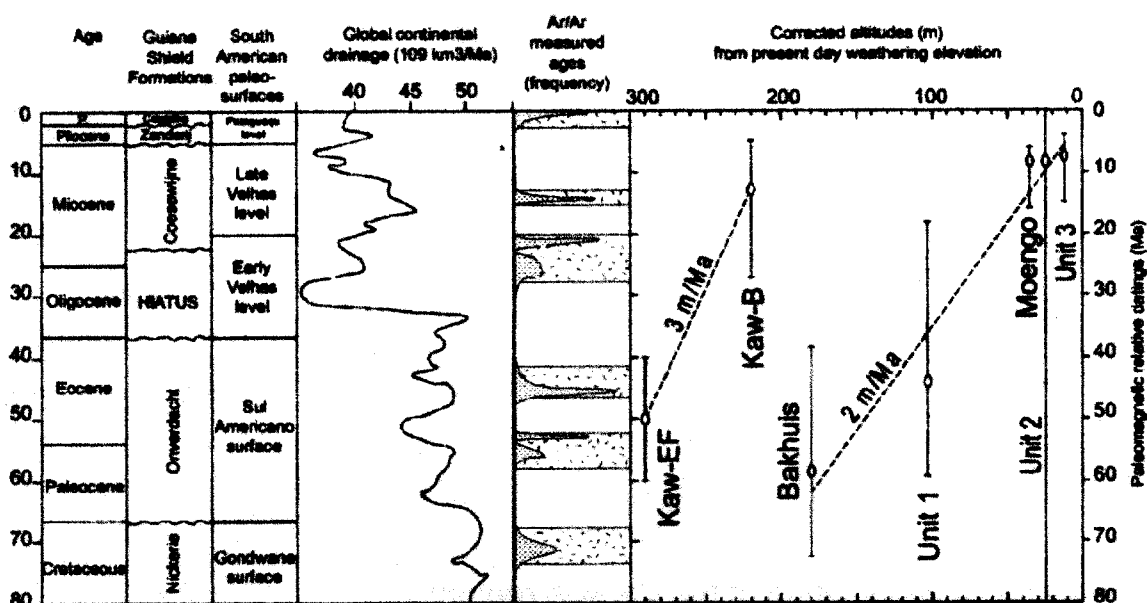


Figura 5.4 – Comparação, em relação ao tempo geológico, das Formações de Escudo das Guianas, paleosuperfícies da América do Sul, drenagem continental global (Tardy & Roquin, 1998), datações de lateritização em Carajás (Vasconcelos et al. 1994) e síntese de datações paleomagnéticas. (modificado de Théveniaut & Freyssinet, 2001).

5.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados descritos nos itens anteriores, associados com observações de campo, permitem traçar propostas simplificadas para um quadro evolutivo da paisagem em Carajás. Fatores essenciais a serem estudados, na formulação de propostas, abrangem clima atual, paleoclimatologia, relevo atual, caracterização dos perfis lateríticos existentes, aspectos litoestruturais, geocronologia de intemperismo e neotectônica. Dentro desses fatores, devem ser destacados informações recentes de geocronologia de intemperismo desenvolvidos, principalmente, nos trabalhos de Vasconcelos et al. (1993); Ruffet et al.

(1996) e Vasconcelos (1996). Os dados provenientes das pesquisas desses autores possibilitaram, entre outras coisas, posicionar, no tempo geológico, eventos principais de intemperismo que, conjugados com interpretações paleoclimáticas, tornaram mais objetivas as discussões sobre a evolução do relevo da região.

O relevo atual de Carajás (Figura 3.1) é formado, em linhas gerais, por uma série de platôs escarpados, com mais de 500 m de altitude, correspondendo a Serra dos Carajás propriamente dita e por uma região plana a ondulada com cotas, em geral, de 250 a 350 m. A diferença de nível entre essas duas formas de relevo pode variar de 200 a 500 m. Os platôs da Serra dos Carajás são entendidos, aqui, como remanescentes da superfície Sul-Americana, correspondendo a uma extensa superfície de erosão que levou a formação de um peneplano em escala continental, enquanto que a região predominantemente plana a ondulada corresponderia a Superfície Velhas, que constituiria de um pediplano regional, apresentando, no seu interior, serras e platôs isolados como testemunhos da superfície Sul-Americana. Estas interpretações estão em consonância com os trabalhos de Lopes (1999) e Santo (1999).

A Superfície Velhas é entendida, como relata Lopes (1999), como uma feição geomorfológica de escala continental, sendo produto de um intenso ciclo de erosão, imposto a superfície Sul-Americana, que promoveu a geração dessa extensa superfície aplainada. Então, algumas questões básicas e fundamentais no estudo da história do relevo de Carajás referem-se sobre o período de formação dessas duas superfícies ou sobre a época de desenvolvimento do ciclo erosivo imposto à superfície Sul-Americana e que gerou o pediplano da superfície Velhas. Uma maneira objetiva para conseguir esses esclarecimentos seria o estudo e a caracterização, em Carajás, dos perfis lateríticos sobre essas duas superfícies e a obtenção de suas datações absolutas ou relativas.

