



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 595

**MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DO PERFIL LATERITO
BAUXÍTICO NA SERRA SUL, PROVÍNCIA MINERAL DE
CARAJÁS**

Dissertação apresentada por:

PAULO RONNY SOARES RODRIGUES

Orientador: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa (UFPA)

**BELÉM - PARÁ
2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R696m Rodrigues, Paulo Ronny
Mineralogia e geoquímica do perfil laterito bauxítico na serra Sul,
Província Mineral de Carajás / Paulo Ronny Rodrigues. — 2020.
xii, 50 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcondes Lima Costa
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade
Federal do Pará, Belém, 2020.

1. Intemperismo. 2. Bauxita. 3. Gibbsita. 4. Hematita. 5.
Caulinita. I. Título.

CDD 551.9098115



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DO PERFIL LATERITO BAUXÍTICO NA SERRA SUL, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR:

PAULO RONNY SOARES RODRIGUES

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOLOGIA e GEOQUÍMICA, Linha de Pesquisa MINERALOGIA E GEOQUÍMICA**

Data de aprovação: 03 / 11 / 2020

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa
(Orientador – UFPA)

Prof.ª Dr.ª Adriana Maria Coimbra Horbe
(Membro – UnB)

Prof.ª Dr.ª Angélica Fortes Drummond Chicarino Varajão
(Membro – UFOP)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por permitir passar por todos os problemas de saúde e concluir esse trabalho;

Ao meu orientador, Dr. Marcondes Lima da Costa, por ser extremamente compreensível como orientador e auxiliar irrestritamente no desenvolvimento desta pesquisa, com acesso aos laboratórios, e no incansável trabalho continuado de correção do presente texto;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo provimento de bolsa de mestrado durante os dois anos desta pesquisa;

Ao ITV (Instituto Vale), por financiar esta pesquisa, com custeio das etapas de campo e análises químicas, dentro projeto “Processo de Formação das Lateritas do Platô S11da Serra Sul de Carajás”, Convênio: nº 3753 ITV/UFGA/FADES;

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pelo suporte necessário para realização deste trabalho;

Aos profissionais da biblioteca do IG pela ajuda nas orientações da adequação do texto as normas da biblioteca;

Aos professores e técnicos do Instituto de Geociências (IG) responsáveis pela Oficina de Preparação de Amostras (Prof.^a Candido Moura); Oficina de Laminação (Prof.^a Vania Barriga, téc. Joelma Lobo e téc. Bruno Veras); Laboratório de Sedimentologia (Prof. Afonso Nogueira e téc. Everaldo Cunha); Laboratório de Petrografia (Prof. Dr. Paulo Gorayeb); Laboratório de Microanálises (Prof. Dr. Cláudio Lamarão, téc. Gisele Marques e téc. Ana Paula); e Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações (Prof. Marcondes Lima da Costa; Dra. Glayce Jholy Souza Valente; doutorando Pablllo Henrique dos Santos);

Aos meus pais, Maria Ivoneide e Roberto Silva, por toda confiança e companheirismo nessa jornada;

Aos amigos da Grupo de Mineralogia e Geoquímica Aplicada (GMGA), em especial ao Daiveson Abreu, Igor Barreto, Rayara Silva, Priscila Gozzi, Vitor Moura, Diogo Oliveira, pelo apoio e companheirismo.

RESUMO

A Amazônia detém as maiores reservas de bauxitas do Brasil, localizadas em Trombetas, Juruti, Paragominas e Rondon do Pará. A região de Carajás, com grandes depósitos lateríticos, em especial de ferro, também se desponta com potencialidade para depósitos de bauxita, com destaque para os da Serra Norte. Nas Serras Sul foram identificadas ocorrências de menor porte, as quais foram investigadas neste trabalho. Após levantamento cartográfico, foram realizadas atividades de campo em uma estrada vicinal nas proximidades da Serra Sul, onde em quatro perfis de alteração, foram descritas, fotografadas e coletadas 23 amostras para análise mineralógica (difratometria de raios – X), textural (Microscopia óptica e eletrônica de varredura) e química (Espectrometria de massa e de emissão óptica, com plasma indutivamente acoplado). O perfil laterito bauxítico compreende da base para o topo de: 1) Horizonte Caulínico (HC); 2) Horizonte Argiloso Mosqueado (HAM); 3) Horizonte Bauxita Nodular (HBN); 4) Horizonte Bauxita Argilosa (HBA) e 5) Horizonte Ferruginoso (HF); e finalmente ao topo 6) Horizonte ferruginoso desmantelado (HFD). A composição química é dominada essencialmente por Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 e TiO_2 , que constituem os principais minerais, caulinita, gibbsita, hematita, goethita e anatásio. Os elementos traços V, Cr, Cu, Ga, As, Zr, Cd, Hf, Bi e Th, cujas concentrações são em geral superiores às da Crosta Superior da Terra, encontram-se mais concentrados nos horizontes ferruginosos, relacionados aos oxi-hidróxidos de Fe (hematita e goethita) e ainda ao zircão. Por outro lado, os elementos Co, Zn, Se, Rb, Sr, (Nb), Ag, (Sn), Cs, Ba e Pb estão em níveis inferiores ao da Crosta Continental Superior da Terra, e suas concentrações são mais baixas nos horizontes ferruginosos, sugerindo afinidade com minerais de argila. Os ETR em níveis inferiores a UCC, se enriquecem em ETRP e apresentam fortes anomalia positiva e negativa de C e positiva de Eu, e sugerem distribuição em zircão, oxi-hidróxidos de Fe e outras fases minerais. Os cálculos de balanço de massa demonstram claramente uma evolução laterítica completa, apenas parcialmente modificada em sua porção superior. A zona bauxítica, no entanto, não apresenta localmente potencial para minério, devido o baixo teor de alumina aproveitável e elevado em sílica reativa. Porém a sua ocorrência abre oportunidade para novas pesquisas tendo em vista o potencial geológico e paleoambiental da Província Mineral de Carajás.

Palavras-chave: Intemperismo. Bauxita. Gibbsita. Hematita. Caulinita. Elementos-Traço

ABSTRACT

The Amazon holds the largest reserves of bauxites in Brazil, located in Trombetas, Juruti, Paragominas and Rondon do Pará. The Carajás region, with large lateritic deposits, especially of iron, is also emerging with potential for bauxite deposits, with emphasis on those of Serra Norte. In Serras Sul, smaller occurrences were identified, which were investigated in this work. In this context, field activities were carried out with sample collection and textural, mineralogical and chemical analyzes and then a genetic discussion was presented. In four alteration profiles on a side road near the Serra Sul, after geological cartography, 23 samples were collected, which were described, photographed and prepared for mineralogical analysis (X-ray diffraction), textural (optical and scanning electron microscopy) and chemical (mass and optical emission spectrometry, with inductively coupled plasma). The bauxite laterite profile comprises from the base to the top of: 1) Kaolin Horizon (HC); 2) Mottled clay Horizon (HAM); 3) Nodular Bauxite Horizon (HBN); 4) Clayey Bauxite Horizon (HBA) and 5) Ferruginous crust Horizon (HF); and finally to the top 6) Dismantled crust ferruginous horizon (HFD). The chemical composition is essentially dominated by Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 and TiO_2 , which compose the main minerals, kaolinite, gibbsite, hematite, goethite and anatase. The trace elements V, Cr, Cu, Ga, As, Zr, Cd, Hf, Bi and Th, whose concentrations are generally higher than those of the Upper Crust of the Earth, are more concentrated in the ferruginous horizons, related to Fe oxy-hydroxides (hematite and goethite) and also to zircon. On the other hand, the elements Co, Zn, Se, Rb, Sr, (Nb), Ag, (Sn), Cs, Ba and Pb are at lower levels than the Upper Continental Crust, and their concentrations are lower in ferruginous horizons, suggesting affinity with clay minerals. ETR at levels lower than UCC, are enriched in ETRP and present strong positive and negative C and positive Eu anomaly, and suggest distribution in zircon, oxy-hydroxides of Fe and other mineral phases. and mass clearly demonstrate a complete lateritic evolution, only partially modified in its upper portion. The bauxite zone, however, does not have local potential for ore, due to the low content of usable alumina and high in reactive silica. However, its occurrence opens an opportunity for further research in view of the geological and paleoenvironmental potential of the Mineral Province of Carajás.

Keywords: Weathering. Bauxite. Gibbsite. Hematite. Kaolinite. Trace Elements.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figure 1- Geological map of the Mineral Province of Carajás, highlighting the main geological Units of the region and location of study area. Modified after Vasquez *et al.* (2008).....3
- Figure 2- Panoramic view of the outcrop. a) panoramic view of profile 1. b) panoramic view of profile 3. c) panoramic view of profile 4.....8
- Figure 3- Bauxite-bearing laterite profiles investigated along the road Águas Claras – Serra Sul close do Serra Sul, in Carajás.....12
- Figure 4- Fragments of kaolin impregnated with a thin film of iron oxihidroxides. b) Electronphotomicrographies of kaolinite aggregates with plate morphology. c) Mineralogical constitution of kaolin determined by XR showing the domain of kaolinite.....14
- Figure 5- a) Fragment of the material from mottled clayey horizon. b) Small fragments showing the red color. c) Photomicrography of mottled clay, with emphasis on the presence of kaolinite plasma (Plc), gibbsite crystals (Gbs) and pores (Pr). d) Aggregates of gibbsite crystallites in the mottled clay nodules. e) Minerals identified by XRD in the material from the mottled clay horizon. Hem = Hematite; Kln = Kaolinite; Gbs = Gibbsite; Ant = Anatase.....15
- Figure 6- a) Bauxitic nodules of pink color, tubular or prismatic in shape and varying between 2 and 4 cm in length. b) SEM image of meso to micro crystals of gibbsite, together with kaolinite. c) Mineralogical constitution of BN after XRD, showing kaolinite, gibbsite, hematite and anatase. Hem = Hematite; Kln = Kaolinite; Gbs = Gibbsite; Ant = Anatase.....16
- Figure 7- a) Transitional contact between the HF and HBA. b) clayey bauxite fragment. c) Gibbsite under two forms in HBA well-developed crystals in the lower part and as tiny crystals partially filling the pores in the upper part. d) Gibbsite crystals in contact with ferruginous plasmas (PLF). e) mesocrystalline kaolinite along pores. f) submillimetric crystals of kaolinite associated to a clay mass. g) Mineralogical constitution of the HBA after XRD, showing the presence of kaolinite, gibbsite, hematite and anatase.

Hem = Hematite; Kln = Kaolinite; Gbs = Gibbsite; Ant = Anatase.....18

Figure 8- Exponion of ferruginous crust showing possible laminations. b) CF sample displaying the nodular aspect and irregular pores. c) SEM image oxyhydroxide film made of hematite. d) Mesocrystals of hematite with discoid and tabular habit filling pores. e) Mineralogical constitution of CF after XRD analyzes showing the domain of hematite, goethite, gibbsite and some kaolinitee. Hem = Hematite; Kln = Kaolinite; Gbs = Gibbsite; Ant = Anatase.....20

Figure 9- Photomicrography of 0.5 cm HF fragments. a) a fragment of ferruginous nodule (NF) of HF formed by brown submillimeter fragments immersed in ferruginous cement or plasma, both composed of goethite and kaolinite; b) a cavernous iron oxyhydroxides brown plasm with gibbsite partially infilling the wall's cavities; c) and d) micro ferruginous nodules (NF) made of black hematite coated with ochreous goethite and cemented by brown microfragmented cement made of iron oxyhydroxides and some gibbsite (CG).....21

Figure 10- Dismantled ferruginous crust, with presence of ferruginous nodules immersed it to clay matrix. b) ferruginous nodules. c) Mineral constitution of the HFD obtained by XRD. Hem = Hematite; Kln = Kaolinite; Gbs = Gibbsite; Ant = Anatase.....22

Figure 11 - Main mineral distribution contents along the lateritic-bauxite profiles. a) profile 1. b) profile 3. HFD (Dismantled Crust); HF (Ferruginous Crust); HBA (Clayey Bauxite); HBN (Nodular Bauxite); HM (Mottled Clay); HC (Kaolin).....23

Figure 12- Distribution of the major elements in the samples of the bauxite and laterithic horizons of the profile 3.....25

Figure 13- A) A chemical diagram showing the intensity of lateritization processes for studied profile, based on Schellmann (1983). B) Horizon's classification after chemical composition of the studied lateritic profile at Serra Sul, based on Bárdossy (1982).....30

| | |
|---|----|
| Figure 14- Distribution pattern of trace element contents normalized to UCC of Rudnick & Gao (2003)..... | 31 |
| Figure 15- Scatter diagrams showing the positive correlation between Fe ₂ O ₃ and some trace elements and major elements A) Al ₂ O ₃ x Fe ₂ O ₃ ; b) SiO ₂ x Al ₂ O ₃ ; c) TiO ₂ x Al ₂ O ₃ d) Sb x Fe ₂ O ₃ ; e) Hg x Fe ₂ O ₃ ; f) Bi x Fe ₂ O ₃ | 32 |
| Figure 16- Scatter diagrams showing the positive correlation between Zr and some trace elements and TiO ₂ A) Zr x Hf; b) Zr x Y; c) Zr x Ta; d) Zr x Nb; e) Zr x TiO ₂ ; f) Zr x U..... | 34 |
| Figure 17- Principal Component Analysis of the raw chemical data of all lateritic horizons..... | 35 |
| Figure 18- Concentration distribution patterns REE normalized to chondrites..... | 36 |
| Figure 19- Isocon mass balance diagrams (after Grant 1986) considering the bauxite mean chemical composition and average chemical composition of the UCC of Gao <i>et al.</i> (2003) (A), the Earth Crust andesites (B) and the basaltic andesites from Parauapebas Formation of Grão Pará Group in Carajás (after data from Olszewski <i>et al.</i> 1989) (C). Al ₂ O ₃ , TiO ₂ and Zr at least describe very well the isocons..... | 41 |
| Figure 20- Distribution of the mass balance data for SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , V, Cu, Zn, As, Sc, Ni, Ga, Sr, Y, Zr, Nb, Sn, Ba, Hf, Ta, W, Pb, Th, U, La, Ce, Nd), ETRL and ETRP on the basis of Ti (as immobile element) along of the investigated bauxite-bearing laterite profile at Serra Sul, Carajás..... | 49 |

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| AGRADECIMENTOS | iv |
| RESUMO | vi |
| ABSTRACT | vii |
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES | viii |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 APRESENTAÇÃO | 1 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA..... | 2 |
| 1.3 OBJETIVOS | 2 |
| 1.4 LOCALIZAÇÃO | 2 |
| 2 ESTUDOS ANTERIORES | 3 |
| 3 ASPECTOS GEOLÓGICOS DA PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS | 5 |
| 3.1 ESTRATIGRAFIA | 5 |
| 3.2 DEPÓSITOS DE BAUXITAS DA AMAZÔNIA..... | 6 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS | 6 |
| 4.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA..... | 6 |
| 4.2 TRABALHOS DE CAMPO E AMOSTRAGEM..... | 7 |
| 4.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS | 7 |
| 4.4 PETROGRAFIA | 7 |
| 4.5 MICROMORFOLOGIA E QUÍMICA SEMIQUANTITATIVA PONTUAL POR (MEV/EDS)..... | 8 |
| 4.6 ANÁLISES MINERALÓGICAS POR DIFRAÇÃO DE RAIOS – X (DRX)..... | 8 |
| 4.7 - ANÁLISES QUÍMICAS TOTAIS | 8 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 9 |
| 5.1 OS PERFIS LATERÍTICOS | 9 |
| 5.1.1 Horizonte Caulínico (HC)..... | 11 |
| 5.1.2 Horizonte Argiloso Mosqueado (HAM) | 12 |

| | |
|---|----|
| 5.1.3 Horizonte de Bauxita Nodular (HBN) | 13 |
| 5.1.4 Horizonte Bauxita Argilosa (HBA) | 14 |
| 5.1.5 Crosta Ferruginosa (CF) | 17 |
| 5.1.6 Crosta Ferruginosa Desmantelada (CFD) | 19 |
| 5.2 DISTRIBUIÇÃO DOS MINERAIS PRINCIPAIS NO PERFIL LATERITO- BAUXÍTICO | 20 |
| 6 COMPOSIÇÃO QUÍMICA | 22 |
| 6.1 ELEMENTOS MAIORES..... | 22 |
| 6.2 ELEMENTOS TRAÇOS | 29 |
| 6.3 ELEMENTOS TERRAS RARAS..... | 33 |
| 6.4 BALANÇO DE MASSA | 35 |
| 7 CONCLUSÕES | 40 |
| REFERÊNCIAS | 41 |
| APENDICE A - MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE ELEMENTOS | 49 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Os depósitos de bauxita são a principal fonte de matéria prima para a produção do alumínio metálico e alumina e, portanto, de grande importância econômica e social. Os principais depósitos são Weipa, no norte da Austrália; Boké na Guiné e Los Pijiguaos na Venezuela.

No Brasil, as reservas de bauxita são estimadas em 7,5 bilhões de toneladas distribuídas tanto na região norte (Província Bauxífera Amazônica), sudeste (por exemplo, o depósito de Poços de Caldas) e centro oeste (Barro Alto). A Província Amazônica é a mais expressiva no cenário nacional e compreende os depósitos de Paragominas (Costa *et al.* 2014), Juruti (Costa *et al.* 2014, Negrão *et al.* 2018), Porto Trombetas e Rondon do Pará (Oliveira *et al.* 2016).

As primeiras referências a bauxitas na Amazônia são de Katzer (1903). Porém, os trabalhos científicos pioneiros só vieram a ser realizados ao final da década de 50 por Towse e Winson. Em geral, na Amazônia as bauxitas são de origem laterítica polifásica Kotschoubey *et al.* (1987), estão geralmente associadas a perfis lateríticos maduros (Costa 1991) a maioria derivada de rochas sedimentares siliciclásticas cretáceas da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas (Trombetas e Juruti), assim como das Formações Itapecuru e Ipixuna, Bacia do Grajaú (Paragominas), além de rochas vulcânicas e graníticas como no Pitinga (Horbe & Costa 1990).

Na mundialmente conhecida Província Mineral de Carajás as bauxitas foram descritas por Assad & Beisiegel (1978), Lemos & Villas (1983), Kotschoubey & Lemos (1985) e Costa *et al.* (1997), concentrando-se nas bauxitas ferruginosas da Serra Norte de Carajás – N5, derivadas de rochas básicas da Sequência Paleovulcânica Inferior do Grupo Grão Pará, do Arqueano.

Quanto a idade destas bauxitas as informações são divergentes, Lemos & Villas (1983) e Costa *et al.* (1997) afirmam se tratar de um depósito contemporâneo a formação da crosta laterítica, enquanto Kotschoubey & Lemos (1985) e Kotschoubey *et al.* (1989) admitem que a bauxita se formou posteriormente a crosta, em virtude de um evento de bauxitização da crosta ferruginosa fragmentada e formação de cimento gibbssítico as custas da matriz argilosa. Ainda segundo Costa *et al.* (1997) a sequência abaixo do horizonte de bauxita de N5 se assemelha àquela dos demais encontrados na Amazônia (Gurupi, Pitinga, Carajás).

Apesar de alguns trabalhos na literatura referentes as bauxitas de Carajás, elas ainda requerem estudos mais aprofundados quanto a sua mineralogia, geoquímica e gênese para auxiliar no entendimento da evolução supergênica que esses depósitos representam na Amazônia.

1.2 JUSTIFICATIVA

A Província Mineral de Carajás se destaca por apresentar vários depósitos minerais relacionados a alteração supergênica, principalmente lateríticos, com destaque para aqueles de ferro, manganês e níquel. Embora o ambiente lhes seja favorável, depósitos de bauxitas em Carajás ainda são restritos. Em recentes atividades de campo (quatro anos atrás) os pesquisadores Marcondes Costa e Clovis Maurity identificaram ocorrências de bauxitas na Serra Sul, próximas dos grandes depósitos de minério de ferro laterítico de S11D. O objetivo desta dissertação foi investigar essa nova ocorrência de lateritos bauxíticos nesta região da Serra Sul de domínio quase absoluto dos depósitos gigantes de minério de ferro, predominantemente laterítico.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Caracterização geológica, mineralógica e geoquímica dos perfis laterito-bauxíticos expostos em trechos da rodovia não pavimentada Águas Claras – Serra Sul, na porção Sul da Província Mineral de Carajás, visando avaliar a potencialidade para bauxita no domínio Carajás.

1.3.2 Específicos

- ❖ Caracterização dos horizontes dos perfis laterito-bauxíticos e possível substrato.
- ❖ Caracterização micromorfológica, mineralógica e química.
- ❖ Discussão genética e correlação com as bauxitas de Carajás e da Amazônia em geral.

1.4 LOCALIZAÇÃO

A presente área de estudo situa-se na região sudeste do estado do Pará (Figura 1), dentro da Província Mineral de Carajás, limitada pelas coordenadas 6°19'30" e 6°20'30" de latitude Sul e 50°19'30" e 50°20'30" de longitude WGr. Os perfis estão expostos em corte de estrada não pavimentada Águas Claras – Serra Sul entre as serras Norte e Sul de Carajás, dentro da Flona Carajás.

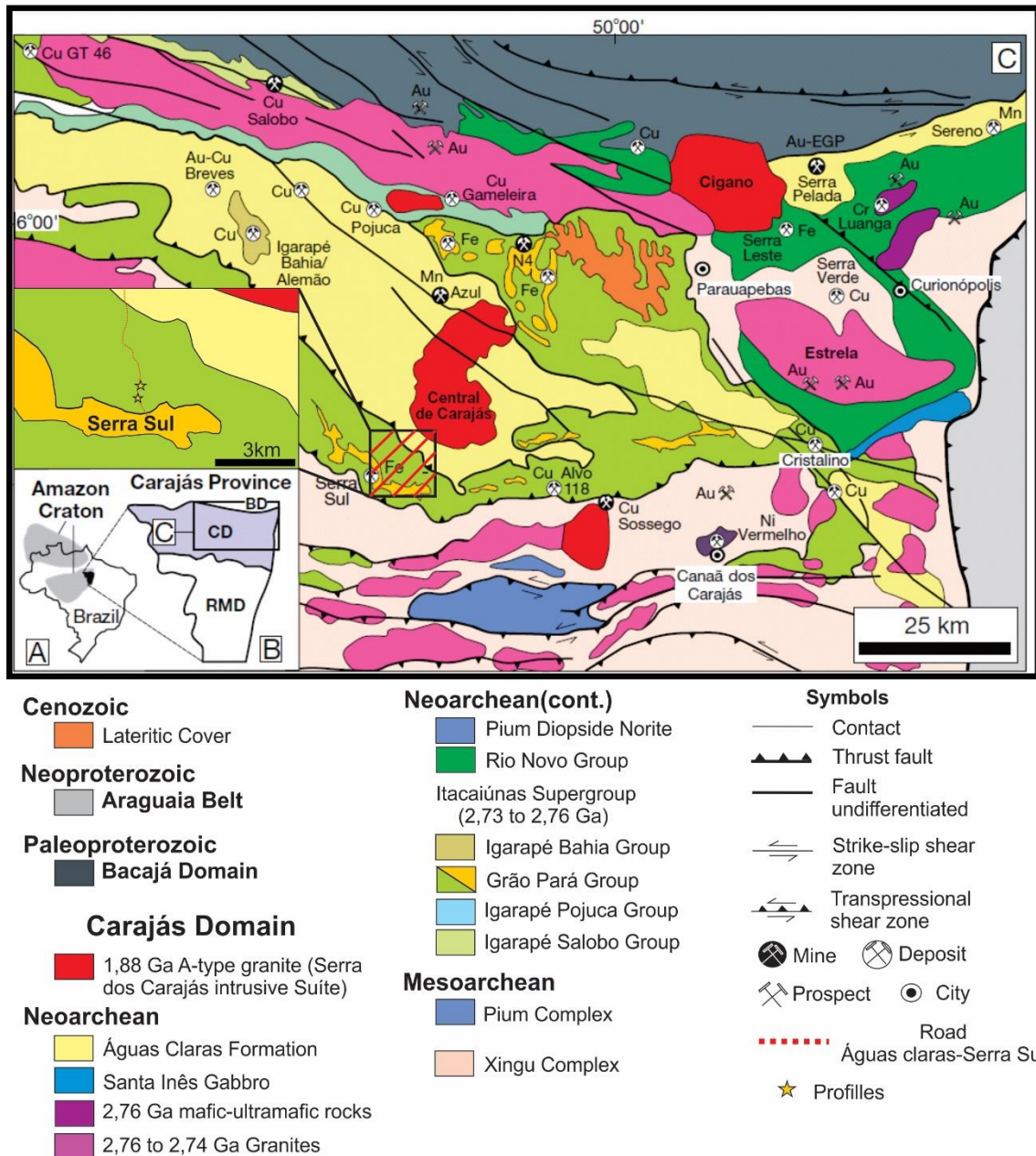


Figura 1- Geological map of the Mineral Province of Carajás, highlighting the main geological Units of the region and location of study area. Modified after Vasquez *et al.* (2008).

2 ESTUDOS ANTERIORES

Os primeiros trabalhos geológicos na região de Carajás foram realizados por Barbosa *et al.* (1966), Ramos (1967) e Almeida *et al.* (1968) que reconheceram os primeiros dados sobre o embasamento e as sucessões estratigráficas em nível muito regional.

Na década de 70, pesquisas realizadas por Knup (1971), Puty *et al.* (1972), Beisiegel *et al.* (1973), Basei (1974), Gomes *et al.* (1975) e Isller (1977) trouxeram grandes avanços ao conhecimento da geologia da região. Foram apresentadas as primeiras sugestões sobre a

gênese dos principais depósitos de Ferro e de Mangânes da Província de Carajás, com destaque para Suszczyński (1972), Anderson *et al.* (1974) e Beisiegel & Farias (1978).

Os primeiros trabalhos sobre as bauxitas em Carajás são de Lemos & Kotschoubey (1983) que discutem a gênese das bauxitas na Serra Norte (N5) de Carajás. Novos estudos se sucederam, embora sem atenção aos depósitos lateríticos, como Almeida (1980), Lindemayer (1981), Martins *et al.* (1982), Hirata *et al.* (1982), Dall’Agnol (1982), Cordani & Brito Neves (1982), Figueiras & Villas (1984), Montalvão (1984) e Rio Doce Geologia e Mineração S.A. (DOCEGEO 1988), que discutiram refinamentos litológicos, idades e evoluções geotectônicas com base em dados geocronológicos e geofísicos.

Nos anos 90, trabalhos como os Araújo & Maia (1991), Costa *et al.* (1995), Costa *et al.* (1996) Barros (1995), Pinheiro & Holdsworth (1995) e Costa *et al.* (1997) deram atenção ao entendimento do quadro geológico regional da Serra dos Carajás e aos depósitos laterítico-bauxíticos da Serra Norte. Nos anos 2000 intensificam-se os estudos sobre a petrogênese, metalogênese, evolução tectonoestratigráfica e principalmente geocronologia das rochas hospedeiras dos minérios da Província Mineral de Carajás com ênfase ao cobre e o ouro (Althoff *et al.*, 2000, Barros *et al.*, 2001, Pidgeon 2000, Pinheiro & Holdsworth 2000, Villas *et al.* 2001).

Os trabalhos mais recentes sobre o intemperismo laterítico e depósitos minerais associados na região são aqueles de Costa *et al.*, (2005) sobre os depósitos de Mn; Tallarico 2002 e Tallarico *et al.* (2004) sobre depósitos de Au; Horbe & Costa (2005) Costa *et al.* (2011), Costa *et al.* (2014), Negrão & Costa (2020, submetido) sobre a contribuição dos processos lateríticos na formação e decomposição dos minérios de ferro, alumínio e manganês.

3 ASPECTOS GEOLÓGICOS DA PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

3.1 ESTRATIGRAFIA

A Província Mineral de Carajás representa uma das porções mais antigas do Cráton Amazônico (Vasquez *et al.* 2008). Essa província envolve o Domínio Rio Maria, caracterizado por sequências *greenstone belts* e granitóides tipo TTG mesoarqueanos e o Domínio Carajás, composto por sequências metavulcano - sedimentares e granitoides de idade predominantemente neoarqueana (Santos 2003).

Dar-se-à apenas atenção ao domínio Carajás, pois é onde se localiza a presente área de estudo, que ocupa a porção setentrional da província. A sua organização estratigráfica tem o Complexo Xingu com embasamento mesoarqueano, constituído por ortognaisses, migmatitos, granitos, quartzitos, anfibolitos e granulitos com idade de 2,86 Ga (Machado *et al.* 1991), ou ainda 2,97 Ga para ortognaisses (Avelar *et al.* 1999). Sobre o Complexo Xingu repousa em discordância as rochas metavulcanossedimentares neoarqueana do Grupo Grão Pará distribuídas nas Formação Parauapebas na base, Formação Carajás em posição intermediária e a Formação Igarapé Cigarra no topo (Sahoo *et al.* 2016, Souza Filho *et al.* 2016).

A Formação Parauapebas é composta por rochas vulcânicas máficas com intercalações de vulcanitos félsicos (Gibbs *et al.* 1986), com evidências de alteração hidrotermal (Teixeira *et al.* 1997) e deformações localizadas (Teixeira 1994). A Formação Carajás é constituída por formações ferríferas bandadas de fácies óxido do tipo jaspilito com inúmeras feições de deformação plástica na forma de microbandamentos (Macambira & Schrank 2002.), portanto hospeda o protominério das imensas jazidas de ferro de Carajás, que são predominantemente lateríticas (Costa *et al.* 1997, Silva & Costa 2020) e hidrotermais (Figueiredo *et al.* 2020) e se expressam na paisagem na forma dos platôs que compõem as Serras Norte, Sul e Leste de Carajás (Costa *et al.* 1997, Macambira & Schrank 2002).

A Formação Igarapé Cigarra é composta por basaltos bastante alterados hidrotermalmente, semelhantes ao da Formação Parauapebas, além de conter quartzo-arenitos, fragmentos de chert e mais raramente rochas pelíticas (Sahoo *et al.* 2016).

Intenso magmatismo granítico subalcalino tipo A e cálcio-alcalino ocorreu contemporaneamente a formação dos *greenstone belts* neoarqueanos, gerando corpos alongados segundo a direção WNW-ESSE (Vasquez *et al.*, 2008). Dentre estes, se destaca o Granito Serra dos Carajás, que em geral apresenta granulação grosseira, cuja composição

varia de sieno a monzogranito (Dall’Agnol *et al.* 2005, Dall’Agnol *et al.* 2017). Outras manifestações ígneas estão alojadas nas fraturas dos basaltos da Formação Parauapebas representadas por vários diques de diabásio.

3.2 DEPÓSITOS DE BAUXITAS DA AMAZÔNIA

Os grandes depósitos de bauxita na Amazônia se desenvolveram principalmente a partir de rochas sedimentares siliciclásticas cretáceas, e em parte ígneas diversas. Destacam-se a partir das sedimentares os depósitos do baixo Amazonas como juruti e trombetas (Costa *et al.* 2014) de Paragominas (Kotschoubey *et al.* 2005) e Rondon do Pará (Oliveira *et al.* 2016, Pantoja & Costa 2020, submetido; Santos & Costa 2020, submetido). A partir das rochas ígneas merecem referências os depósitos de Pitinga (Costa *et al.* 1988, Horbe & Anand 2011, Peixoto & Horbe 2008) e Carajás (Costa *et al.* 1997, Negrão & Costa 2020, submetido).

A Formação Alter do Chão da Bacia do Amazonas é o substrato geológico dos depósitos de Trombetas e de Juruti (Costa *et al.* 2014). Já a Formação Itapecuru da Bacia do Grajaú representa o embasamento dos depósitos de Paragominas (Kotschoubey *et al.* 2005) e de Rondon do Pará (Oliveira *et al.* 2016, Pantoja & Costa 2020, submetido, Santos & Costa 2020, submetido). As bauxitas do Pitinga derivaram de rochas graníticas (Costa *et al.* 1988, Horbe & Anand 2011, Peixoto & Horbe 2008). Em Carajás elas se originaram a partir de basaltos e sequencias sedimentares proterozóicas (Costa *et al.* 1997, Negrão & Costa 2020, submetido).

Em Carajás os depósitos de bauxitas mais expressivos e conhecidos são aqueles do platô N5 na Serra Norte, derivados de rochas máficas, e ricas em ferro e pobres em sílica (Horbe & Costa 2005). Espesso horizonte bauxítico derivado de rocha máfica foi identificado em N3 junto ao depósito de ferro e investigado por Negrão & Costa (2020). O perfil estudado no presente trabalho se destaca pela sua presença junto ao gigantesco depósito de ferro da Serra Sul em Carajás, cuja caracterização e identificação de rocha mãe são os principais objetivos do presente trabalho.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica envolveu a leitura de trabalhos sobre a geologia da Província Mineral de Carajás, com ênfase as formações lateríticas e depósitos minerais associados nesta província bem como aqueles bauxítico na região Amazônica.

4.2 TRABALHOS DE CAMPO E AMOSTRAGEM

Os trabalhos de campo foram realizados ao longo de cortes (barrancos) da rodovia não pavimentada Águas Claras - Serra Sul que liga a Serra Norte a Serra Sul. Nestes, foram descritos quatro perfis com três a cinco metros de altura (Figura 2). Após as descrições foram coletadas 23 amostras, sendo 11 da crosta ferruginosa, 10 do horizonte de bauxita, 2 do horizonte argiloso mosqueado e 1 do horizonte caulínico.



Figure 2- Panoramic view of the outcrop profiles. a) panoramic view of profile 1. b) panoramic view of profile 2. c) Panoramic view of profile 4.

4.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram inicialmente fotografadas e descritas mesoscopicamente. Para a caracterização das cores se empregou a Munsell Soil Color Charts 1994, Revised Edition. Um fragmento coeso de cada uma das 23 amostras foi selecionado para a confecção de lâminas polidas e delgadas na Oficina de Laminação do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – IG/UFPA. A porção restante foi triturada com britador de mandíbulas e *shatter box* e posteriormente quarteada na Oficina de Preparação de amostras (OPA) IG/UFPA). Em seguida, cerca de 20 g de cada amostra pulverizada em gral de ágata no laboratório de sedimentologia para as análises mineralógicas por DRX e químicas totais.

4.4 PETROGRAFIA

As análises petrográficas foram realizadas com o auxílio do microscópio ótico no Laboratório de Mineralogia e Gemologia (LAMIGA) do IG-UFPA. Empregou-se o

microscópio ótico LEICA DM 2700 P com câmara LEICA MC 170 HD acoplada, tanto por luz transmitida quanto refletida.

4.5 MICROMORFOLOGIA E QUÍMICA SEMIQUANTITATIVA PONTUAL POR (MEV/EDS)

Empregou-se Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectrometria Dispersiva de Raios X (MEV/EDS) para detalhar as feições micromorfológicas e químico-minerais dos diversos materiais. Empregou-se equipamento modelo LEO-1430, marca Zeiss com EDS modelo Sirius-SD acoplado, do Laboratório de Microanálises (IG/UFGA) nas seguintes condições de operação: corrente do feixe de elétrons= 90 μ A, voltagem de aceleração constante = 20 kV, distância de trabalho = 15 mm, tempo de contagem para análise dos elementos = 30 s; também se utilizou o MEV/EDS Modelo TM3000, marca HITACHI com EDS modelo SwiftED3000 acoplado do LAMIGA, IG/UFGA). Para a obtenção de imagens por MEV e análises químicas por EDS, as amostras foram montadas em fita dupla face colada em lâmina de vidro e metalizadas com ouro durante 1,5 minutos, em um sistema automático de metalização, modelo Emitech K550X, a fim de torná-las eletricamente condutivas.

4.6 ANÁLISES MINERALÓGICAS POR DIFRAÇÃO DE RAIOS – X (DRX)

A determinação mineralógica em todas as amostras foi realizada por DRX pelo método do pó. Empregou-se o difratômetro *Bruker D2 PHASER*, com anodo de Cu, dos laboratórios LAMIGA (Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações – IG/UFGA). As condições de análise foram faixa angular de 5 a 75° 2 teta, passo 0,02°, tempo/passo 38,4 s, tempo total 720 s, fenda 0,2 °C e potência 300 W.

4.7 - ANÁLISES QUÍMICAS TOTAIS

As análises químicas totais envolveram a determinação dos elementos maiores, menores e traços com inclusão dos elementos terras raras. Os elementos maiores foram determinados por ICP-EOS após fusão total de cada amostra com metaborato de lítio. A determinação dos elementos traços ocorreu por ICP-MS, após também passar por fusão com metaborato/tetraborato de lítio e digestão da pastilha em ácido nítrico, já para a determinação dos metais preciosos e metais base, cada amostra foi digerida previamente com água régia. A perda ao fogo (PF) foi obtida por calcinação das amostras a 1000°C, enquanto o carbono total (TOT/C) e o enxofre total (TOT/S) foram determinados por LECO.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 OS PERFIS LATERÍTICOS

A sucessão de horizontes do perfil laterito-bauxítico investigado (Figura 3), é composta da base aflorante para topo por: horizonte caulínico (HC), que grada para horizonte argiloso mosqueado (HAM), sendo este então sobreposto pelo horizonte de bauxita nodular (HBN), seguido pelo horizonte de bauxita argilosa (HBA) e finalmente ao topo pela crosta ferruginosa (CF), que na superfície do terreno encontra-se recoberto pela crosta ferruginosa desmantelada (CFD).

A profundidade máxima dos perfis aflorantes é de sete metros. No perfil 1 reconhece-se a crosta ferruginosa com 2m de espessura, cor marrom avermelhada e estruturas reliquias representadas principalmente por estratificações plano paralelas decimétricas, provavelmente derivadas de rocha sedimentar. É por vezes cavernosa. Este horizonte ao topo grada para crosta desmantelada com espessura aproximada de 1 metro, composta por nódulos ferruginosos que variam entre 0,1 a 0,3cm de diâmetro e imersos numa matriz psamítica ferruginosa.