Trabalhos de mapeamento regional, efetuados nesta tese, definiram a existência de, pelo menos, dois típicos perfis lateríticos, diretamente relacionados com as duas superfícies de erosão reportadas acima, e tendo, portanto, um claro controle geomorfológico. Esta interpretação é concordante com a proposição de Lopes (1999). O perfil associado a superfície Sul-Americana seria mais complexo e mais profundo, atingindo, quando completo, espessuras superiores a 100 m, enquanto que o perfil relacionado à superfície Velhas (“lateritos do baixão”) apresenta espessura bem menores, em torno de 20 a 30 m. É

interessante observar que dentro do relevo arrasado da superfície Velhas, os “lateritos do baixão” mostram um certo destaque topográfico, caracterizado por suaves ondulações ou platôs rebaixados (Figura 3.4).

Os dados geocronológicos de datações absolutas em Carajás, provenientes dos trabalhos de Vasconcelos et al. (1993); Ruffet et al. (1996) e Vasconcelos (1996), vêm confirmar, a princípio, esta divisão simplificada de dois tipos de perfis lateríticos. Resultados obtidos em perfis sobre a superfície Sul-Americana (Mn-Azul, Igarapé Bahia, N4E e Serra do Sereno) identificaram idades de 70-65 Ma (final do Cretáceo); 55-50 Ma (Eoceno Inferior); 44-40 Ma (Eoceno Superior); 25 Ma (transição Oligoceno-Mioceno); 20-12 Ma (Mioceno Inferior a Médio) e Recente. Por outro lados, as datações mais antigas verificadas nas “lateritas do baixão” correspondem ao Mioceno (20-12 Ma). Esses resultados mostram, portanto, que os perfis intemperizados presentes no topo dos platôs da Serra de Carajás estão expostos aos processos de intemperismo desde o final do Cretáceo, enquanto que as planícies que circundam esta serra registram idades de intemperismo apenas a partir do Mioceno.

Os resultados geocronológicos, relatados acima, registram, também, períodos de climas úmidos e quentes dentro da história climatológica da região, durante os quais existia grande quantidade de cobertura florestal. É importante observar que a maioria das datações relativas paleomagnéticas do Escudo das Guianas, obtidas por Théveniaut e Freyssinet (2001) são consistentes com as datações absolutas registradas em Carajás. Então, é válido afirmar a existência, em Carajás, de fases de lateritização dominantes no Cretáceo Superior, Eoceno Inferior e Eoceno Superior, relacionadas ao ciclo Sul-Americano, e uma outra fase ocorrida durante o Mioceno que atuou, também, sobre a superfície Velhas.

Vasconcelos et al. (1993) e Vasconcelos (1996) relatam que as datações de 70-65 Ma; 55-50 Ma e 44-40 Ma, sugerem uma precipitação episódica de óxidos de Mn nos perfis de intemperismo na Serra de Carajás e que esses três episódios são caracterizados por diferenças na forma de intemperismo. Afirmam, ainda, que as quebras nas idades de registro de precipitações de óxidos de Mn, entre o Cretáceo Superior e o Eoceno Superior, podem corresponder a interrupção ou decréscimo na velocidade de intemperismo.

Na discussão sobre o período mais provável do desenvolvimento do ciclo erosivo, ao qual a superfície Sul-Americana foi submetido, e que fez gerar a superfície Velhas, é

interessante enumerar algumas importantes considerações : a) Crowley & North (1991) relatam que o Oligoceno pode ser considerado como a transição entre os períodos quentes de Cenozóico Inferior para os de clima frio do Cenozóico Superior e que a erosão das margens continentais e significativa queda do nível do mar, ocorrida em torno de 31-29 Ma, são evidências da expansão da cobertura de gelo da Antártica; b) Tardy & Roquin (1998) afirmam que o clima global tornou-se mais frio e, especialmente, mais seco durante o Oligoceno Médio, antes de se tornar mais quente, úmido e novamente favorável a lateritização durante o Mioceno; c) Os dados geocronológicos de superfícies de intemperismo, obtidos tanto em Carajás como no Escudo das Guianas, não definiram nenhuma datação durante o Oligoceno; d) Esses mesmos dados geocronológicos mostram que o Mioceno corresponde ao intemperismo mais antigo registrado no perfil laterítico sobre a superfície Velhas. Esses itens são, portanto, indicativos de que, durante o Oligoceno existiam condições propícias para um atuante ciclo erosivo que, em Carajás, permitiu a geração do pediplano da superfície Velhas, com um desnível de centenas de metros em relação aos remanescentes do peneplano da superfície Sul-Americana. A dissecação e modelamento deste relevo pode ter sido, em grande parte, controlado por critérios litoestruturais, caracterizando um processo de erosão diferencial. É perceptível que a maioria dos platôs da Serra dos Carajás (superfície Sul-Americana), tem o seu perfil de intemperismo associado ou posicionado sobre seqüências de formações ferríferas, meta-quartzo-arenitos ou rochas silicosas. Por outro lado, boa parte das drenagens tem nítido controle estrutural.

Os dados para o Quaternário indicam que as regiões tropicais passaram a ser submetidas a ciclos alternados de climas úmidos e áridos, de menor duração do que no Terciário. Vasconcelos (1996) aponta que óxidos de Mn precipitados ao longo de falhas, no atual *front* de intemperismo do depósito do Igarapé Bahia, fornecem resultados equivalentes a uma idade zero (a resolução do método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ na datação de óxidos de Mn é de cerca de 250000 ka), estando compatível com as atuais condições climáticas da Amazônia.

A partir dos dados e discussões anteriores, considerações importantes, para a elaboração de um modelo evolutivo da paisagem de Carajás, são listadas a seguir :

- a) As fases de lateritização mais importantes registradas em Carajás, compreendem o Cretáceo Superior, Eoceno Inferior, Eoceno Superior, Mioceno e Recente;
- b) Os perfis lateríticos da Serra dos Carajás (Superfície Sul-Americana) estão expostos ao intemperismo desde o final do Cretáceo;
- c) A ausência de idades anteriores a 70 Ma podem revelar que os perfis mais antigos foram erodidos antes do Cretáceo ou que o intemperismo do final do Cretáceo foi suficientemente pervasivo para apagar todos os registros anteriores;
- d) Os episódios do Cretáceo Superior, Eoceno Inferior e Eoceno Superior estão relacionados a precipitações episódicas de óxidos de Mn, em um período dominado por clima quente e úmido. Os intervalos de tempo entre esses episódios podem corresponder a interrupções ou diminuição na velocidade de intemperismo;
- e) Análise de dados geocronológicos e paleoclimáticos indicam que, condições climáticas no Oligoceno possibilitaram a atuação de expressivo ciclo de erosão, levando a geração do pediplano da Superfície Velhas, a partir da dissecação de grande parte do peneplano da Superfície Sul-Americana. Esta erosão foi controlada, em parte, por fatores geológicos e estruturais;
- f) No Mioceno foram retomadas condições climáticas para nova fase de intemperismo. Esta fase atuou sobre os perfis lateríticos remanescentes da Serra dos Carajás e fez desenvolver o perfil laterítico sobre a Superfície Velhas (laterito do baixão).
- g) Resultados equivalentes a uma idade zero no *front* de intemperismo do Igarapé Bahia são coerentes com as condições climáticas atuais em Carajás.

A figura 5.5 procura resumir algumas das considerações relatadas acima e traçar um quadro simplificado da história do intemperismo e do desenvolvimento do relevo em Carajás.