No perfil 2 (Figura 3), o mais espesso, com aproximadamente 7m, expõe-se o horizonte bauxita argilosa, com espessura de 3,5m, cor amarelo creme com porções avermelhadas, sobreposto por crosta ferruginosa com 3,5 metros de espessura, maciça e de cor predominantemente avermelhada. O contato é levemente brusco.

O perfil 3 (Figura 3) com espessura de aproximadamente 6,2 m, constitui-se de horizonte caulínico na base, com apenas 0,3m exposto. Está sobreposto por um horizonte mosqueado com 1,5m de espessura, marcado por manchas avermelhadas de óxi-hidróxidos de ferro em fundo matricial branco-cinza argiloso; é comum presença de pseudomorfos de raízes (ofiomorfos) neste horizonte, também de natureza argilosa. Esse horizonte é sucedido gradualmente para cima pelo horizonte bauxita nodular, com espessura de 0,2m e cor amarelo creme. Este horizonte é então sobreposto pela bauxita argilosa com 3m de espessura, e este por sua vez pela crosta ferruginosa com 1 m de espessura.

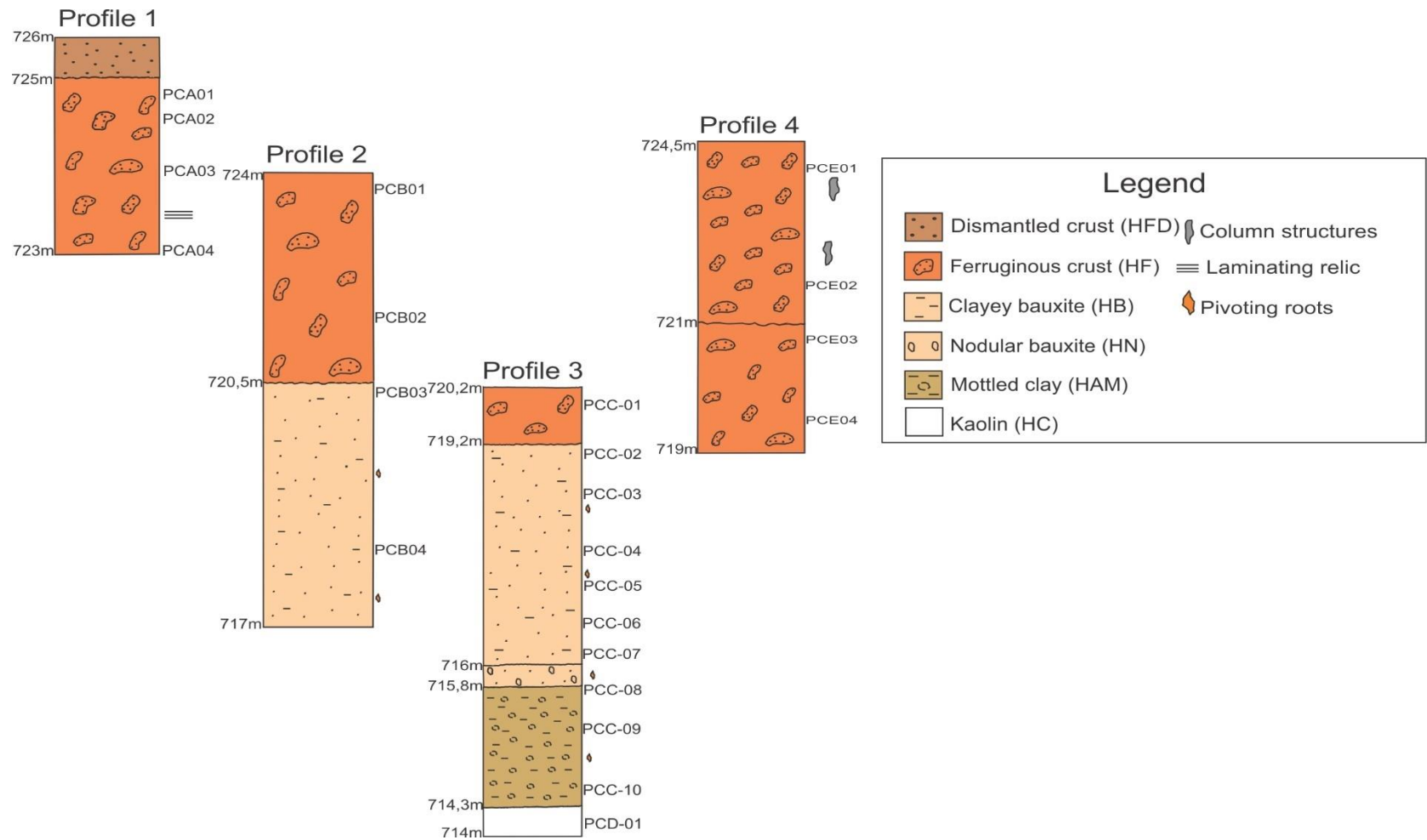


Figure 3- Bauxite-bearing laterite profiles investigated along the road Águas Claras – Serra Sul close do Serra Sul, in Carajás.

No perfil 4 (Figura 3) com aproximadamente 5,5m de espessura apenas a crosta ferruginosa está exposta. Na sua porção inferior com 2 m de espessura, ela é pisolítica, em que pisólitos vermelhos de óxido-hidróxido de ferro estão cimentados por material esbranquiçado de hidróxido de Al e argila vermelha com cimento esbranquiçado, lembrando feição tipo pele-de-onça. Já a sua porção superior exhibe estruturas colunares, com tamanhos de aproximadamente 0,4 m e que exhibe internamente uma feição semelhante a pele de onça.

5.1.1 Horizonte Caulínico (HC)

O horizonte caulínico situa-se na base aflorante do perfil laterito-bauxítico. Sua cor é branca (10 YR 8/1 na carta de Munsell), por vezes com tonalidades avermelhada devido a presença de óxido-hidróxido de ferro ao longo de fissuras e cavidades (Figura 4a). É untuoso ao tato e bastante coeso, sendo constituído essencialmente por caulinita (Figura 4c), sendo hematita rara. Ao microscópio se apresenta como massa microgranular. A caulinita se apresenta em agregados de cristais tabulares e placosos com tendência a pseudo-hexagonais que variam entre 10 e 30 μm de tamanho, com picos nos difratogramas nos intervalos de 20-30 e que indicam uma caulinita com menor efeito estrutural (Figuras 4b).

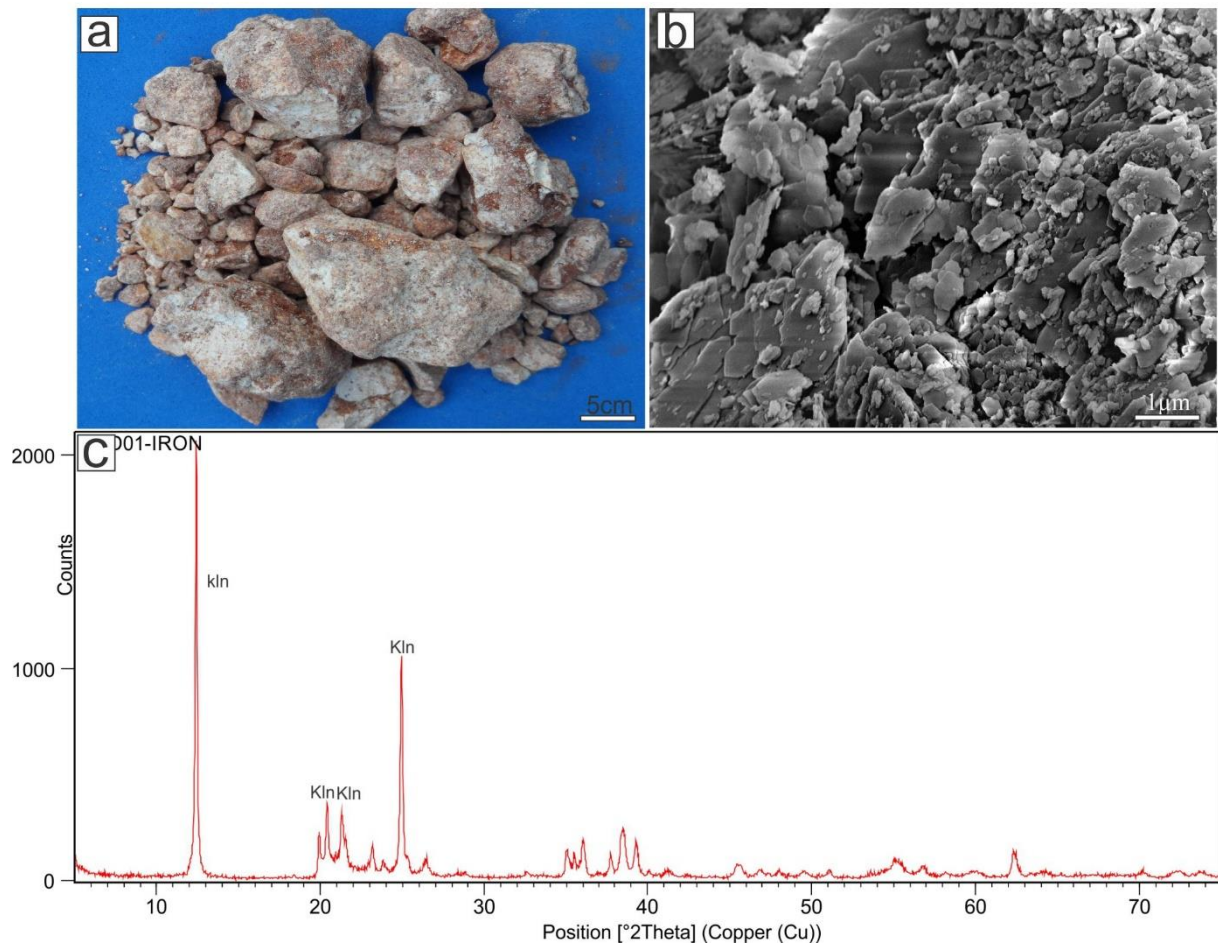


Figure 4- Fragments of kaolin impregnated with a thin film of iron oxyhydroxides. b) Electron photomicrographs of kaolinite aggregates with plate morphology. c) Mineralogical constitution of kaolin determined by XR showing the domain of kaolinite.

5.1.2 Horizonte Argiloso Mosqueado (HAM)

O horizonte HAM se destaca pelas manchas vermelhas de hematita em fundo matricial argiloso branco-acizentado, composto por caulinita (Figura 5a). Neste Horizonte, são comumente encontrados moldes de pseudomorfos de raízes com comprimento maior entre 0,5 e 3cm são frequentes e formados por caulinita, hematita e goethita.

Mesoscopicamente, o horizonte mosqueado é formado por material maciço (Figura 5b), por vezes com cavidades irregulares que variam entre 2 e 10mm e nódulos centimétricos de gibbsita. Microscopicamente, é constituído por plasma caulínico a ferruginoso que perfaz a maior parte da rocha. Agregados de sericita e micro cristais de gibbsita também ocorrem preenchendo parcialmente os poros (Figura 5c). As análises de DRX (Figura 5d) confirmam o domínio de caulinita, com hematita, anatásio e gibbsita mais restritos, com exceção dos nódulos, onde domina a gibbsita.

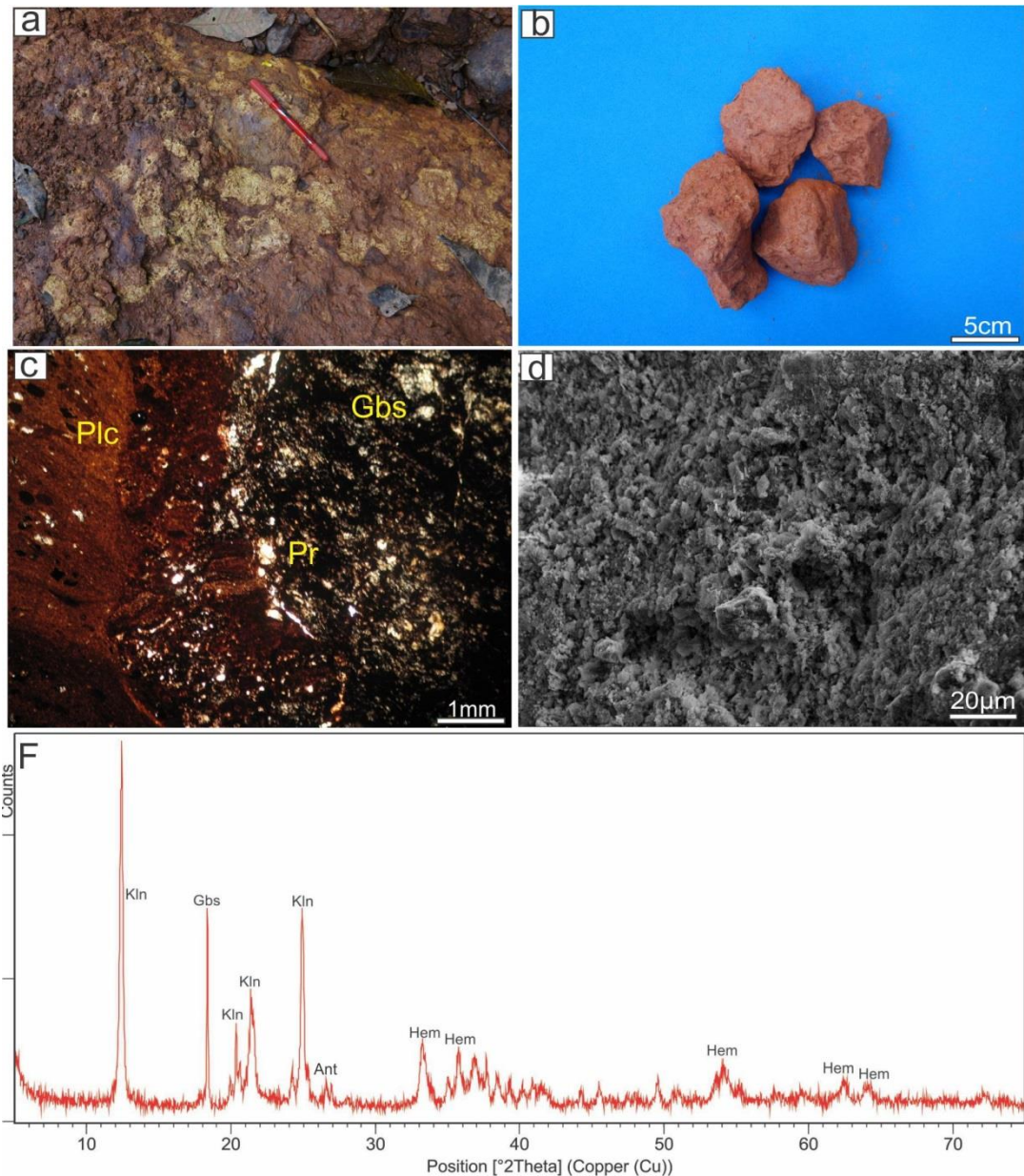


Figure 5- a) Fragment of the material from mottled clayey horizon. b) Small fragments showing the red color. c) Photomicrography of mottled clay, with emphasis on the presence of kaolinite plasma (Plc), gibbsite crystals (Gbs) and pores (Pr). d) Aggregates of gibbsite crystallites in the mottled clay nodules. e) Minerals identified by XRD in the material from the mottled clay horizon. Hem = Hematite; Kln = Kaolinite; Gbs = Gibbsite; Ant = Anatase.

5.1.3 Horizonte de Bauxita Nodular (HBN)

O HBN se sobrepõe ao HAM em contato gradacional e foi delineado apenas no perfil 3 entre o intervalo de 715,8 e 716,3m de altitude. Ele é formado por nódulos de gibbsita, com caulinita e anatásio mais restritos (Figura 6c) de coloração rosada (10R 8/4 na escala de Munsell), com dimensões entre 3 e 6 cm (Figura 6a). Os nódulos estão imersos em uma

matriz pulverulenta composta também por gibbsita e caulinita. Moldes de raízes ocorrem com frequência nesse horizonte, semelhantes as do HAM, embora aqui sejam constituídas de gibbsita e caulinita.

A gibbsita se apresenta neste horizonte, em cristais micrométricos, euédricos, na maioria das vezes em agregados pseudo-hexagonais e por vezes, ao lado de caulinita (Figura 6b).

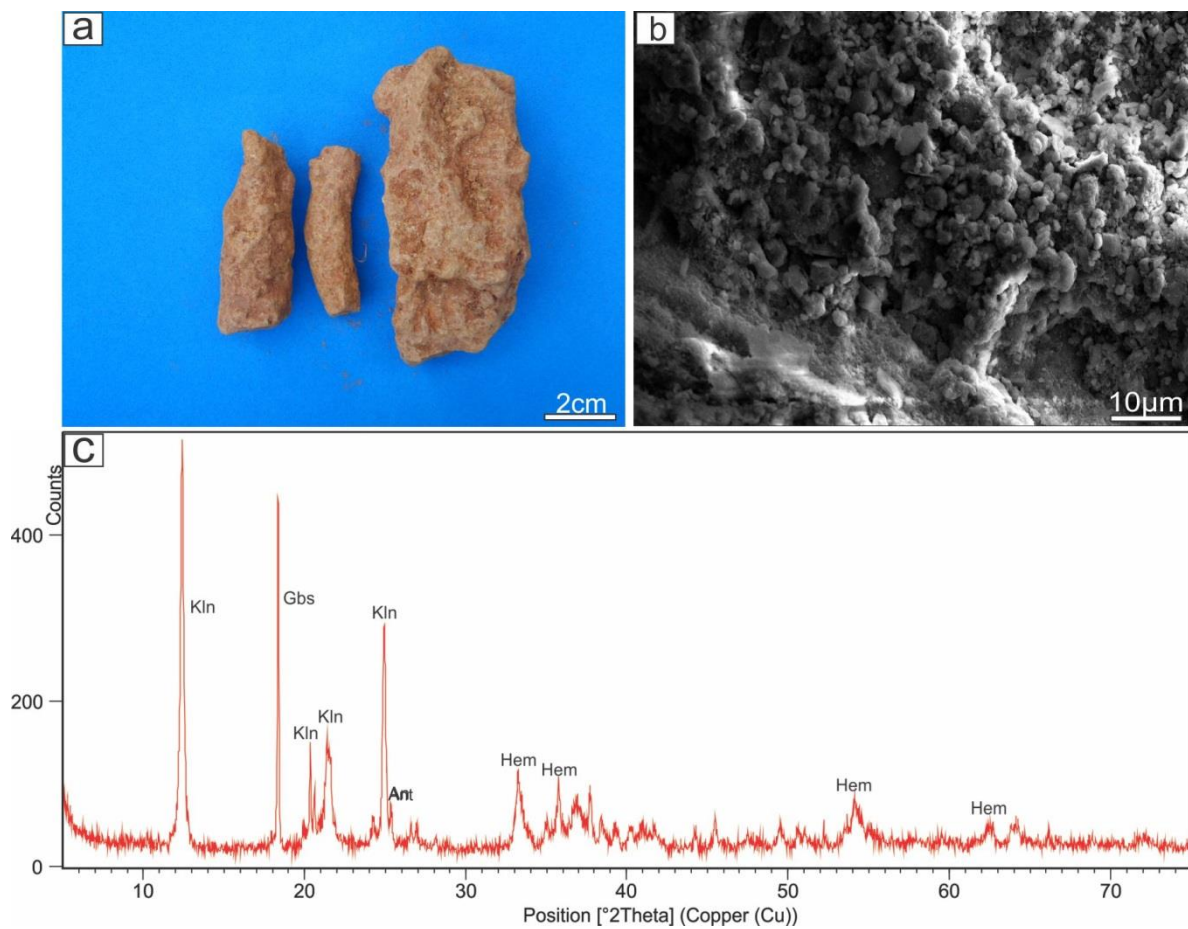


Figure 6- a) Bauxitic nodules of pink color, tubular or prismatic in shape and varying between 2 and 4 cm in length. b) SEM image of meso to micro crystals of gibbsite, together with kaolinite. c) Mineralogical constitution of BN after XRD, showing kaolinite, gibbsite, hematite and anatase. Hem = Hematite; Kln = Kaolinite; Gbs = Gibbsite; Ant = Anatase.

5.1.4 Horizonte Bauxita Argilosa (HBA)

O HBA está em contato gradacional com a HBN (Figura 7a) abaixo, com poucos nódulos gibbsíticos (Figura 7b). Este horizonte tem aspecto untuoso ao tato, cor rosada (10R

6/8 na escala de Munsell) e é constituído de caulinita, gibbsita, hematita e anatásio (Figura 7g), ou seja, similar a composição do horizonte anterior.

São frequentes cavidades irregulares preenchidas parcialmente por gibbsita ou oxihidróxidos de ferro e/ou material argiloso . Nódulos marrons escuros, constituídos provavelmente por hematita, são restritos. A gibbsita (figura 7c) ocorre como cristais submilimétricos bem formados com cor de interferência baixa e por vezes com a presença de maclamento simples e polissintéticos, como também como agregados diminutos de cristais, preenchendo as bordas das cavidades em uma forma similar a uma franja (Figura 7d). Nessas cavidades, entre os dois tipos de cristais de gibbsita geralmente ocorre uma fina película marrom escura, provavelmente de goethita. Nas eletronfotomicrografias, os cristais de gibbsita podem ser visualizados em cristais tanto euédricos como subédricos (Figura 7e, f) .

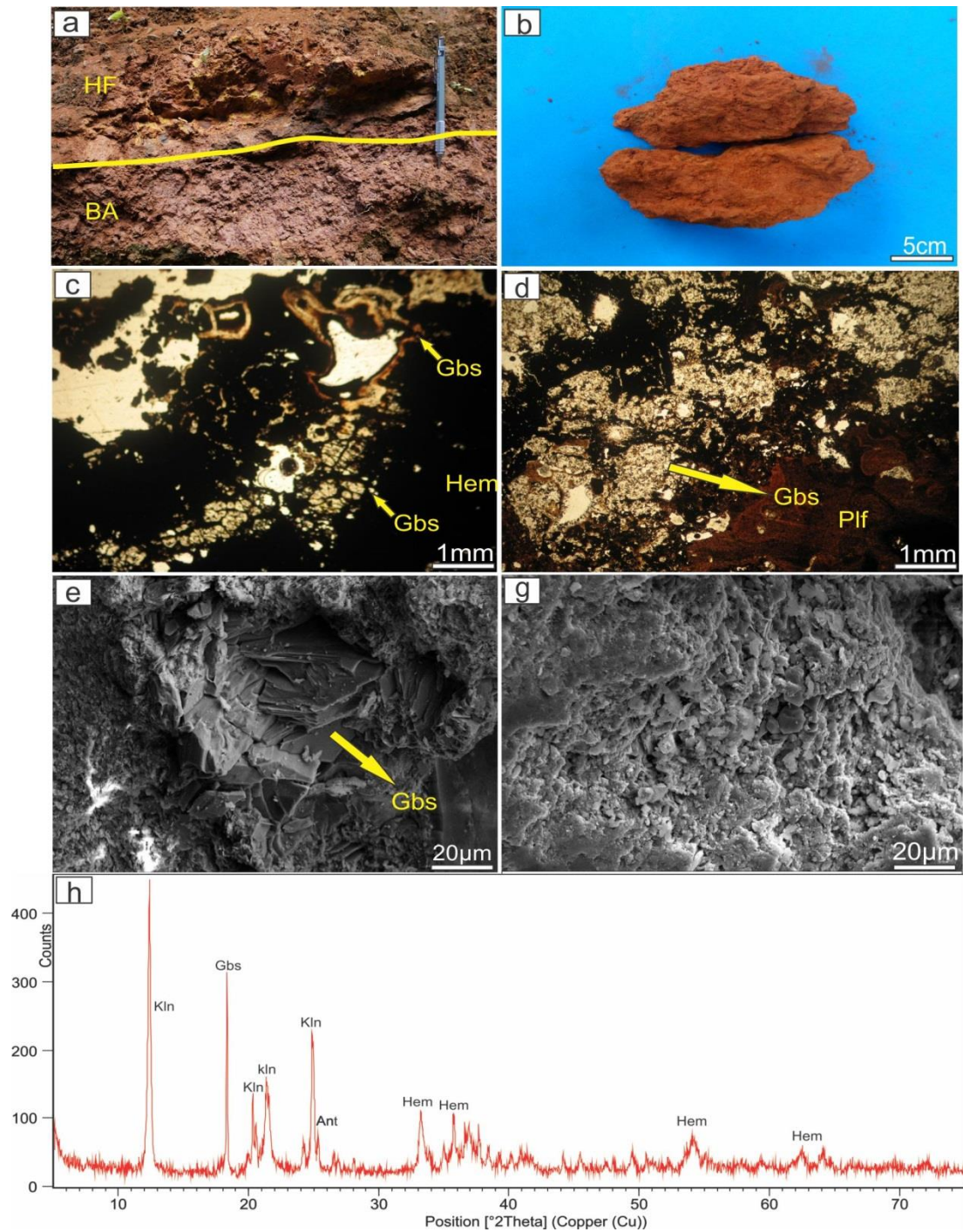


Figure 7- a) Transitional contact between the CF and HBA. b) clayey bauxite fragment. c) Gibbsite under two forms in BM well-developed crystals in the lower part and as tiny crystals partially filling the pores in the upper part. d) Gibbsite crystals in contact with ferruginous plasmas (PLF). e) mesocrystalline kaolinite along pores. f) submicrometric crystals of kaolinite associated to a clay mass. g) Mineralogical constitution of the BM after XRD, showing the presence of kaolinite, gibbsite, hematite and anatase. Hem = Hematite; Kln = Kaolinite; Gbs = Gibbsite; Ant = Anatase.

5.1.5 Crosta Ferruginosa (CF)

A CF, o horizonte mais espesso dos perfis, que varia entre 1,0 e 5,5m., é maciça e de cor vermelha amarronzada (5YR 4/6 na carta de Munsell). Localmente se observa feições tipo laminação paralela e filmes de oxihidróxidos de ferro (Figura 8a). Hematita, goethita, caulinita e gibbsita são seus principais minerais constituintes. Feições nodulares ou pisolíticas marrons escuros variam entre 2 e 4 cm e estão cimentados por um material marrom a marrom avermelhado. Esses nódulos e pisólitos são formados de hematita e goethita e ao mesmo tempo podem estar envoltos por córtex goethítico (Figuras 8a e b). O cimento, por sua vez, também formado por hematita e goethita, além de gibbsita mais subordinada (figuras 8c e d). A gibbsita ocorre somente como diminutos cristais preenchendo parcialmente os poros e ou ainda dispersa e de forma microcristalina.

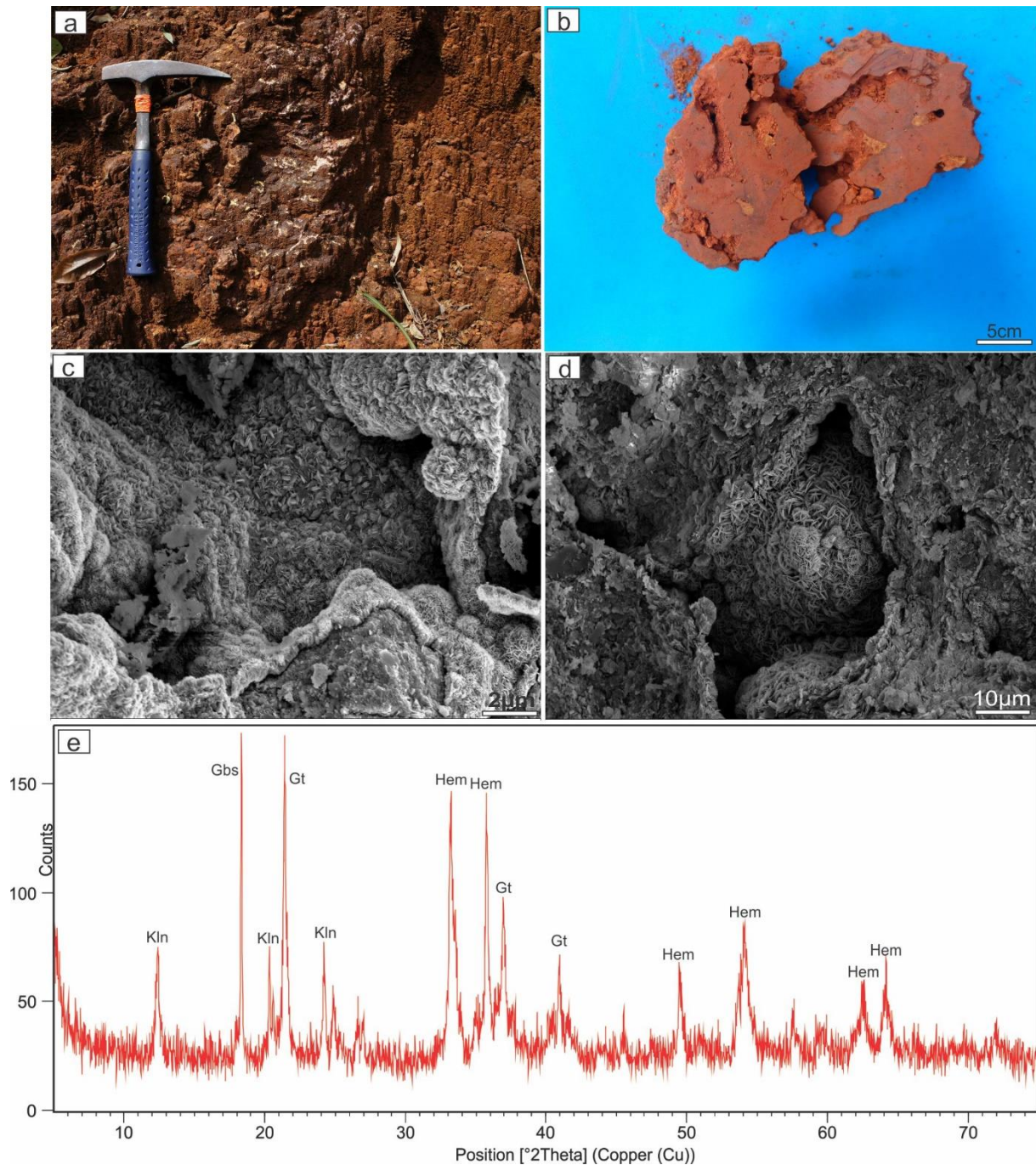


Figure 8- Exponção de ferruginous crust showing possible laminations. b) CF sample displaying the nodular aspect and irregular pores. c) SEM image oxyhydroxide film made of hematite. d) Mesocrystals of hematite with discoid and tabular habit filling pores. e) Mineralogical constitution of CF after XRD analyzes showing the domain of hematite, goethite, gibbsite and some kaolinite. Hem = Hematite; Kln = Kaolinite; Gbs = Gibbsite; Ant = Anatase.

Os nódulos neste horizonte apresentam coloração marrom escura a vermelha e são constituídos por hematita, e por vezes estão envoltos por córtex goethítico ocre microbandado (Figuras 9a e b). Pisólitos ferruginosos também são frequentes e apresentam uma série de córtex alternados entre goethita e hematita (Figuras 9c e d). Tanto nódulos como pisólitos encontram-se imersos em um plasma goethítico a hematítico.

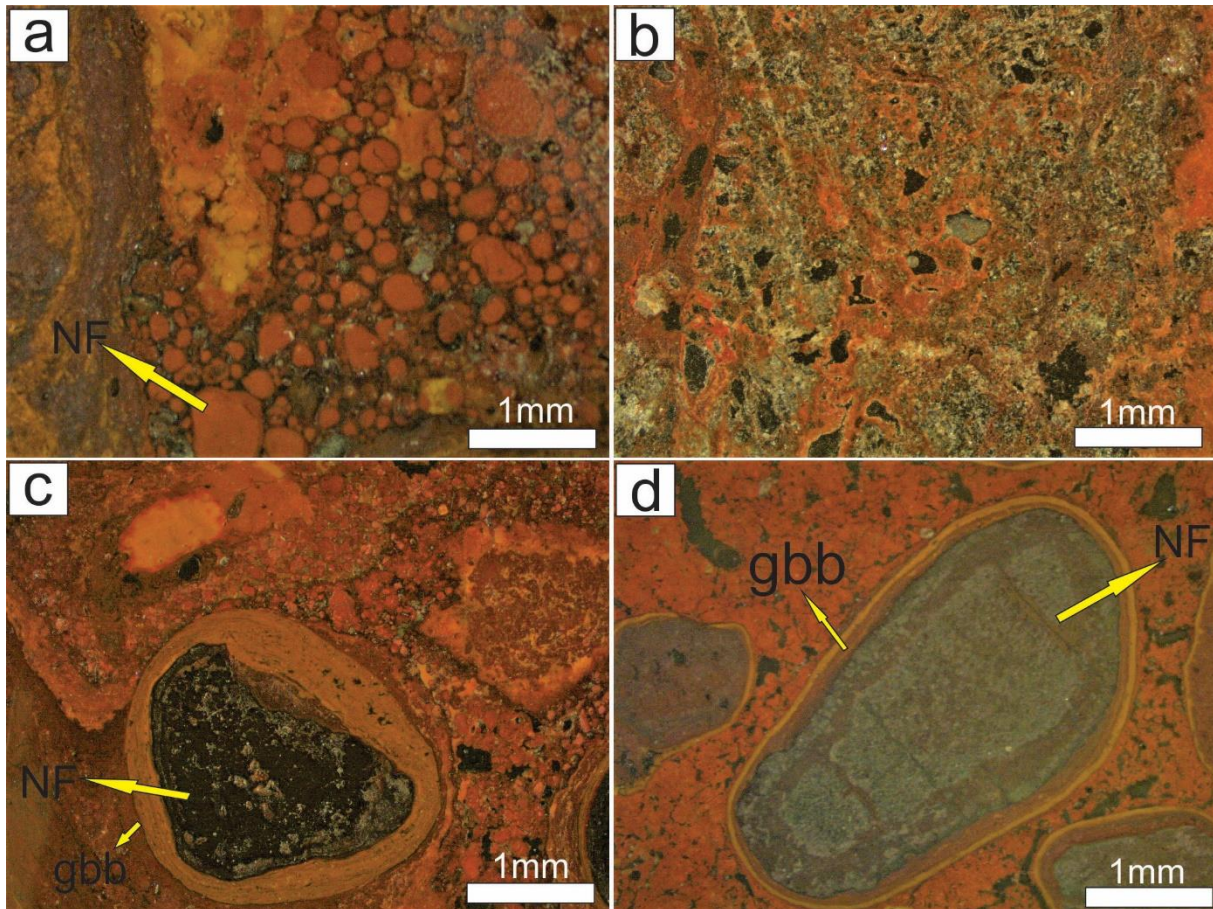


Figure 9- Photomicrography of 0.5 cm CF fragments. a) a fragment of ferruginous nodule (NF) of HF formed by brown submillimeter fragments immersed in ferruginous cement or plasma, both composed of goethite and kaolinite; b) a cavernous iron oxyhydroxides brown plasma with gibbsite partially infilling the wall's cavities; c) and d) micro ferruginous nodules (NF) made of black hematite coated with ochreous goethite and cemented by brown microfragmented cement made of iron oxyhydroxides and some gibbsite (gbb).

5.1.6 Crosta Ferruginosa Desmantelada (CFD)

A CFD ocorre no topo do perfil e atinge cerca de 1 metro de espessura, derivada pelo desmantelamento físico e em parte químico da crosta ferruginosa, uma contribuição principal do intemperismo bioquímico atual, com forte atividade física e química radicular. Este horizonte é formado por nódulos ferruginosos de cor marrom avermelhada (5YR 3/6 na escala de Munsell) incoesos em matriz argilosa marrom amarelada. No conjunto sua constituição mineralógica segundo DRX é dominada por hematita e goethita, além de caulinita e gibbsita, subordinados, e anatásio como acessório (Figura 10c), divergindo da crosta pela maior abundância de caulinita.

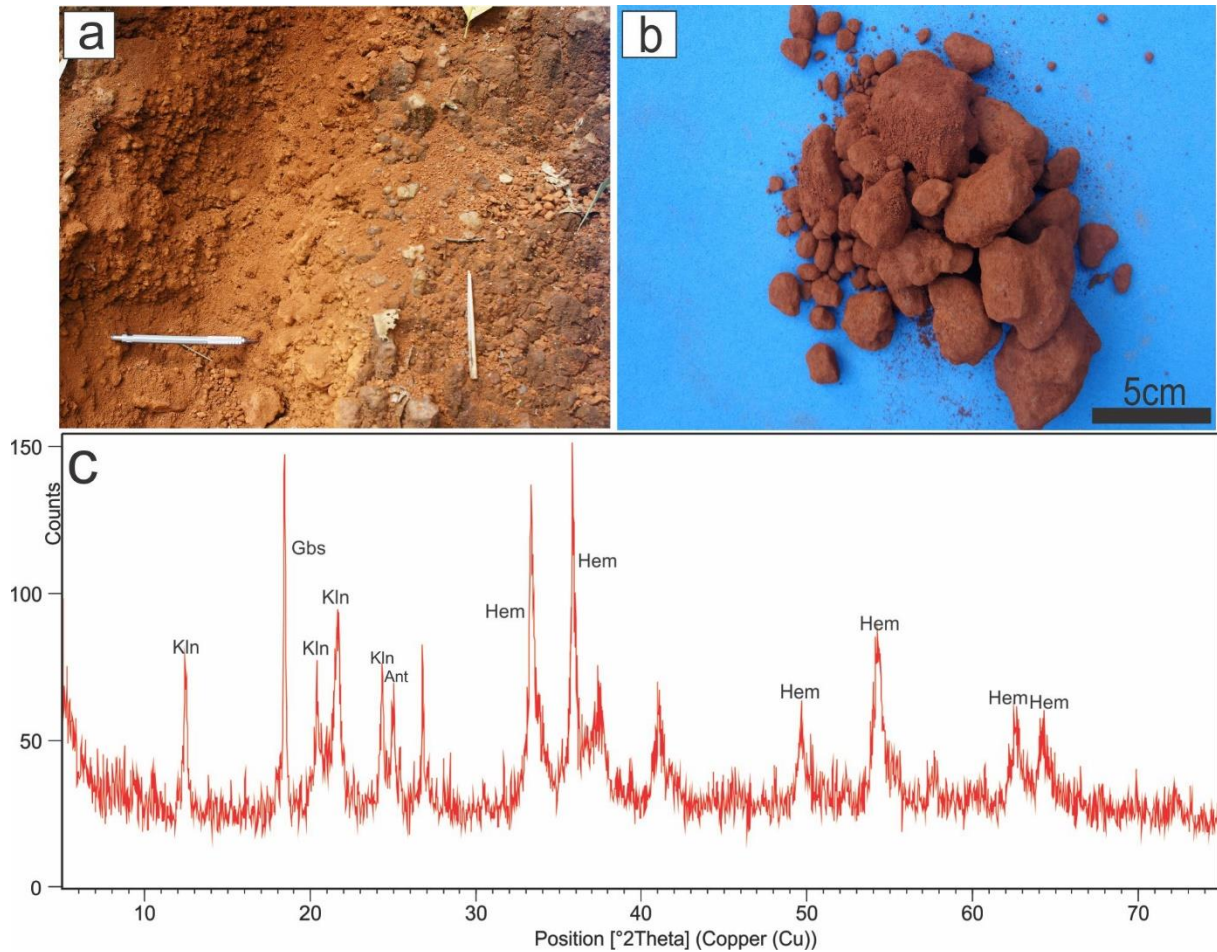


Figure 10- Dismantled ferruginous crust, with presence of ferruginous nodules immersed it to clay matrix. b) ferruginous nodules. c) Mineral constitution of the CFD obtained by XRD. Hem = Hematite; Kln = Kaolinite; Gbs = Gibbsite; Ant = Anatase.