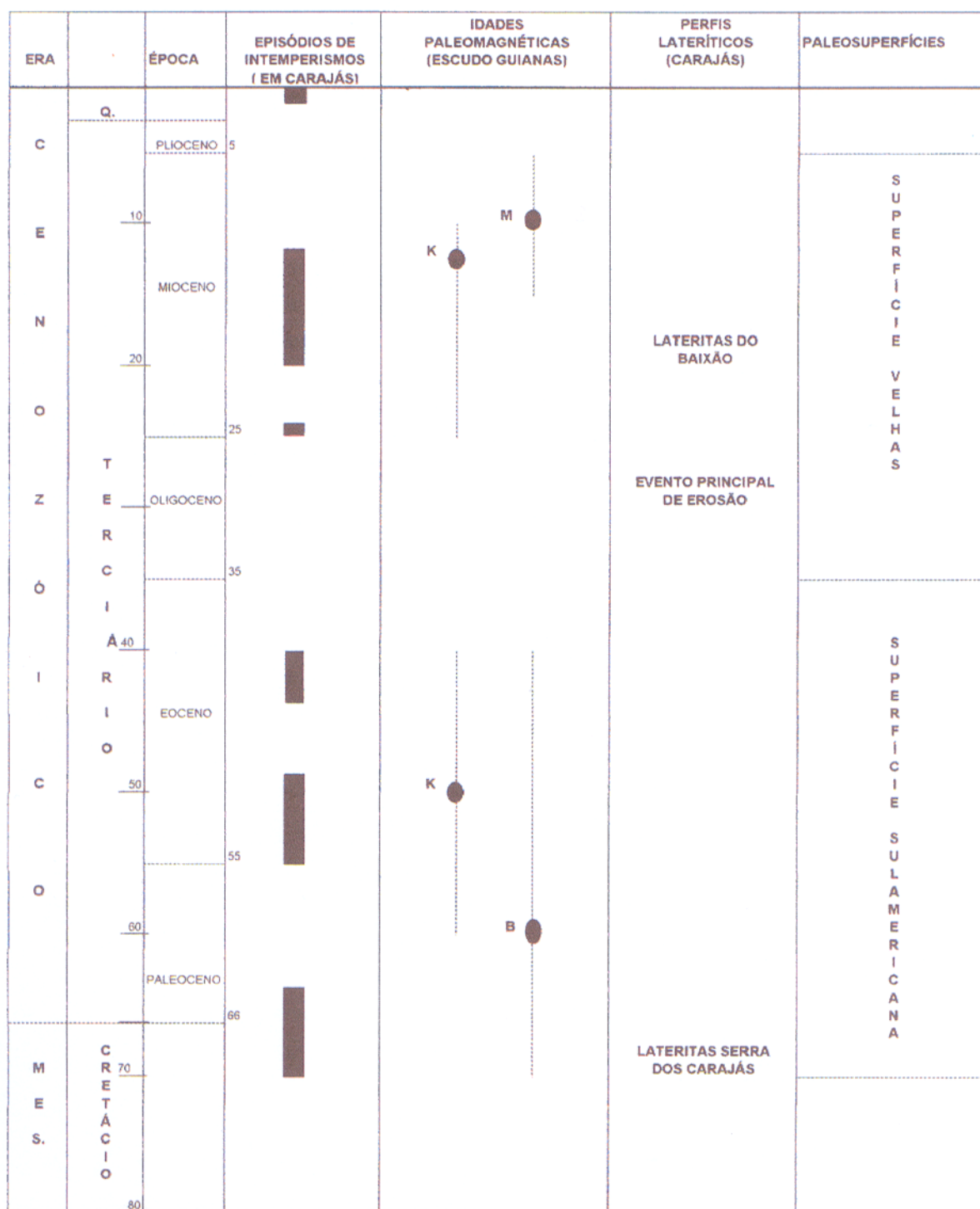


Figura 5.5 – Distribuição através do tempo dos episódios de intemperismo (datações K-Ar e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de Vasconcelos, 1996); idades paleomagnéticas do Escudo das Guianas (Théveniaut & Freyssinet, 2001); perfis lateríticos de Carajás, principal evento de erosão e paleosuperfícies. (Q = Quaternário, K = Kaw Mountain, B = Bakhuis Mountain e M = Moengo).

6 – CONCLUSÕES

Os trabalhos de mapeamento de regolitos e amostragem geoquímica de superfície realizados nas áreas Guarujá, Jaca e Paulo Afonso, juntamente com os trabalhos de descrição, análise mineralógica e amostragem geoquímica em furos de trado na área Guarujá e a execução de mapeamento de perfis regionais em Carajás, permitiram as seguintes conclusões e considerações finais :

O relevo de Carajás é formado, em linha gerais, por uma série de platôs escarpados com mais de 500 m de altitude, correspondendo a Superfície Sul-Americana e por uma região plana a ondulada com cotas entre 250 a 350 m, relacionada a Superfície Velhas. A geomorfologia das áreas Guarujá e Jaca possuem características relativamente semelhantes, sendo dominadas por feições elevadas do tipo platô e de porções mais rebaixadas, planas a onduladas. A área Paulo Afonso é representada por terrenos arrasados, planos a ondulados, com serras e platôs relativamente restritos. A parte superior dos platôs, nas três áreas, apresentando, sempre, cota superior a 550 m, sendo caracterizada por uma superfície relativamente plana, que passa, em direção a base, para terrenos com declividade inicialmente suave e, posteriormente, muito acentuada. Os platôs das áreas Guarujá e Jaca devem representar registros da Superfície Sul-Americana, modificada por eventos erosivos e intempéricos posteriores à sua formação. Por outro lado, o platô da área Paulo Afonso seria um testemunho da Superfície Sul-Americana dentro de um domínio de terrenos de baixo relevo da Superfície Velhas.

O estudo conjunto das características dos relevos das áreas permitiu a definição de cinco regimes geomorfológicos : a) regime de topo de platô; b) regime de encosta suave; c) regime de encosta abrupta; d) regime plano de baixo relevo; e) regime de planície de inundação. A definição dos regimes geomorfológicos torna-se uma importante ferramenta, na medida que os mesmos guardam uma relação direta com os horizontes regolíticos aflorantes e auxiliam na interpretação dos materiais amostrados, quanto ao caráter autóctone, alóctone ou parcialmente transportado.

Foram definidos e individualizados, nas áreas estudadas, quatro horizontes regolíticos maiores, acima da rocha sã : saprolito, zona de transição, crosta desmantelada e latossolo. Na zona central do regime de topo platô o perfil de intemperismo é normalmente completo, enquanto que nos regimes de encostas e de baixo relevo, este perfil torna-se

truncado pela erosão dos dois horizontes mais superiores. O horizonte de latossolo é constituído por material argiloso fino, inconsolidado, aspecto plástico e textura homogênea. Ocorre com espessura atingindo até 10 m, sempre aumentando das bordas para o centro dos platôs. O horizonte de crosta dismantelada apresenta espessura média de 3 m, sendo composto por fragmentos e blocos, centimétricos a decimétricos, e concreções, milimétricas a centimétricas, envolvidas por uma matriz argilosa. Os fragmentos maiores costumam se concentrar na base desse horizonte (nível de fragmentos), havendo, normalmente, uma diminuição do tamanho em direção ao topo, onde fica caracterizado um nível de concreções. Esse horizonte é interpretado como originado por processo de dismantelamento, principalmente por intemperismo químico, de uma crosta anterior mais endurecida (*duricrust*). O horizonte de zona de transição é composto por solos arenosos a argilosos, de coloração variadas, com caráter homogêneo a localizadamente mosqueado, apresentando fragmentos de saprolitos e litorelictos, envolvidos pelo solo, que aumentam em quantidade e tamanho em direção à base. O contato com o horizonte de saprolito é, normalmente, difuso e definido a partir do predomínio de feições saprolíticas sobre as pedolíticas.

Os horizontes de latossolo e crosta dismantelada situam-se, essencialmente, dentro do regime de topo de platô, tendo um caráter residual a semi-residual. O horizonte de zona de transição, ao contrário, abrange diversos regimes geomorfológicos e, conseqüentemente, com variadas características do material aflorante. Quando situado dentro dos regimes de encosta suave, o material superficial tem caráter semi-residual com relativamente pouco transporte. Quando posicionado dentro do regime de encosta forte ou abrupta, o material aflorante corresponde a uma mistura semi-residual com transporte mais acentuado. No regime de baixo relevo, o material aflorante, normalmente, é do tipo residual a semi-residual, mas podendo apresentar locais com coberturas de constituintes deposicionais. Material predominantemente transportado ocorre no regime de planície de inundação, ocorrendo ao longo de drenagens, sendo mais expressivo em vales abertos.