A crosta ferruginosa desmantelada pode representar o intemperismo atual e subatual da crosta ferruginosa em condições climáticas de regime mais úmido, cujos principais registros podem ser identificadas na Serra Sul pela individualização de estruturas colunares, fragmentação da crosta e formação de nódulos ferruginosos, seguindo o esquema de degradação química das crostas proposto por Bardossy & Aleva (1990); Beauvais & Tardy (1993) e Bitton & Volkoff (1993) para as crostas lateríticas de climas quentes e úmidos da África, e amplamente constatadas na Amazônia (Costa & Horbe 2005).

5.2 DISTRIBUIÇÃO DOS MINERAIS PRINCIPAIS NO PERFIL LATERITO-BAUXÍTICO

A distribuição dos teores dos principais minerais nos perfis 1 e 3, obtida através de estequiometria, retrata claramente os horizontes geológicos identificados, e sumariza um clássico perfil laterítico portador de quantidade elevada de gibbsita (Figura 11), que, no entanto, não caracteriza uma composição adequada para ser considerada potencialmente

minério de alumínio, bauxita. A caulinita é o mineral predominante nos horizontes caulínico e mosqueado, o esperado. Nos horizontes superiores, os teores de gibbsita aumentam gradualmente e em conjunto da caulinita compõem a maior parte dos horizontes HBN e HB. Nos horizontes CF e CFD, por sua vez, predominam a hematita e a goethita. O anatásio se mantém em baixas concentrações e quase constantes ao longo do perfil, com leve aumento somente no horizonte HBA, um comportamento normal na maioria dos perfis lateríticos.

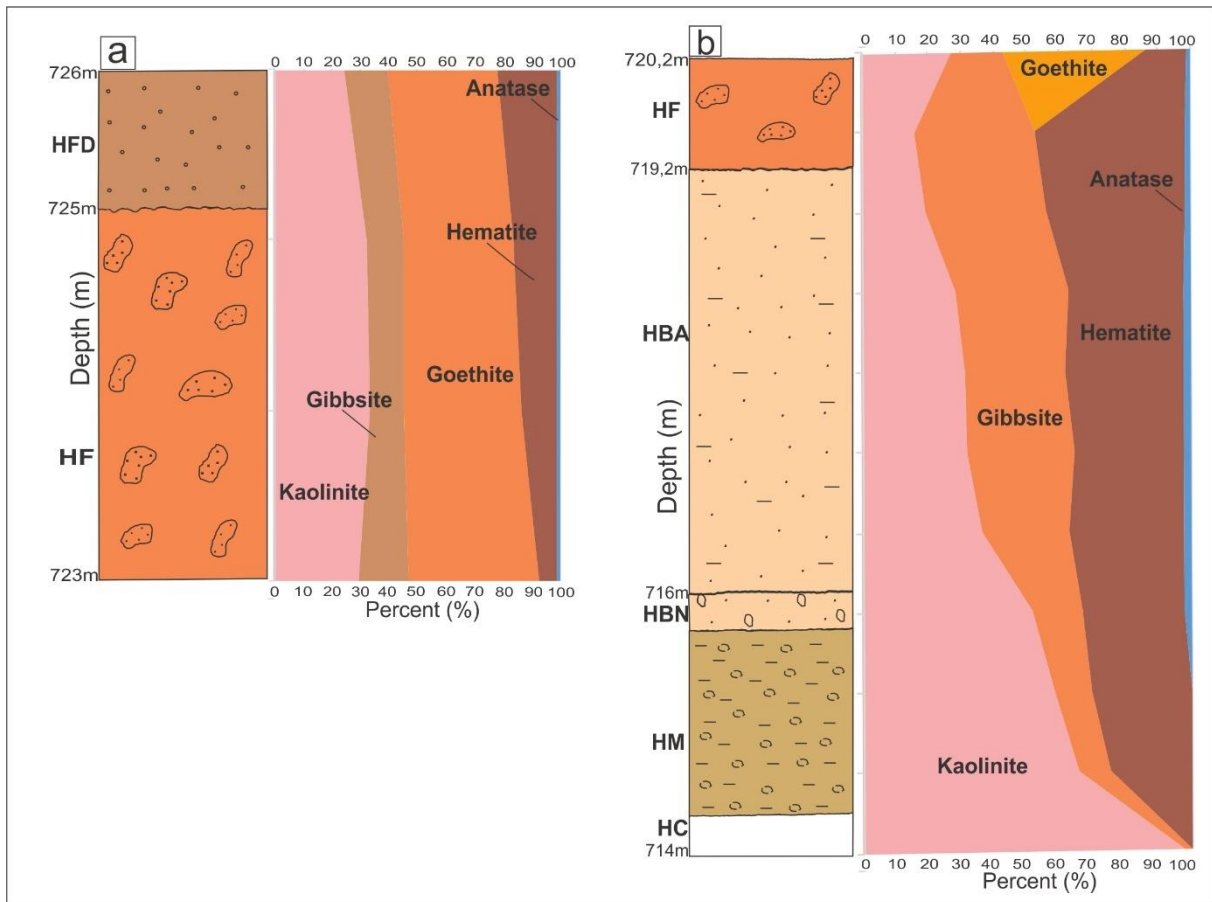


Figure 11 - Main mineral distribution contents along the lateritic-bauxite profiles. a) profile 1. b) profile 3. HFD (Dismantled Crust); HF (Ferruginous Crust); HBA (Clayey Bauxite); HBN (Nodular Bauxite); HM (Mottled Clay); HC (Kaolin).

6 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

6.1 ELEMENTOS MAIORES

Embora todos os horizontes do perfil laterítico-bauxítico sejam constituídos fundamentalmente por Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 e TiO_2 que juntos perfazem em média 83% da composição química e quando somados a perda ao fogo (PF) atingem mais de 99% de toda composição, os seus teores variam muito em cada horizonte discriminando, uma característica típica de perfis lateríticos (Figuras 11 e 12). As concentrações de CaO , MgO , P_2O_5 e MnO são muito baixas, praticamente independente de cada horizonte e em geral já próximas ao limite de detecção, da mesma forma os teores de Na_2O e K_2O . Essas características químicas são muito comuns nos perfis lateríticos portadores de bauxitas na Amazônia (Costa *et al.* 2014).

As concentrações de Fe_2O_3 aumentam acentuadamente do horizonte caulínico (HC) para a crosta ferruginosa (CF), com os aumentos bruscos na interface entre o caulínico e mosqueado e entre a bauxita argilosa e a crosta ferruginosa (Figure 12). Os seus teores representam basicamente hematita e goethita, em que o primeiro se destaca na crosta ferruginosa (CF) e o segundo na crosta ferruginosa desmantelada (CFD). Por outro lado, os teores de Al_2O_3 a partir do horizonte mosqueado (HAM) até o bauxítico argiloso (HBA), não apresentam grandes variações, exceto uma forte queda na transição com o horizonte ferruginoso (CF). Sua concentração está ligada predominantemente a caulinita no horizonte caulínico e mosqueado, enquanto que nos horizontes nodular e bauxítico argiloso, ela se desdobra entre gibbsita e caulinita, quiçá em parte na goethita.

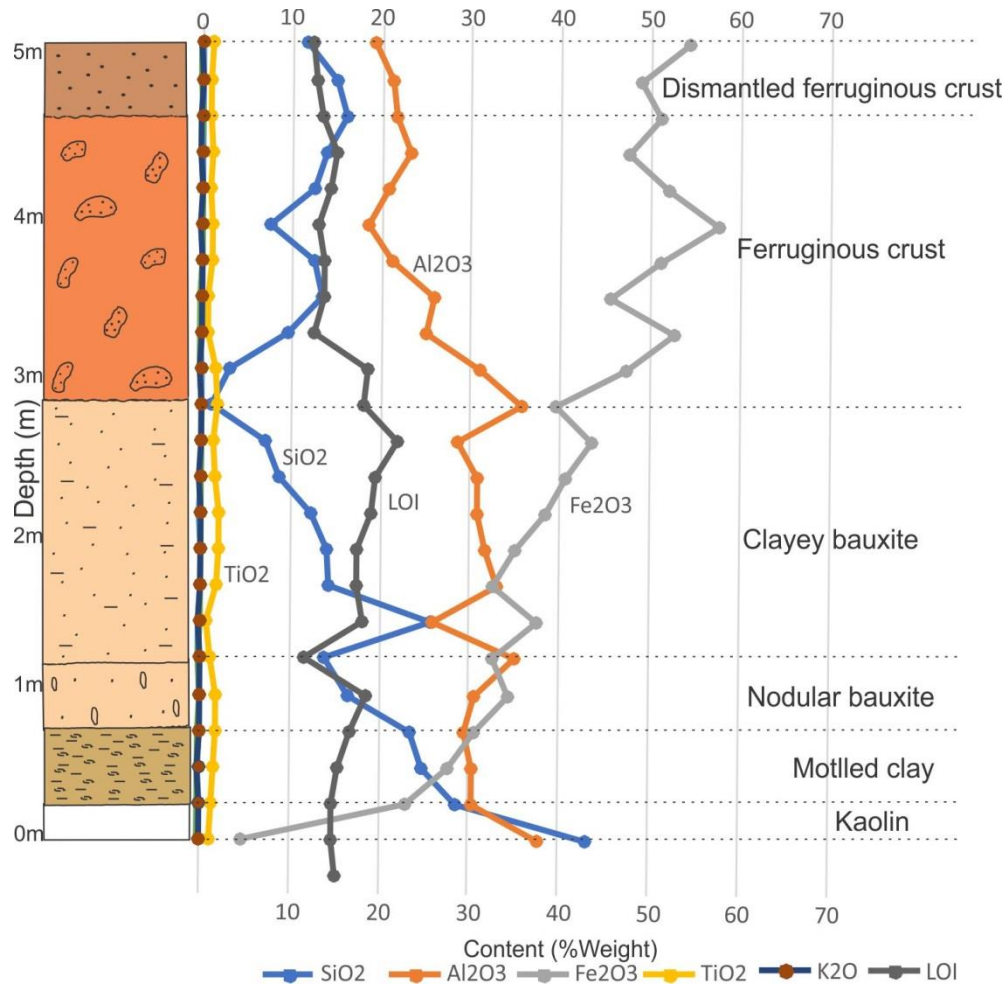


Figure 12- Distribution of the major elements in the samples of the bauxite and lateritic horizons of the profile 3.

Os teores de SiO₂ decrescem acentuadamente da base (horizonte caulínico) até o horizonte de bauxita argilosa, e de forma surpreendente aumenta nos horizontes ferruginosos, onde permanece quase constante em direção a crosta ferruginosa dismantelada. Este comportamento de SiO₂ em crostas parcialmente dismanteladas, com a formação de um material argiloso, rico em caulinita, é comum, em especial nos perfis laterito-bauxíticos da região Amazônica (Costa 1991, Costa *et al.* 1997, Kotschoubey *et al.* 2005) e nas bauxitas de N5, Serra Norte de Carajás (Costa *et al.* 1997). Em alguns casos, quando a alteração é avançada, chega a formar um horizonte argiloso e ferruginoso, portanto dominado por SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, que é conhecido por Argila de Belterra (Costa 1991). Portanto o perfil laterito-bauxítico investigado pode ser comparado com os perfis da Amazônia em geral.

Os valores de TiO₂ aumentam gradual e relativamente do horizonte caulínico até o bauxítico argiloso, 0,72 a 1,94 % e então diminui para aproximadamente 1% nas crostas ferruginosas, o que também está compatível com a maioria dos perfis lateríticos derivados de

rocha de composição químico-mineralógica não heterogênea na estratigrafia (Costa *et al.* 2014).

Os valores de PF aumentam gradualmente do horizonte caulínico ao bauxítico argiloso, o qual é compatível com a formação e concentração crescente de gibbsita. A diminuição dos teores de PF na crosta ferruginosa, representando o domínio da hematita e goethita também está em consonância com uma evolução laterito-bauxítica típica.

Table 1- Chemical concentration of the major and minor elements (%) and trace (ppm) of the representative samples of the profiles and the average composition of the profile samples (MP) compared to the average composition of the upper continental crust (MC) according to Rudnick & Gao (2003) and the average composition of andesites (MA) **. Legend: AS (Average of the profile samples), UCC (Average of crustal), AA (Average of the crustal andesites, according to Xie et al 2018), APR (Average andesites formation Parauapebas, according Olszewski *et al.* 1989), HC (Kaolinic Horizon), HM (Mottling Horizon), HBN (Nodular Bauxitic Horizon), HBA (Clayey Bauxite Horizon), CF (Ferruginous crust) and CFD (Dismantled Crust). * $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ and * $\text{TiO}_2/\text{TiO}_2$. represents the average ratio values between each horizon and the andesites. (continua)

| Profile | 1 | | | | 2 | | 3 | 4 | | | | | | | |
|---|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|-------|
| Horiz. | CFD | CF | | | | | | | | | | | | | |
| Sample | PCA 01 | PCA 02 | PCA 03 | PCA 04 | PCB 01 | PCB 02 | PCC 01 | PCE 01 | PCE 02 | PCE 03 | PCE 04 | AS | UCC | AA | APR |
| SiO ₂ | 11,7 | 14,9 | 16,1 | 13,75 | 12,55 | 7,69 | 12,6 | 13,45 | 9,56 | 13,8 | 25,7 | 15,17 | 66,62 | 58,3 | 55,03 |
| Al ₂ O ₃ | 19,15 | 21,2 | 21,6 | 23,2 | 20,7 | 18,5 | 21,2 | 25,9 | 25 | 35 | 25,9 | 27,7 | 15,4 | 16,4 | 14,25 |
| Fe ₂ O ₃ | 54,1 | 48,8 | 51 | 47,5 | 51,9 | 57,6 | 51 | 45,6 | 52,7 | 32,6 | 37,5 | 40,3 | 5,04 | 3,04 | 11,18 |
| CaO | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 3,59 | 6,3 | 7,53 |
| MgO | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 2,48 | 3,3 | 5,47 |
| Na ₂ O | <0,01 | <0,01 | <0,01 | 0,01 | <0,01 | 0,04 | 0,01 | <0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 3,27 | 3,04 | 4,52 |
| K ₂ O | <0,01 | 0,02 | <0,01 | <0,01 | 0,06 | <0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,07 | 0,05 | <0,01 | 0,04 | 2,8 | | 0,37 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,06 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,04 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,08 | 0,02 | <1 | | |
| TiO ₂ | 1,05 | 0,84 | 0,86 | 1,03 | 0,91 | 1,13 | 1,04 | 0,68 | 0,72 | 1,23 | 0,73 | 1,28 | 0,64 | 0,89 | 0,86 |
| MnO | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | <0,01 | <0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,38 | 0,1 | 0,1 | 0,34 |
| P ₂ O ₅ | 0,14 | 0,09 | 0,08 | 0,1 | 0,22 | 0,28 | 0,16 | 0,08 | 0,15 | 0,08 | 0,04 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,08 |
| SrO | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | | <1 | | |
| BaO | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | | <1 | | |
| LOI | 12,3 | 12,8 | 13,3 | 14,9 | 14,3 | 12,95 | 13,7 | 13,65 | 12,45 | 18,45 | 11,6 | 15,57 | | 1,75 | |
| Total | 98,55 | 98,71 | >102,00 | 100,58 | 100,74 | 98,32 | 99,84 | 99,48 | 100,75 | 101,32 | 101,64 | 100,21 | | | |
| *Al ₂ O ₃ / Al ₂ O ₃ | 1,16 | 1,29 | 1,31 | 1,41 | 1,26 | 1,12 | 1,29 | 1,57 | 1,52 | 2,13 | 1,57 | | | | |
| *TiO ₂ / TiO ₂ | 1,86 | 0,94 | 0,96 | 1,15 | 1,02 | 1,26 | 1,16 | 0,76 | 0,8 | 1,38 | 0,82 | | | | |
| C | 1,04 | 0,19 | 0,4 | 0,74 | 0,77 | 0,54 | 0,87 | 0,15 | 0,11 | 0,46 | 0,1 | 0,43 | <1 | | |
| S | 0,08 | 0,08 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,08 | 0,06 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,04 | | |
| Ba | 4,7 | 3,1 | 2,9 | 3,5 | 4,4 | 8,6 | 5,8 | 7,1 | 8,6 | 8,2 | 5 | 16,7 | 9,4 | 485 | 165 |
| Cr | 400 | 170 | 200 | 200 | 230 | 300 | 230 | 560 | 490 | 450 | 600 | 274 | 92 | | |
| Cs | 0,07 | 0,07 | 0,05 | 0,04 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,09 | 0,04 | 4,9 | | |
| Ga | 41,1 | 34 | 30,9 | 35,1 | 41,2 | 42 | 37,8 | 71,4 | 72,9 | 69,3 | 51,2 | 48,5 | 17,5 | 20,6 | |
| Ge | 5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | 5 | <5 | <5 | | 1,3 | | |
| Hf | 9,5 | 7,1 | 6,7 | 7,8 | 6,2 | 7,7 | 7,1 | 5,9 | 5,4 | 11,4 | 6,1 | 7,5 | 5,3 | 4,66 | 2,94 |
| Nb | 14,7 | 10,4 | 9,7 | 12,8 | 10,7 | 12,7 | 11,6 | 13 | 13 | 23,3 | 13,6 | 13,3 | 12 | 10,9 | |
| Rb | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 1,4 | 2 | 1,4 | 0,8 | 0,6 | 84 | 75,9 | 101 |
| Sn | 4 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 5 | 5 | 7 | 4 | 3 | 2,1 | | |
| Sr | 2,9 | 1,3 | 1,2 | 2 | 4,4 | 11,7 | 2,8 | 3,3 | 4,1 | 6,7 | 4,3 | 4,6 | 320 | 435 | 129 |
| Ta | 1 | 0,8 | 0,8 | 1 | 0,9 | 1 | 0,9 | 1,3 | 1,2 | 2 | 1,2 | 1,1 | 0,9 | 0,8 | 0,79 |
| Th | 25,6 | 13,05 | 15,85 | 15,95 | 16,2 | 21 | 18,45 | 46,9 | 46,4 | 41,2 | 37,3 | 21,2 | 10,5 | 9,4 | 4,57 |
| U | 2,03 | 2,14 | 2,19 | 2,36 | 2,36 | 2,5 | 2,09 | 2,37 | 2,08 | 3 | 1,69 | 2,33 | 2,7 | 1,9 | 1,32 |
| V | 551 | 574 | 897 | 712 | 882 | 690 | 672 | 498 | 586 | 364 | 424 | 608 | 97 | 164 | |
| W | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 1,9 | | |
| Y | 8,1 | 7,6 | 9,8 | 8,5 | 8,9 | 9 | 7,4 | 7 | 6,1 | 11,4 | 5,8 | 9,9 | 21 | 19,6 | |
| Zr | 363 | 273 | 267 | 286 | 228 | 297 | 269 | 221 | 199 | 433 | 226 | 285 | 193 | 165 | |
| As | 16,3 | 9,5 | 17,6 | 10,5 | 9,4 | 6,3 | 6,1 | 52,5 | 57,1 | 45,6 | 25,3 | 13,2 | 4,8 | | |
| Bi | 1,23 | 0,49 | 0,43 | 0,48 | 0,49 | 0,7 | 0,61 | 1,85 | 1,51 | 1,64 | 1,27 | 0,89 | 0,16 | | |
| Hg | 0,236 | 0,152 | 0,168 | 0,099 | 0,14 | 0,133 | 0,183 | 0,172 | 0,235 | 0,236 | 0,401 | 0,119 | 0,05 | | |
| In | 0,191 | 0,114 | 0,135 | 0,164 | 0,206 | 0,202 | 0,217 | 0,236 | 0,269 | 0,225 | 0,191 | 0,201 | 0,056 | | |
| Re | <0,001 | <0,001 | <0,001 | 0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | | <0,001 | | |
| Sb | 0,81 | 0,34 | 0,34 | 0,54 | 0,79 | 0,77 | 0,86 | 1,71 | 1,08 | 1,23 | 0,81 | 0,8 | 0,4 | | |
| Se | 1,2 | 0,7 | 0,9 | <0,2 | 0,3 | <0,2 | <0,2 | 0,6 | 0,7 | 0,2 | 1,2 | 0,7 | 0,09 | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--|
| Te | 1 | 0,25 | 0,24 | 0,3 | 0,47 | 0,24 | 0,23 | 0,35 | 0,26 | 0,93 | 0,41 | 0,25 | 0,02 | | | |
| Tl | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | 0,02 | 0,9 | | | |
| Ag | 0,7 | 0,5 | <0.5 | <0.5 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,8 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,6 | 0,05 | | | |
| Cd | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | | 0,09 | | | |
| Co | <1 | 2 | 7 | 6 | 2 | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | 5 | 17,3 | 22,3 | 43 | |
| Cu | 50 | 150 | 234 | 164 | 170 | 109 | 99 | 10 | 5 | 10 | 15 | 106 | 28 | | | |
| Li | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 30 | 20 | 20 | 20 | 10 | 20 | 18 | 21 | | | |
| Mo | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | 4 | 5 | 3 | 3 | 3 | 1,1 | | | |
| Ni | 12 | 24 | 29 | 26 | 11 | 5 | 8 | 12 | 10 | 7 | 10 | 34 | 47 | 24,2 | 43 | |
| Pb | 9 | 12 | 19 | 13 | 15 | 15 | 13 | 13 | 18 | 5 | 20 | 10 | 17 | 10,3 | | |
| Sc | 24 | 32 | 37 | 28 | 38 | 27 | 27 | 5 | 9 | 6 | 10 | 24 | 14 | 16,3 | 43 | |
| Zn | 10 | 21 | 23 | 22 | 28 | 30 | 16 | <2 | <2 | 3 | 6 | 61 | 67 | | | |
| La | 9,4 | 7,1 | 5,6 | 6,4 | 23,3 | 26,7 | 7,6 | 10,8 | 17,3 | 18,4 | 15,1 | 12,7 | 31 | 29,8 | 10,4 | |
| Ce | 13,4 | 12,5 | 49 | 34,3 | 28,8 | 49 | 13,2 | 9,9 | 14 | 21,5 | 22,5 | 40,7 | 63 | 54,4 | 22 | |
| Pr | 1,86 | 1,48 | 1,4 | 1,31 | 3,29 | 4,06 | 1,24 | 1,52 | 2,7 | 2,47 | 2,27 | 2,02 | 7,1 | 7,3 | | |
| Nd | 5,8 | 4,8 | 5,8 | 4,9 | 8,9 | 10,4 | 4,2 | 4,6 | 7,6 | 7,2 | 6,6 | 6,3 | 27 | 29,4 | 11,86 | |
| Eu | 0,3 | 0,24 | 0,41 | 0,33 | 0,47 | 0,38 | 0,24 | 0,27 | 0,22 | 0,31 | 0,26 | 0,38 | 1 | 1,3 | 0,8 | |
| Sm | 1,13 | 1,01 | 1,38 | 1,31 | 1,76 | 1,98 | 1 | 0,76 | 0,8 | 1,11 | 0,85 | 1,21 | 4,7 | 5,3 | 2,95 | |
| ΣETRL | 31,89 | 27,13 | 63,59 | 48,55 | 66,52 | 92,52 | 27,48 | 27,85 | 42,62 | 50,99 | 47,58 | 63,31 | 132,96 | 127,5 | | |
| Gd | 1,16 | 0,97 | 1,57 | 1,14 | 1,44 | 1,21 | 0,72 | 1,1 | 0,83 | 1,63 | 0,83 | 1,31 | 4 | 4,55 | | |
| Tb | 0,19 | 0,2 | 0,29 | 0,21 | 0,22 | 0,21 | 0,17 | 0,18 | 0,13 | 0,33 | 0,17 | 0,25 | 0,7 | 0,74 | 0,6 | |
| Dy | 1,28 | 1,32 | 1,92 | 1,54 | 1,7 | 1,69 | 1,07 | 1,13 | 1,06 | 1,97 | 0,86 | 1,7 | 3,9 | 3,83 | | |
| Er | 1,03 | 0,98 | 1,32 | 1,13 | 1,32 | 1,29 | 1,12 | 0,8 | 0,72 | 1,21 | 0,79 | 1,46 | 2,3 | 2,07 | | |
| Ho | 0,29 | 0,27 | 0,38 | 0,37 | 0,33 | 0,37 | 0,24 | 0,23 | 0,19 | 0,39 | 0,23 | 0,4 | 0,83 | 0,72 | | |
| Lu | 0,25 | 0,19 | 0,28 | 0,27 | 0,25 | 0,29 | 0,22 | 0,14 | 0,13 | 0,23 | 0,16 | 0,33 | 0,31 | 0,31 | 0,34 | |
| Tm | 0,18 | 0,18 | 0,21 | 0,2 | 0,19 | 0,2 | 0,19 | 0,15 | 0,12 | 0,26 | 0,11 | 0,26 | 0,3 | 0,31 | | |
| Yb | 1,42 | 1,22 | 1,47 | 1,46 | 1,69 | 1,55 | 1,44 | 1,01 | 0,76 | 1,71 | 0,88 | 1,97 | 2 | 2,26 | 2,1 | |
| ΣETRP | 5,8 | 5,33 | 7,44 | 6,32 | 7,14 | 6,81 | 5,17 | 4,74 | 3,94 | 7,73 | 4,03 | 7,68 | 14,34 | 14,79 | | |
| ΣETR (total) | 26,09 | 32,46 | 71,03 | 54,87 | 73,66 | 99,33 | 32,65 | 32,59 | 46,56 | 58,72 | 51,61 | 70,99 | 147,3 | 142,29 | | |
| Zr/ Hf | 38,21 | 38,45 | 39,85 | 36,66 | 36,77 | 38,57 | 37,88 | 37,45 | 36,85 | 37,98 | 37,04 | 38 | 36,41 | 35,40 | | |
| Nb/Ta | 14,1 | 13 | 12,12 | 12,8 | 11,88 | 12,7 | 12,88 | 10 | 10,83 | 11,65 | 11,33 | 12,1 | 10,9 | 13,62 | | |

(Conclusão)

Table 1- Chemical concentration of the major and minor elements (%) and trace (ppm) of the representative samples of the profiles and the average composition of the profile samples (MP) compared to the average composition of the upper continental crust (MC) according to Rudnick & Gao (2003) and the average composition of andesites (MA) **. Legend: AS (Average of the profile samples), UCC (Average of crustal), AA (Average of the crustal andesites, according to Xie et al 2018), APR (Average andesites formation Parauapebas, according Olszewski *et al.* 1989), HC (Kaolinic Horizon), HM (Mottling Horizon), HBN (Nodular Bauxitic Horizon), HBA (Clayey Bauxite Horizon), CF (Ferruginous crust) and CFD (Dismantled Crust). * Al_2O_3/Al_2O_3 and * TiO_2/TiO_2 . represents the average ratio values between each horizon and the andesites.

| Profile | 3 | | 2 | | | | | | | | | | AS | UCC | AA | APR |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|------|-------|
| | HBA | HBA | HBA | | | | | | | HBN | HM | | | | | |
| Horiz. | PCB 03 | PCB 04 | PCC 02 | PCC 03 | PCC 04 | PCC 05 | PCC 06 | PCC 07 | PCC 08 | PCC 09 | PCC 10 | PCD 01 | | | | |
| APR | 3,2 | 1,04 | 7,23 | 8,8 | 12,2 | 14,15 | 14,3 | 16,5 | 23,5 | 24,8 | 28,6 | 43 | 15,17 | 66,62 | 58,3 | 55,03 |
| Al ₂ O ₃ | 31,1 | 35,7 | 28,5 | 30,9 | 30,8 | 31,7 | 33 | 30,6 | 29,5 | 30,4 | 30,4 | 37,7 | 27,7 | 15,4 | 16,4 | 14,25 |
| Fe ₂ O ₃ | 47,2 | 39,5 | 43,5 | 40,6 | 38,4 | 35 | 32,6 | 34,3 | 30,5 | 27,7 | 23 | 4,74 | 40,3 | 5,04 | 3,04 | 11,18 |
| CaO | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 3,59 | 6,3 | 7,53 |
| MgO | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 2,48 | 3,3 | 5,47 |
| Na ₂ O | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | <0.01 | <0.01 | 0,01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0,01 | 0,01 | 3,27 | 3,04 | 4,52 |
| K ₂ O | <0.01 | 0,02 | 0,06 | <0.01 | 0,02 | 0,07 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | <0.01 | 0,06 | 0,07 | 0,04 | 2,8 | | 0,37 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | <1 | | |
| TiO ₂ | 1,48 | 1,7 | 1,4 | 1,61 | 1,92 | 1,94 | 1,76 | 1,73 | 1,74 | 1,6 | 1,39 | 1,17 | 1,28 | 0,64 | 0,89 | 0,86 |
| MnO | 0,03 | 0,01 | 0,05 | 0,06 | 0,11 | 0,05 | 0,06 | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,08 | 0,02 | 0,38 | 0,1 | 0,1 | 0,34 |
| P ₂ O ₅ | 0,2 | 0,11 | 0,1 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,1 | 0,1 | 0,06 | 0,05 | 0,01 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,08 |
| SrO | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | | <1 | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| BaO | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0,01 | <0.01 | <1 | | | |
| LOI | 18,1 | 21,8 | 19,4 | 18,95 | 17,35 | 17,45 | 18 | 16,8 | 15,3 | 14,75 | 14,65 | 15,1 | 15,57 | | 1,75 | |
| Total | 101,39 | 99,97 | 100,37 | 101,12 | 100,95 | 100,51 | 99,92 | 100,18 | 100,77 | 99,39 | 98,29 | 101,86 | 100,21 | | | |
| *Al₂O₃/ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Al₂O₃ | 1,89 | 2,17 | 1,73 | 1,88 | 1,87 | 1,93 | 2,01 | 1,86 | 1,79 | 1,85 | 1,85 | 2,29 | | | | |
| *TiO₂/ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TiO₂ | 1,66 | 1,91 | 1,57 | 1,8 | 2,15 | 2,17 | 1,97 | 1,94 | 1,95 | 1,79 | 1,56 | 1,31 | | | | |
| C | 0,16 | 0,57 | 1,18 | 0,61 | 0,26 | 0,44 | 0,26 | 0,34 | 0,24 | 0,08 | 0,07 | 0,25 | 0,43 | <1 | | |
| S | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,04 | 0,06 | 0,04 | | |
| Ba | 7,6 | 9,3 | 22,3 | 20,5 | 29,1 | 14,3 | 24,7 | 20,8 | 8,9 | 18,8 | 123,5 | 22,6 | 16,7 | 9,4 | 485 | 165 |
| Cr | 270 | 260 | 210 | 210 | 170 | 220 | 180 | 200 | 240 | 170 | 190 | 150 | 274 | 92 | | |
| Cs | 0,06 | 0,01 | 0,06 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | <0.01 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 4,9 | | |
| Ga | 50 | 51,9 | 44,8 | 54 | 55,2 | 58,6 | 54,4 | 53,9 | 51,1 | 46,4 | 42,1 | 29,7 | 48,5 | 17,5 | 20,6 | |
| Ge | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | | 1,3 | | |
| Hf | 8 | 8,5 | 7,6 | 7,9 | 8,4 | 9,4 | 8,5 | 8,1 | 7,9 | 6,9 | 6,3 | 5,1 | 7,5 | 5,3 | 4,66 | 2,94 |
| Nb | 13,4 | 14,1 | 13,1 | 14,2 | 15,7 | 16,2 | 15,2 | 14 | 14,1 | 12,3 | 11,1 | 8,1 | 13,3 | 12 | 10,9 | |
| Rb | <0.2 | <0.2 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 1 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 0,6 | 84 | 75,9 | 101 |
| Sn | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2,1 | | |
| Sr | 14,1 | 16,3 | 4,6 | 4,6 | 3,1 | 3,9 | 3,6 | 3,5 | 2,3 | 2 | 1,1 | 2,7 | 4,6 | 320 | 435 | 129 |
| Ta | 1,1 | 1,1 | 1 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 0,9 | 0,8 | 0,6 | 1,1 | 0,9 | 0,8 | 0,79 |
| Th | 17,45 | 15,6 | 14,75 | 18,9 | 18,15 | 18,95 | 17,15 | 16,5 | 16,4 | 14,95 | 11,5 | 9,17 | 21,2 | 10,5 | 9,4 | 4,57 |
| U | 2,09 | 1,78 | 2,47 | 2,68 | 2,78 | 2,87 | 2,64 | 2,75 | 2,61 | 2,27 | 2,35 | 1,56 | 2,33 | 2,7 | 1,9 | 1,32 |
| V | 838 | 765 | 705 | 629 | 652 | 616 | 575 | 620 | 559 | 474 | 445 | 252 | 608 | 97 | 164 | |
| W | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1,9 | | |
| Y | 9,9 | 9 | 10,5 | 11,2 | 14,1 | 13,8 | 12,1 | 13 | 14,1 | 11,1 | 10,6 | 8,1 | 9,9 | 21 | 19,6 | |
| Zr | 294 | 309 | 282 | 309 | 328 | 342 | 322 | 307 | 301 | 269 | 236 | 199 | 285 | 193 | 165 | |
| As | 2,8 | 3,1 | 6,4 | 5,1 | 5,7 | 4 | 3,7 | 4,6 | 4,5 | 3 | 3,1 | 1,4 | 13,2 | 4,8 | | |
| Bi | 0,31 | 0,27 | 2,37 | 1,74 | 1,14 | 0,72 | 0,68 | 0,79 | 0,5 | 0,47 | 0,35 | 0,3 | 0,89 | 0,16 | | |
| Hg | 0,122 | 0,157 | 0,072 | 0,063 | 0,014 | 0,032 | 0,024 | 0,028 | 0,021 | 0,009 | 0,012 | 0,026 | 0,119 | 0,05 | | |
| In | 0,153 | 0,158 | 0,319 | 0,381 | 0,293 | 0,239 | 0,223 | 0,215 | 0,181 | 0,157 | 0,118 | 0,043 | 0,201 | 0,056 | | |
| Re | <0.001 | <0.001 | 0,001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | 0,001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | | <0.001 | | |
| Sb | 0,55 | 0,85 | 1 | 1,03 | 1,15 | 0,8 | 0,77 | 0,75 | 0,71 | 0,76 | 0,76 | 0,08 | 0,8 | 0,4 | | |
| Se | <0.2 | <0.2 | <0.2 | <0.2 | <0.2 | <0.2 | <0.2 | <0.2 | <0.2 | <0.2 | <0.2 | <0.2 | 0,7 | 0,09 | | |
| Te | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,17 | 0,12 | 0,11 | 0,08 | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,06 | 0,03 | 0,25 | 0,02 | | |
| Tl | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | 0,02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | 0,02 | <0.02 | 0,02 | 0,9 | | |
| Ag | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | <0.5 | 0,6 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | 0,6 | 0,05 | | |
| Cd | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | <0.5 | | 0,09 | | |
| Co | <1 | <1 | 7 | 14 | 8 | 5 | 4 | 5 | 3 | 5 | 5 | 2 | 5 | 17,3 | 22,3 | 43 |
| Cu | 70 | 75 | 163 | 134 | 136 | 156 | 120 | 137 | 155 | 95 | 149 | 33 | 106 | 28 | | |
| Li | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 10 | 20 | 10 | 10 | 10 | <10 | 18 | 21 | | |
| Mo | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | 3 | 1,1 | | |
| Ni | 8 | 4 | 49 | 70 | 83 | 78 | 63 | 80 | 88 | 45 | 53 | 19 | 34 | 47 | 24,2 | 43 |
| Pb | 9 | 7 | 4 | <2 | 6 | 3 | 5 | 2 | <2 | <2 | 10 | 4 | 10 | 17 | 10,3 | |
| Sc | 25 | 14 | 30 | 20 | 18 | 29 | 23 | 27 | 28 | 32 | 30 | 23 | 24 | 14 | 16,3 | 43 |
| Zn | 35 | 24 | 79 | 94 | 138 | 149 | 108 | 137 | 155 | 62 | 89 | 50 | 61 | 67 | | |
| La | 24,3 | 28,2 | 8,2 | 8,9 | 9,8 | 11,7 | 10,4 | 9,9 | 9,6 | 9,8 | 6,9 | 5,7 | 12,7 | 31 | 29,8 | 10,4 |
| Ce | 51,3 | 50,4 | 27,4 | 34,2 | 133 | 60,3 | 57,2 | 60,5 | 49,7 | 43,9 | 88,8 | 11,4 | 40,7 | 63 | 54,4 | 22 |
| Pr | 4,03 | 4,06 | 1,47 | 1,53 | 1,73 | 1,83 | 1,67 | 1,62 | 1,56 | 1,46 | 1,28 | 0,66 | 2,02 | 7,1 | 7,3 | |
| Nd | 10,9 | 11,1 | 4,9 | 5,1 | 5,4 | 6,6 | 5,6 | 6 | 6,1 | 5,2 | 4,8 | 2,7 | 6,3 | 27 | 29,4 | 11,86 |
| Eu | 0,48 | 0,4 | 0,38 | 0,37 | 0,46 | 0,57 | 0,47 | 0,47 | 0,53 | 0,55 | 0,39 | 0,25 | 0,38 | 1 | 1,3 | 0,8 |
| Sm | 1,61 | 1,52 | 1,19 | 1,08 | 1,39 | 1,12 | 1,35 | 1,35 | 1,45 | 1,2 | 1,18 | 0,67 | 1,21 | 4,7 | 5,3 | 2,95 |
| ΣETRL | 92.62 | 95.68 | 43.54 | 51.18 | 151.78 | 82.12 | 76.69 | 79.84 | 68.94 | 62.11 | 103.35 | 21.38 | 63,31 | 132,96 | 127,5 | |
| Gd | 1,37 | 1,47 | 1,38 | 1,23 | 1,33 | 1,86 | 1,6 | 1,69 | 1,89 | 1,52 | 1,26 | 0,85 | 1,31 | 4 | 4,55 | |
| Tb | 0,23 | 0,25 | 0,24 | 0,29 | 0,32 | 0,38 | 0,3 | 0,33 | 0,36 | 0,25 | 0,33 | 0,18 | 0,25 | 0,7 | 0,74 | 0,6 |
| Dy | 1,73 | 1,84 | 1,76 | 1,94 | 2,07 | 2,59 | 2,25 | 2,11 | 2,44 | 1,88 | 1,96 | 1,19 | 1,7 | 3,9 | 3,83 | |
| Er | 1,46 | 1,74 | 1,7 | 1,67 | 2,12 | 2,22 | 1,78 | 2,01 | 2,24 | 1,83 | 1,82 | 1,39 | 1,46 | 2,3 | 2,07 | |
| Ho | 0,4 | 0,4 | 0,44 | 0,43 | 0,53 | 0,61 | 0,53 | 0,52 | 0,65 | 0,52 | 0,48 | 0,31 | 0,4 | 0,83 | 0,72 | |
| Lu | 0,36 | 0,42 | 0,31 | 0,38 | 0,55 | 0,52 | 0,51 | 0,52 | 0,48 | 0,47 | 0,39 | 0,3 | 0,33 | 0,31 | 0,31 | 0,34 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-----|
| Tm | 0,28 | 0,26 | 0,28 | 0,33 | 0,38 | 0,39 | 0,37 | 0,37 | 0,43 | 0,33 | 0,31 | 0,24 | 0,26 | 0,3 | 0,31 | |
| Yb | 1,96 | 2,45 | 2,12 | 2,41 | 2,94 | 3,1 | 2,71 | 2,97 | 3,28 | 2,65 | 2,49 | 1,53 | 1,97 | 2 | 2,26 | 2,1 |
| ΣETRP | 7,79 | 8,83 | 8,23 | 8,68 | 10,24 | 11,67 | 10,05 | 10,52 | 11,77 | 9,45 | 9,04 | 5,99 | 7,68 | 14,34 | 14,79 | |
| ΣETR | | | | | | | | | | | | | | | | |
| (total) | 100,41 | 104,51 | 51,77 | 59,86 | 162,02 | 93,79 | 89,74 | 90,36 | 80,71 | 71,56 | 112,39 | 27,37 | 70,99 | 147,3 | 142,29 | |
| Zr/ Hf | 36,75 | 36,35 | 37,1 | 39,11 | 39,04 | 36,38 | 37,88 | 37,9 | 38,1 | 38,98 | 37,46 | 39,01 | 38 | 36,41 | 35,40 | |
| Nb/Ta | 12,18 | 13,5 | 12,9 | 12,81 | 14,27 | 13,5 | 13,81 | 12,72 | 12,81 | 13,66 | 13,87 | 13,5 | 12,1 | 10,9 | 13,62 | |