Análise mineralógica por difração de raios-X de alguns perfis de furos de trado mostra que os três horizontes superiores são representados por proporções variáveis de óxidos e hidróxidos de ferro, caulinita, gibbsita e quartzo. O horizonte de zona de transição mostra, normalmente, um domínio de caulinita e hematita. O contato entre os horizontes de

zona de transição e crosta desmantelada é marcado, normalmente, por uma queda na quantidade de caulinita e por um predomínio de hematita. O contato entre os horizontes de crosta desmantelada e latossolo é evidenciado, principalmente, pela diminuição na quantidade de hematita e pela nítida queda no grau de cristalinidade de alguns minerais, especialmente hematita e caulinita. Observa-se, ainda no latossolo, o aumento proporcional de goethita, que é essencialmente aluminosa.

Informações provenientes deste trabalho, associado com uma revisão bibliográfica, leva a uma idéia para a formação do latossolo, envolvendo uma combinação de processos químicos, físicos e biológicos. A importância e a quantificação da atuação de cada processo carece de trabalhos de pesquisa mais aprofundados. No momento, a classificação de material semi-residual para o horizonte de latossolo é o mais apropriado.

A amostragem do material regolítico aflorante resultou numa quantidade representativa de amostras dos horizontes de zona de transição, crosta desmantelada e latossolo, nas três áreas trabalhadas. Foi efetuada análise multielementar para 18 elementos. A média para cada elemento, nos três horizontes amostrados e nas três áreas, foi calculada com o intuito de se estudar o comportamento dos elementos ao longo do perfil de intemperismo. Os resultados geoquímicos, nas três áreas trabalhadas, mostram muitas similaridades, independente das diferenças geológicas e geoquímicas existentes, permitindo desenvolver idéias sobre a caracterização dos elementos nos horizontes regolíticos amostrados. O comportamento individual dos elementos, ao longo do perfil de intemperismo, mostra, normalmente, diferenças nítidas dos seus valores médios nos três meios amostrais ou apresenta um valor claramente mais forte ou fraco em um determinado horizonte. A análise conjunta das áreas permite separar os elementos em três distintos padrões ou estilos de comportamentos geoquímicos : **a) Estilo 1** – corresponde a um grupo de elementos que apresenta nítido enriquecimento no horizonte de crosta desmantelada, sendo representados por Fe, Cr, V, Sb, Ti, As, Co, Pb, Zn e Au **b) Estilo 2** – corresponde a um grupo de elementos que apresenta valores mais elevados no horizonte de zona de transição (Ca, Ba, Mg, Mn, Cu, Ni e La); **c) Estilo 3** – corresponde ao comportamento do Al que mostra valor médio nitidamente mais elevado no horizonte de latossolo. Os dados para Au mostram uma tendência para o seu posicionamento dentro do estilo 1. Essa divisão em estilos de comportamento foi reforçada pelas análises de fatores principais

desenvolvidas, para amostras de superfície, nas três áreas trabalhadas e pelos dados geoquímicos provenientes de sondagens rasas efetuadas em platô da área Guarujá.

O comportamento heterogêneo dos elementos ao longo do perfil de intemperismo leva a importantes implicações em todas as fases de um programa de exploração. Os elementos apresentam, normalmente, diferentes escalas de *background* e *thresholds* nos três ou, em pelo menos, dois horizontes, implicando na existência de distintas populações geoquímicas que devem ser consideradas no processo de coleta e interpretação dos dados geoquímicos. Exemplos de mapas geoquímicos foram apresentados, nos quais comprova-se que é fundamental, para uma efetiva interpretação, um entendimento do tipo de material que está sendo coletado ou, em outras palavras, é essencial o conhecimento do sistema composto pelos horizontes regolíticos e os regimes geomorfológicos. A compreensão do comportamento geoquímico do elemento-alvo, em um programa de exploração, pode permitir a seleção do seu melhor sítio de amostragem. Na impossibilidade de se coletar um único meio amostral, recomenda-se um tratamento estatístico diferenciado para cada população geoquímica. Salienta-se, entretanto, que existem casos em que um horizonte regolítico pode se tornar um meio amostral inviável devido a uma grande homogeneização de valores (falta de contraste) ou a um empobrecimento acentuado dos resultados geoquímicos. Essas considerações tornam os processos de mapeamento de regolitos e de regimes geomorfológicos fundamentais e imprescindíveis em qualquer programa de prospecção geoquímica. Os dados geoquímicos obtidos neste trabalho podem, também, sinalizar um *trend* comportamental dos elementos estudados para a região de Carajás, especialmente nas áreas de platôs da Superfície Sul-Americana.