** Rudnick & Gao (2003) and the average composition of the andesites (MA), according to Xie *et al.* (2018).

A composição química do perfil, com ênfase nos três componentes principais SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 (Figura 13a) mostram que o perfil estudado se enquadra classicamente dentro da evolução de perfil laterítico, em que a lateritização atingiu sua intensidade extrema. Ao mesmo tempo demonstra que a zona bauxítica varia de ferrita bauxítica a levemente bauxita ferruginosa (Figura 13b).

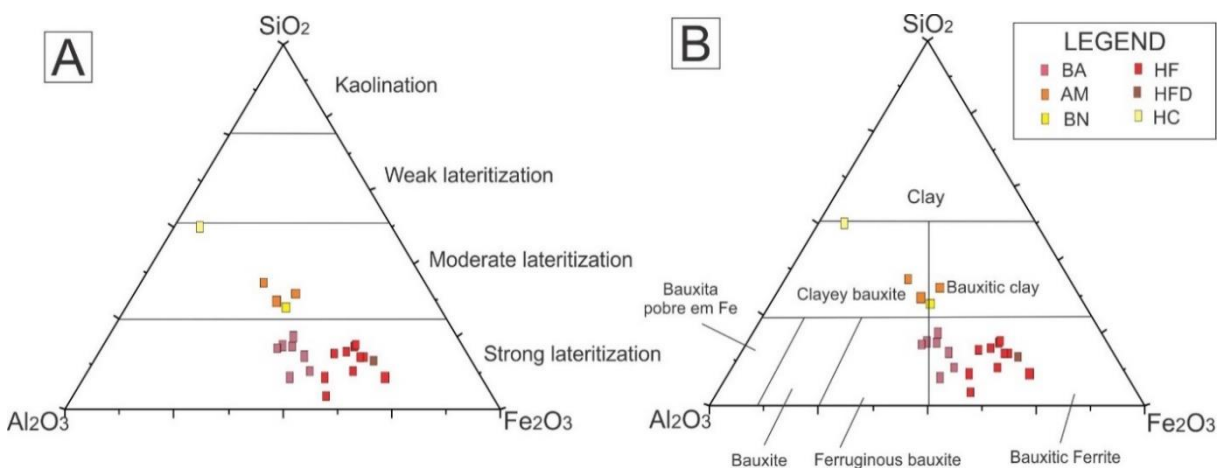


Figure 13- A) A chemical diagram showing the intensity of lateritization processes for studied profile, based on Schellmann (1983). B) Horizon's classification after chemical composition of the studied lateritic profile at Serra Sul, based on Bárdossy (1982).

6.2 ELEMENTOS TRAÇOS

Os perfis apresentam uma grande variação na concentração dos elementos traços analisados. Se comparados com os valores médios da crosta superior da Terra (UCC) (Figura 14), elementos como V, Cr, Cu, Ga, As, Zr, Cd, Hf, Bi e Th encontram-se concentrados em todos os horizontes, principalmente nas crostas ferruginosas. Já Co, Zn, Se, Rb, Sr, Nb, Ag, Sn, Cs, Ba, Pb estão em concentrações inferiores à média crustal ou mesmo próximas ao limite de detecção, e suas maiores concentrações nos horizontes inferiores, com domínio dos minerais de argila. Por sua vez, Sc, Ni, Mo, Sb, Ta e U apresentam valores que vão desde inferiores até superiores ao da UCC, em que Ni, Mo, Sb, Ta tem suas maiores concentrações nos horizontes ferruginosos, ligados assim aos oxi-hidróxidos de Fe, comportamento típico de perfis lateríticos (Horbe & Costa 2005, Costa *et al.* 2014).

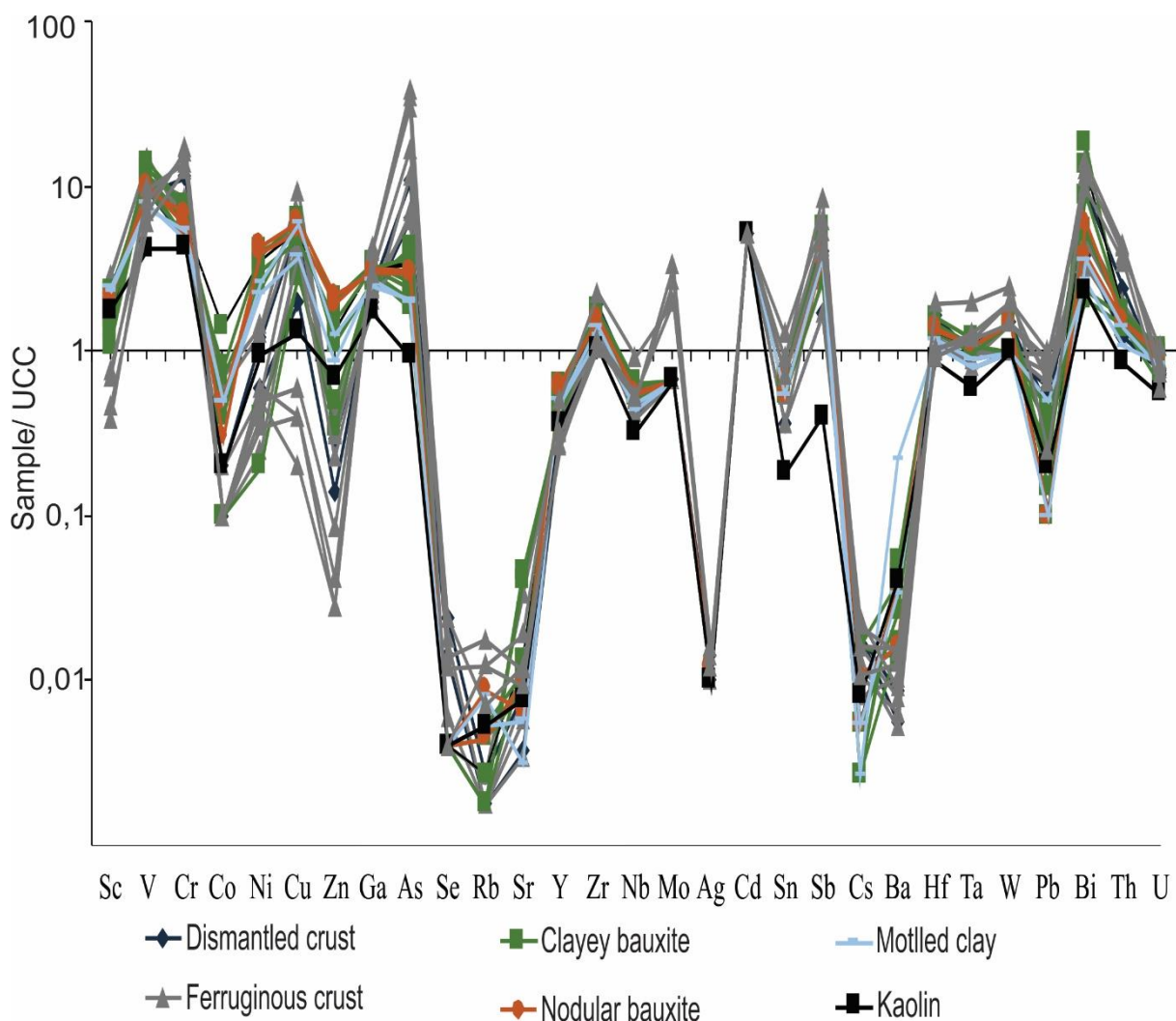


Figure 14- Distribution pattern of trace element contents normalized to UCC of Rudnick & Gao (2003).

Essas curvas de distribuição dos elementos traços normalizados à média da crosta superior (UCC) mostram em geral um forte paralelismo (Figura 14) entre todos os horizontes, com raras exceções (em parte para Sc, Ni, Mo, Sb, Ta e U), sugerindo assim que estes horizontes guardam forte afinidade química entre si, ou seja, uma forte interdependência também química, além da mineralógica, já apresentada anteriormente. Esse padrão de distribuição é recorrente em perfis lateríticos maduros (Costa *et al.* 2014, Silva & Costa 2020).

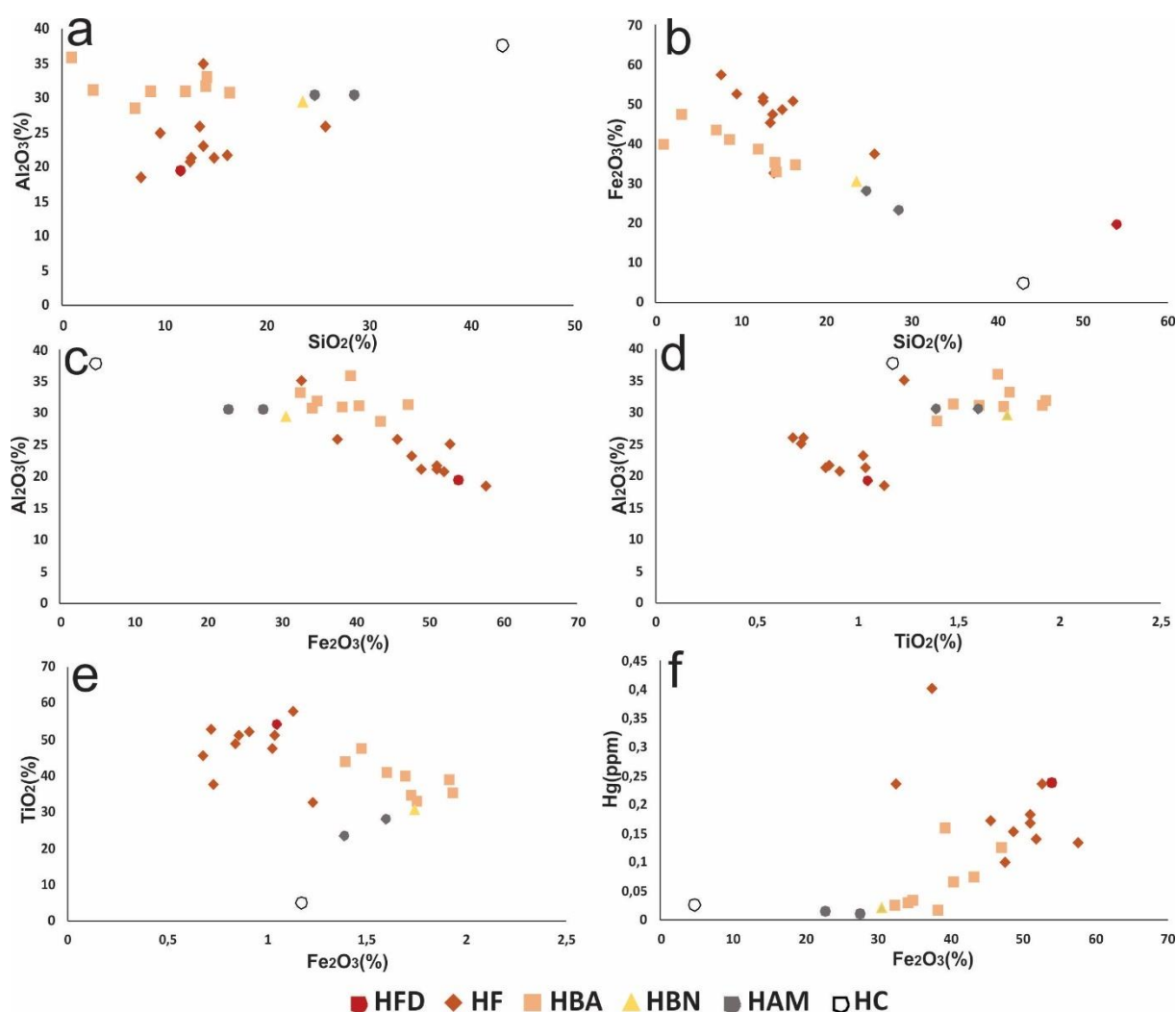


Figure 15- Scatter diagrams showing the positive correlation between Fe₂O₃ and some trace elements and major elements A) Al₂O₃ x Fe₂O₃; b) SiO₂ x Al₂O₃; c) TiO₂ x Al₂O₃ d) Sb x Fe₂O₃; e) Hg x Fe₂O₃; f) Bi x Fe₂O₃.

Os diagramas de dispersão mostram tendência a correlação positiva TiO₂ x Al₂O₃, que indica um acúmulo residual entre estes elementos ao longo de todo o perfil, um fato típico da lateritização com formação continuada de caulinita/gibbsita e anatásio (Figura 15). A correlação negativa Fe₂O₃ x SiO₂ fortalece a distribuição antagônica entre estes

elementos-óxidos, representando a lixiviação da sílica, principalmente da transformação da caulinita em gibbsita e o enriquecimento absoluto em ferro, com formação de hematita e goethita (Costa *et al.* 2016), reforçando ainda mais a natureza laterítica maduro do perfil investigado.

A tendência a linearidade negativa entre Al_2O_3 x Fe_2O_3 demonstra um padrão numa evolução contínua no perfil, em que o primeiro desenvolve os horizontes ricos em gibbsita, e o segundo com o contínuo aumento do seu conteúdo leva a formação das crostas ferruginosas. O decréscimo dos teores de SiO_2 da base até o horizonte de bauxita argilosa, com substancial aumento na crosta ferruginosa são compatíveis com a maioria dos perfis descritos na região amazônica (Costa *et al.* 2014, Costa *et al.* 2016, Kotschoubey *et al.* 2005).

A excelente correlação positiva do Zr x Hf (Figura 16) sugere que zircão seja o único mineral portador de Zr e Hf e que até mesmo esse mineral seja proveniente de uma única fonte primária, cuja razão Zr/Hf em média 38,4 (Tabela 1), se equivale à razão média da crosta superior da Terra, de rochas sedimentares que tiveram como fonte rochas com composição similar ou igual. As correlações também positivas e significativas de Zr com Y, Nb, Ta e U (Figura 16), também sugerem que esses elementos estejam na estrutura do zircão. A forte correlação positiva TiO_2 x Zr por sua vez reforça que seus respectivos minerais se acumulam residualmente no perfil respectivamente como anatásio e zircão, como tem sido observado por (Costa *et al.* 2014, Horbe & Costa 1999, Liu *et al.* 2010 e Santos *et al.* 2016).

A correlação positiva Fe_2O_3 x Hg, além de Fe_2O_3 com V, As, Bi, Sb, Mo entre outros, demonstra que os mesmos se acumulam de forma absoluta, acomodando-se nos oxihidróxidos de Fe, também já claramente demonstrado em perfis lateríticos (Costa *et al.* 2014).