Perfis regionais de mapeamentos de regolitos, desenvolvidos neste trabalho, associados com pesquisa bibliográfica, permitiu discutir aspectos da evolução da paisagem em Carajás. Ao final foram listadas algumas observações consideradas importantes, para a elaboração de um modelo evolutivo dessa paisagem : a) as fases de lateritização mais importantes registradas em Carajás, compreendem o Cretáceo Superior, Eoceno Inferior, Eoceno Superior, Mioceno e Recente; b) Os perfis lateríticos da Serra dos Carajás (Superfície Sul-Americana) estão expostos ao intemperismo desde o final do Cretáceo; c) A ausência de idades anteriores a 70 Ma pode revelar que os perfis mais antigos foram erodidos antes do Cretáceo ou que o intemperismo do final do Cretáceo foi suficientemente

pervasivo para apagar todos os registros anteriores; d) Análise de dados geocronológicos e paleoclimáticos indicam que, condições climáticas no Oligoceno possibilitaram a atuação de expressivo ciclo de erosão, levando à geração da Superfície Velhas, a partir da dissecação de grande parte da Superfície Sul-Americana. Essa erosão foi controlada, em parte, por fatores geológicos e estruturais; e) No Mioceno foram retomadas condições climáticas para nova fase de intemperismo, que atuou sobre os perfis lateríticos remanescentes e fez desenvolver o perfil laterítico sobre a Superfície Velhas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEVA, G.J.J. 1981. Essencial differences between the bauxite deposits along the southern and nothern edges of the Guiana shields, South America. *Econ. Geol.*, 76: 1142-1152.
- ANAND, R.R. 1993. The regolith and its exploration and economic significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CRUSTAL EVOLUTION, METALLOGENY AND EXPLORATION OF THE EASTERN GOLDFIELDS, Kalgoorlie. *AGSO Record*, p.75-100.
- ANAND, R.R. 1997. The value of regolith materials and regolith mapping to exploration. In: EXPLORATION GEOCHEMISTRY IN LATERITIC TERRAINS, Brasília. *Workshop Notes*. CRC LEME/ADIMB.
- ANAND, R.R. & BUTT, C.R.M. 1998. Approaches to geochemical exploration in lateritic and related terrains: a comparasion of Australian and African terrains. In: ÁFRICA: GEOLOGY AND MINERAL EXPLORATION. *AIG Bulletin* 25, p.17-34.
- ANAND, R.R. & BUTT, C.R.M. 2001. Regolith-landform mapping. In: INTERNATIONAL GEOCHEMISTRY EXPLORATION SYMPOSIUM, 20., Santiago, Chile. *Worshop WI...* Santiago,Chile, AEG.
- ANAND, R.R. & SMITH, R.E. 1997. The importance of regolith in mineral exploration. In: EXPLRATION GEOCHEMISTRY IN LATERITIC TERRAINS, Brasília. *Workshop Notes*. CRC LEME/ADIMB.
- ANDRADE, W.O.; MACHESKY, M.L.; ROSE, A.W. 1991. Gold distribution and mobility in the surficial environment, Carajás region, Brazil. *J. Geochem. Explor.*, 40: 95-114.
- ANGÉLICA, R.S. 1996. *Mineralogia e geoquímica de gossans e lateritos auríferos na região de Carajás: depósitos de Igarapé Bahia e Águas Claras*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 138 p. (Tese de Doutorado).

- ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N; JORGE JOÃO, X.S.; COSTA, J.B.S. 1988. A megaestruturação arqueana da Folha Serra dos Carajás. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GEOLOGIA, 7., Belém. *Anais...* Belém, SBG. v.1, p.324-338.
- BOAVANTURA, R. S.; RENNÓ, C.V.; MARITA, C.; FRANCO, E.M.S.; BOAVENTURA, F.M.C.; D'AVILA; L.M.; VENTURA, L.M. 1974. *Geomorfologia da folha SB.22 Araguaia e parte da folha SC.22-Tocantins*. Rio de Janeiro, RADAM v.4, p.111-129.
- BUTT, C.R.M. 1997. Weathering and regolith evolution. In: EXPLORATION GEOCHEMISTRY IN LATERITIC TERRAINS, Brasília. *Workshop Notes*. CRC LEME/ADIMB.
- BUTT, C.R.M. & SMITH, R.E. 1980. Conceptual models in exploration geochemistry, Australia, developments in economic geology. *J. Geochem. Explor.*, 12: 89-365.
- BUTT, C.R.M. & ZEEGERS, H. 1992. Regolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains. In: GOVETT, G.J.S.(ed.). *Handbook of Exploration Geochemistry*. Amsterdam, Elsevier. 607 p.
- CHAUVEL, A.; BOULET, R.; JOIN, P.; BOCQUIER, G. 1983. Aluminium an iron oxide hydroxide segregation in nodules of latosols developed on Tertiary sediments (Barreira Group), near Manaus (Amazon Basin), Brazil. In: INTERNAT. SEM. ON LATERITIZATION PROCESS, 2., São Paulo. São Paulo, *Proceedings*, p. 507-526.
- COSTA, M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira Geociências*, 21(2): 147-160.
- COSTA, M. L. 1993. Gold distribution in lateritic profiles in South America, Africa and Australia: applications to geochemical exploration in tropical regions. *J. Geochem. Explor.*, 47:143-163
- COSTA, M.L. 1997. Lateritisation as a major process of ore deposit formation in the Amazon region. *Explor. Mining. Geol.*, 6(1): 79-104.

- COSTA, M.L. & ARAÚJO, E.S. 1997. Caracterização mineralógica e geoquímica multi-elementar de crostas ferruginosas lateríticas tipo minério de ferro em Carajás. *Geociências, São Paulo*. 16(1): 55-86.
- COSTA, M.L.; ANGÉLICA, R.S.; COSTA, N.C. 1999. The geochemical association Au-As-B-(Cu)-Sn-W in latosol, colluvium, lateritic iron crust and gossan in Carajás, Brazil: importance for primary ore identification. *J. Geochem. Explor.*, 67: 33-49
- COSTA, M.L.; COSTA, J.A.V.; ANGÉLICA, R.S. 1993. Gold-bearing bauxitic laterite in a tropical rain forest climate: Cassiporé, Amapá, Brazil. *Chorn. Rech. Min.*, 510: 41-51.
- CROWLEY, T.J. & NORTH, G.R. 1991. *Paleoclimatology*. New York, Oxford University Press, 339 p.
- DAVY, R.; PIRAJNO, F.; SANDERS, A.J.; MORRIS, P.A. 1999 Regolith geochemical mapping as adjunct to geological mapping and exploration; examples from three contiguous Proterozoic basins in Western Australia. *J. Geochem. Explor.*, 66: 37-53.
- DENEN, W.H. & NORTON, H.A.. 1977. Geology and geochemistry of bauxite deposits in the Lower Amazon basin. *Econ. Geol.*, 72: 82-89
- DIAS, G.S.; MACAMBIRA, M.J.B.; DALL'AGNOL, R.; BARROS, C.E.M.; Soares, A.D.V.; 1996. Datação de zircões de sill de metagabro; comprovação da idade arqueana da Formação Águas Claras, Carajás – Pará. In: SIMPÓSIO GEOLOGIA AMAZÔNIA, 5., Belém. *Boletim...* Belém, SBG/NO. p.60-63.
- DOCEGEO. 1988. Revisão litoestratigráfica da província mineral de Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 35., Belém. *Anais...* Belém, p.10-54.
- FREYSSINET, Ph. 1993. Gold dispersion related to ferricrete pedogenesis in South Mali: application to exploration. *Cron. Rech. Min.*, 510: 25-40.

- FREYSSINET, Ph. 1998. Geochemical exploration in Africa and Amazonia: relationships between gold signal in soil and tropical landscapes. In: SEMINAR ON MINING EXPLORATION, Brasília. *Workshop Notes*, ADIMB.
- GRUBB, P.L.C. 1979. Genesis of bauxites deposits in the Lower Amazon Basin and Guianas coastal plain. *Econ. Geol.* 74: 735-750.
- HORBE, A.C. 1995. *Evolução mineralógica e geoquímica multi-elementar de perfis de solos sobre lateritos e gossans na Amazônia*. Belém, Universidade Federal de Pará. Centro de Geociências. 213p. (Tese de Doutorado).
- HORBE, A.C. & COSTA, M.L. 1996. Crostas lateríticas geradoras de solos na Amazônia. In: SIMPÓSIO GEOLOGIA AMAZÔNIA, 5, Belém. *Anais...* Belém, SBG/NO, p.261-264.
- KING, L.C. 1956. A geomorphological comparison between eastern Brazil and Africa (central and souther). *Quartely Journal of the Geological Society of London*, 112: 445-474.
- KOBILSEK, B. & LUCAS, Y. 1988. Étude morphologique et pétrographique d'une formation bauxitique d'Amazonie (Sécteur de Jabuti, État du Pará, Brésil). *Sci. Géol., Bull.*, 41: 71-84.
- KOTSCHOUBEY, B. & LEMOS, V.P. 1985. Considerações sobre a origem e a gênese das bauxitas da Serra dos Carajás. In: SIMPÓSIO GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 2., Belém. *Anais...* Belém. SBG/NO. v. 3, p.48-61.
- LECOMTE, P. 1988. Stone line profiles: importance in geochemical exploration. *J. Geoch. Explor.*, 30: 35-61.
- LECOMTE, P. & ZEEGERS, H. 1992. Humid tropica terrains (rainforest). In: GOVETT, G.J.S. (ed.) *Handbook of Exploration Geochemistry*. Amsterdam, Elsevier. 607 p.

- LELONG, F.; TARDY, Y; GRADIN, G.; BOULANGE, B. 1976. Pedogenesis, chemical, weathering and process of formation of some supergene ore deposits. In : WOLFE, K.H. (ed.) *Handbook of statabound and stratiform ore deposits*. Elsevier, Amsterdam. v.3 p.93-166.
- LOPES, C.M. 1999. *As lateritas em Carajás*, DOCEGEO. 29p. (Relatório técnico)
- LUCAS, Y. & CHAUVEL, A. 1992. Soil formation in tropical weathered terrains. In: GOVETT, G.J.S. (ed.) *Handbook of Exploration Geochemistry*. Amsterdam, Elsevier. 607p.
- LUCAS, Y.; KOLBILSEK, B.; CHAUVEL, A. 1989. Structure, genesis and present evolution of Amazonian bauxites developed on sediments. *Travaux ICSOBA*, 19: 81-94.
- LUCAS, Y.; LUIZÃO, F.J.; CHAUVEL, A.; ROUILLER, J.; NAHON, D. 1993. The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils. *Science*, 260: 521-523.
- MACHADO, W.; LINDENMAYER, Z.; KROGH, T.E.; LINDENMAYES, D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, amazon shield, Brazil. *Precambrian Research*, 49:329-354.
- MACHESKY, M.L.; ROSE, A.W.; ANDRADE, W.O.; BLISS, L.; KATO, T. 1993. Gold speciation and mobility near Igarapé Bahia deposit, Pará State, Brazil. *Chron. Rech. Min*, 510:53-60.
- MEDEIROS FILHO, C.A. 2002. *Alvos de platôs – Pesquisa à trado mecânico*. Relatório das atividades. DOCEGEO. 17p. (Relatório técnico)
- MEDEIROS FILHO, C.A. & LOPES, C.A.M. 2001. *Proposta de metodologia de prospecção geoquímica para áreas de platôs em Carajás*. DOCEGEO. 19p.(Relatório técnico).

- MEDEIROS FILHO, C.A.; NASCIMENTO, J.A.S.; GONCALEZ, R. 1994. *Perfis lateríticos em Carajás – exemplos dos alvos Breves e Tanque*. DOCEGEO. 6p. (Relatório técnico)
- NOGUEIRA, A.C.R. 1995. *Análise faciológica e aspectos estruturais da Formação Águas Claras, região central da Serra dos Carajás – Pará*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 167 p. (Dissertação de Mestrado)
- PINHEIRO, R.V.L. & HOLDSWORTH, R.E. 1997. Reactivation of Archean strike-slip fault systems. Amazon Region. Brazil. *Journal of Geological Society. London*. 154: 99-103.
- RODRIGUES, E.S.; LAFON, J.M.; SCHELLER, T. 1992 Geocronologia Pb-Pb da Província Mineral de Carajás: primeiros resultados. In: CONG. BRAS. GEOL., 37, São Paulo, *Boletim...*v2, p. 183-184.
- RUFFET, G.; INNOCENT, C.; MICHARD, A.; FÉRAUD G., BEAUVAIS, A.; NAHON, D.; HAMELIN, B. 1996. A geochronological $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ study of K-Mn oxides from the weathering sequence of Azul, Brazil. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 2219-2232.
- SANTO, C.V.E. 1999. *Caracterização morfoestrutural e morfotectônica das áreas transpressivas; Serra dos Carajás e Serra do Tiracambu*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. (Dissertação de Mestrado).
- SOMBOEK, W.G. 1966. *Amazon soils. A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region*. Wageningen, Centre for Agr. Publ. Document. 292 p.
- TARDY, Y. & NAHON, D. 1985. Geochemistry of laterites, stability of Al-goethite, Al-hematite and Fe^{3+} kaolinite in bauxites and ferricretes: an approach to the mechanism of concretion formation. *American Journal of Science*, 285: 865-903

- TARDY, Y. & ROQUIN, C. 1998. *Dérive des continents, latérites et paléoclimats tropicaux*. Editions BRGM, 472 p.
- TARDY, Y.; KOBILSEK, 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. *J.African Earth Sci.*, 12: 283-295.
- THÉVENIAUT, H. & FREYSSINET, P. 1999. Paleomagnetism applied to lateritic profiles to assess saprolite and duricrust formation process: the example of the Mont Baduel profile (French Guiana). *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 148, 209-231.
- THÉVENIAUT, H. & FREYSSINET, P. 2001. Timing of lateritization on the Guiana Shield: synthesis of paleomagnetic results from French Guiana and Suriname. (submitted to *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*: 2001).
- THOMAS, M. F. 1994. *Geomorphology in the tropics : a study of weathering and denudation in low latitudes*. Willey Ed. 460 p.
- TRUCKENBRODT, W. & KOTSCHOUBEY, B. 1981. Argila de Belterra-cobertura terciária das bauxitas amazônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, 2: 203-208.
- TRUCKENBRODT, W.; KOTSCHOUBEY, B.; SCHELLMANN, W. 1991. Composition and origin of the clay cover on north Brazilian laterites. *Geol. Rundschau*, 80: 591-610.
- VASCONCELOS, P.M. 1992. *Timing and rates of evolution of hydrochemical systems in semiarid and humid environments by application of $^{40}\text{K} - ^{40}\text{Ar}$ and laser-heating $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of K-bearing weathering product minerals*. University of California at Berkeley. (PhD Dissertation).
- VASCONCELOS, P.M. 1996. Paleoclimas e evolução geomorfológica da região de Carajás: evidência geoquímica e geocronológica. In: SIMPÓSIO GEOLOGIA AMAZÔNIA, 5., Belém. *Anais...* Belém, SBG/NO, p.26-30.

VASCONCELOS, P.M.; BECKER, T.A.; RENNE, P.R.; BRIMHALL, G.H. 1992 Age and duration of weathering by K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis of K-Mn Oxides. *Science*, 258: 451-455.

VASCONCELOS, P.M.; RENNE, P.R.; BRIMHALL, G.H.; BECKER, T.A. 1993. *Paleogene Amazônia climates deduced from K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of K-Mn oxides in laterites.* (inédito)

WIRTH, K.R.; GIBBS, A.K.; OLSZEWSKI Jr. 1986. U-Pb ages of zircons from the Grão-Pará Group and Serra dos Carajás Granite, Pará, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(2): 195-200.