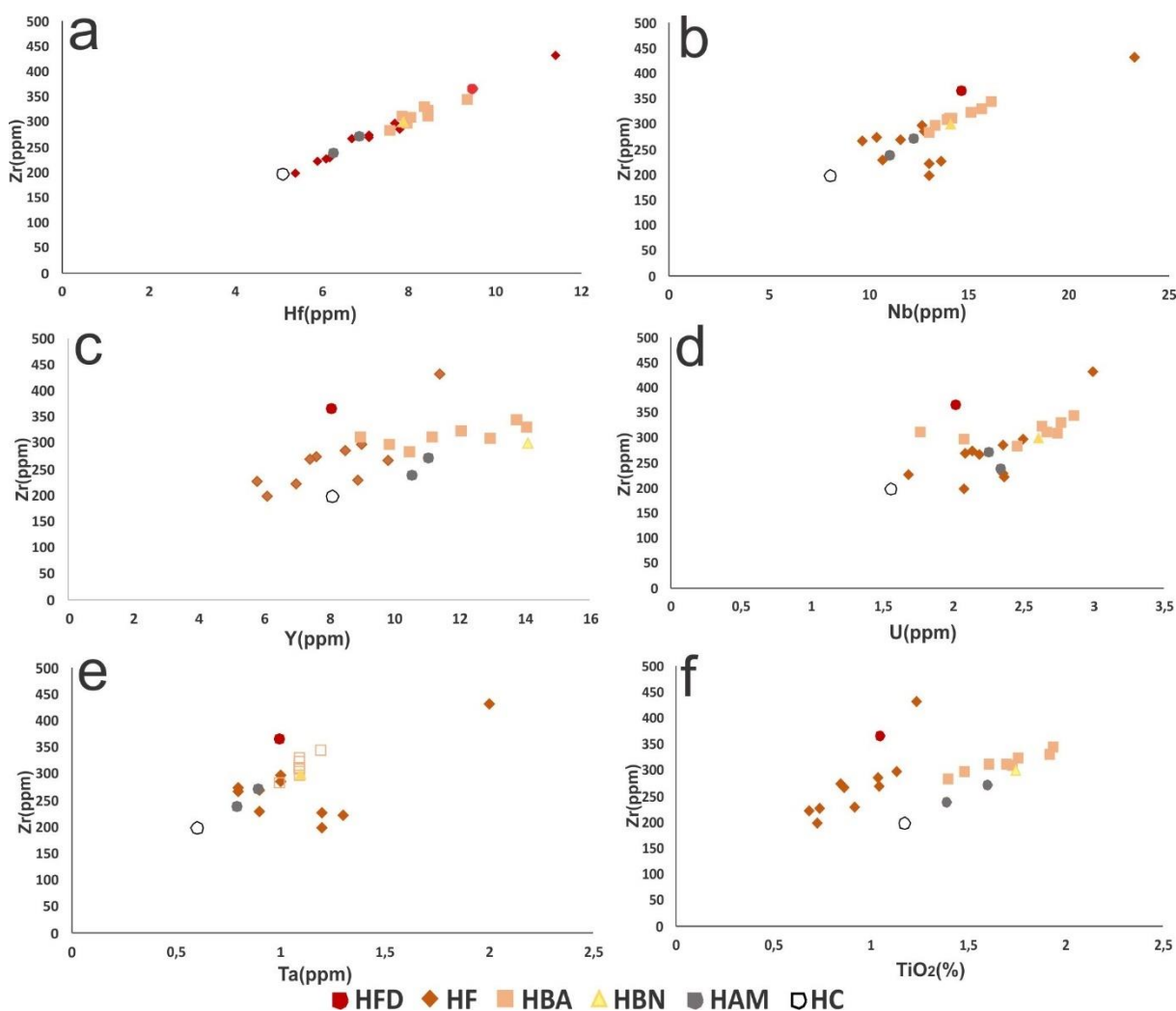


Figure 16- Scatter diagrams showing the positive correlation between Zr and some trace elements and TiO_2 . a) Zr x Hf; b) Zr x Y; c) Zr x Ta; d) Zr x Nb; e) Zr x TiO_2 ; f) Zr X U.

A análise multivariada de componentes principais (PCA) (figura 17) fatores 1 e 2, permitiu fortalecer as principais afinidades químicas nos perfis investigados. Nos quadrantes NW (fator 2 positivo e fator 1 negativo) e SW (fator 2 negativo e fator 1 negativo) agregam-se os elementos com forte afinidade ao elemento dominante Fe_2O_3 , ou seja, aos oxí-hidróxidos hematita + goethita, com enriquecimento para o topo do perfil. No quadrante NE (fator 2 positivo e fator 1 positivo) os elementos acumulados relativamente, tendo Al_2O_3 como principal, na forma de gibbsita, neoformada, e TiO_2 como anatásio, da mesma forma acumulado relativamente, e aqueles ligados ao resistato zircão, Zr, Nb, Nb, Ta, REE. No quadrante SE (fator 2 negativo e fator 1) no limiar com o NE destacam-se os elementos químicos de alta mobilidade e lixiviados, SiO_2 , K_2O , Na_2O , CaO , MgO , Ba, Cu, Sc, ainda parcialmente presentes nos horizontes caulínico e mosqueado, como minerais de argila e possíveis micáceos.

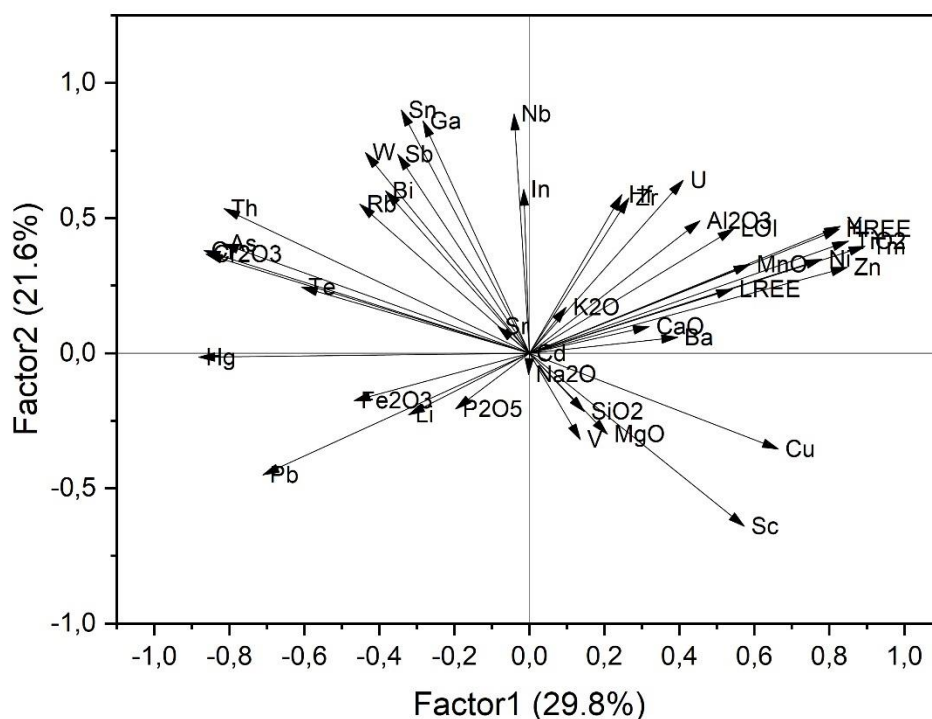


Figure 17- Principal Component Analysis of the raw chemical data of all lateritic horizons.

6.3 ELEMENTOS TERRAS RARAS

As concentrações dos elementos terras raras estão próximas ou logo abaixo da média crustal (UCC) e os seus teores são muito oscilantes e parecem não depender dos horizontes, mas os valores mais baixos foram observados no horizonte caulínico. As concentrações dos ETRL atingem até 151 ppm enquanto os ETRP 11,77 ppm. As curvas normalizadas aos condritos apresentam padrões muito semelhantes entre si, com forte enriquecimento relativo nos ETRP (Figura 18), exceto a do caulim. Além disso, essas curvas exibem anomalia positiva de Eu e fortes anomalias positiva e negativas de Ce (Figura 18), que marcam a diferença entre as curvas da bauxita argilosa (anomalia negativa) dos demais horizontes (anomalias positivas). Anomalias positivas de Ce são frequentes em perfis lateríticos (Braun *et al.* 1990, Liu *et al.* 2010, Wang *et al.* 2013), a exemplo de vários perfis da Amazônia (Costa & Araújo 1997, Costa *et al.* 2014, Kotschoubey *et al.* 2005). A exceção se faz fortemente para o horizonte caulínico e em parte ao horizonte bauxita argilosa. A forte anomalia positiva de Ce é característica de perfis lateríticos e em geral representa a presença de neoformação de nanocristais de cerianita, que não foi detectada nas amostras investigadas, se presente, estaria em baixíssimas concentrações, a deduzir pelos teores de

Ce. Por sua vez a anomalia positiva de európio, que está presente em todas amostras investigadas, o que sugere ser herdada, ao lado do enriquecimento em ETRP, reforça que parte dos ETR, principalmente os ETRP, esteja ligada ao zircão por relação com o trabalho de Su *et al.* (2017).

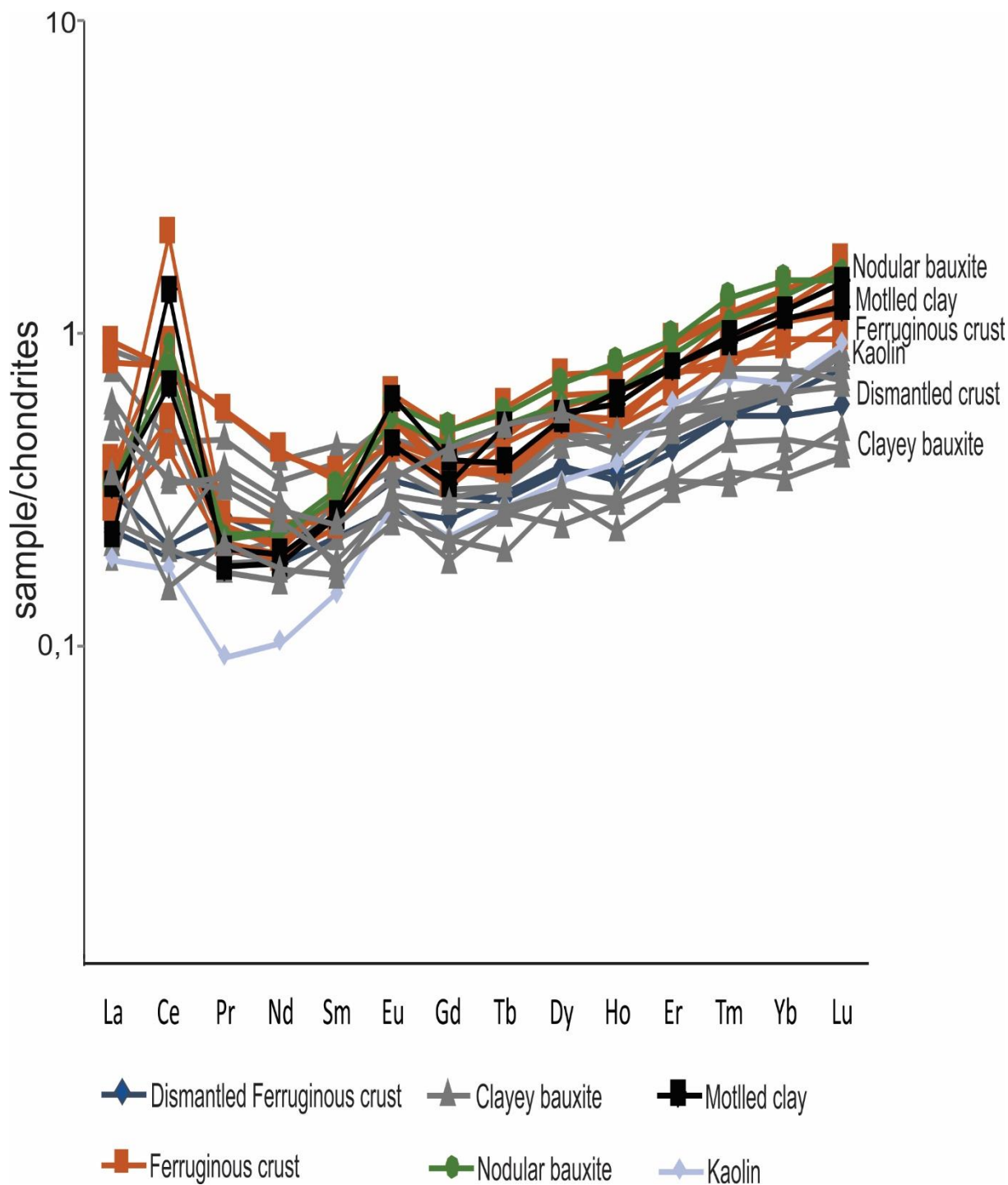


Figure 18- Concentration distribution patterns REE normalized to chondrites.

6.4 BALANÇO DE MASSA

A mobilidade dos elementos químicos em perfis lateríticos pode ser avaliada a partir da metodologia de Nesbit (1979), onde os elementos imóveis servem de parâmetro para o cálculo de balanço de massas, seguindo a fórmula:

$$[(X/I) \text{ weathered}/(X/I) \text{ parent} - 1] \times 100$$

Onde “x” é a concentração dos elementos ou compostos químicos móveis na rocha são e intemperizada e “I” seria a concentração do componente imóvel, que neste trabalho foram adotados o titânio e o alumínio como elementos imóveis, demonstrados pelas isóconas (Figura 19). Os resultados obtidos do balanço de massa considerando a UCC e a média dos andesitos como possível rocha-mãe, estão resumidos na tabela 2. Optou-se pelo balanço de massa considerando também os andesitos, tendo em vista que a presença do horizonte caulínico na base, assim como do mosqueamento no horizonte argiloso, evidenciam a forte afinidade química com rochas ígneas intermediárias ou félsicas de granulação fina e pobres em quartzo, como os andesitos da formação Parauapebas, que são reportados na região (Kotschoubey & Lemos 1985). Poderia ser também rochas sedimentares finas (siltitos e pelitos) da formação Águas Claras, que são reportadas na região de Carajás por CPRM (2014).

As isóconas para a zona bauxítica dos perfis investigados relativas a UCC e andesitos crustais demonstram que alumínio, titânio e zircônio, entre outros elementos (Hf, Nb, Ta, Sc) se comportam como imóveis nesta zona, o que fortaleceu por exemplo o uso de um deles, o TiO_2 , para os cálculos de balanço de massa (Figura 20 A, B, C). As duas isóconas se equivalem e se aproximam da origem, reforçando a natureza de imobilidade desses elementos. Rochas andesíticas e basálticas andesíticas, além de riolíticas, embora restritas, constituem a Formação Parauapebas situada na base Formação Carajás e mesmo intercalada com esta (Olszewski *et al.* 1989), a qual é a principal portadora das Formações Ferríferas Bandadas (BIFs), rochas mães do minério de ferro supergênico de Carajás (Silva & Costa 2020). Diante disso, sabendo que rochas vulcânicas da Formação Parauapebas foram também identificadas na porção Serra Sul dos Carajás, admite-se que elas tenham sido as rochas geradoras dos perfis lateríticos bauxíticos investigados. Esses diagramas (Figura 20) por sua vez permitem vislumbrar claramente os ganhos (Fe, V, Ga, Cu, Cr, Bi, Te) e perdas (SiO_2 , Na_2O , K_2O , CaO , MgO , MnO , Sr, Ba, Rb, Pb e ETR) químicas na zona bauxítica.

Table 2- Mass balance results using titanium oxide as immobile parameter in laterite profile.

| | Average chemical composition | | | Mass balance | | | | |
|--------------------------------|------------------------------|---------|---------|-------------------|--------|---------|---------|-------------------|
| | Kolin | Mottled | Bauxite | Ferruginous crust | Kaolin | Mottled | Bauxite | Ferruginous Crust |
| SiO ₂ (%) | 53 | 52,39 | 12,2 | 13,45 | -56,4 | -66,2 | 93,2 | -85,8 |
| Al ₂ O ₃ | 27,7 | 30,4 | 30,9 | 21,6 | 148,3 | 184,7 | 274,2 | 88,6 |
| Fe ₂ O ₃ | 4,74 | 25,35 | 38,4 | 51 | -48,5 | 116 | 181,8 | 611,6 |
| TiO ₂ | 1,17 | 1,49 | 1,73 | 0,91 | | | | |
| V (ppm) | 252 | 459,5 | 629 | 586 | 42,1 | 103,4 | 139,8 | 324,8 |
| Cu | 33 | 122 | 136 | 99 | -35,5 | 87,1 | 79,6 | 148,6 |
| Zn | 50 | 75,5 | 108 | 111 | -47,4 | -37,6 | -23,1 | 50,2 |
| As | 1,4 | 3 | 4,5 | 16,3 | -84 | -73,1 | -65,3 | 138,8 |
| Sc | 23 | 31 | 25 | 27 | -10,1 | -4,8 | -33,9 | 35,6 |
| Ni | 19 | 49 | 70 | 51 | -44,1 | 13,1 | 39,2 | 92,8 |
| Ga | 29,7 | 44,25 | 53,9 | 41,2 | 231,5 | 287,9 | 306,9 | 491,3 |
| Sr | 2,7 | 1,55 | 3,9 | 3,3 | -99,5 | -99,9 | -99,5 | -99,2 |
| Y | 8,1 | 10,85 | 12,1 | 38,1 | -78,9 | -77,8 | -78,6 | 27,5 |
| Zr | 199 | 252,5 | 309 | 269,4 | -43,5 | -43,8 | -40,7 | 108,1 |
| Nb | 8,1 | 11,7 | 14,1 | 22,8 | -63 | -58,1 | -56,5 | 33,6 |
| Sn | 1 | 3 | 4 | 4 | -73,9 | -38,6 | -29,5 | 33,9 |
| Ba | 22,6 | 71,15 | 20,5 | 5 | -98 | -95,1 | -98,7 | -99,4 |
| Hf | 5,1 | 6,6 | 8,1 | 11,1 | -47,3 | -46,5 | -43,4 | 47,2 |
| Ta | 0,6 | 0,95 | 1,2 | 1,5 | -63,5 | -54,6 | -50,6 | 17,2 |
| W | 2 | 2 | 3 | 3 | -42,4 | -54,7 | -41,5 | 11 |
| Pb | 14 | 16 | 14 | 29 | -54,9 | -59,5 | -69,5 | 19,9 |
| Th | 9,17 | 13,2 | 17,15 | 21 | -52,2 | -46 | -39,5 | 40,6 |
| U | 2,56 | 3,31 | 3,64 | 3,19 | -36,3 | -35,3 | -38,7 | 1,97 |
| La | 25,7 | 28,35 | 29,9 | 30,8 | -54,6 | -60,7 | -64,3 | -30,1 |
| Ce | 11,4 | 66,35 | 51,3 | 71,5 | -90,1 | -54,7 | -69,8 | -20,1 |
| Nd | 8,1 | 11,7 | 14,1 | 22,8 | -83,5 | -81,3 | -80,6 | -40,6 |
| Sm | 2,67 | 3,19 | 3,35 | 5,11 | -68,9 | -70,8 | -73,6 | -23,5 |
| Eu | 0,55 | 0,87 | 0,87 | 1,2 | -68,3 | -60,6 | -66,1 | -11,1 |
| Gd | 1,85 | 3,39 | 3,47 | 4,14 | -74,7 | -63,5 | -67,9 | -27,2 |
| Dy | 2,19 | 3,92 | 4,07 | 4,32 | -69,2 | -56,8 | -61,3 | -22,0 |
| Ho | 0,81 | 1,1 | 1,22 | 1,09 | -46,6 | -43 | -45,6 | -7,6 |
| Er | 1,79 | 2,42 | 2,98 | 2,62 | -57,4 | -54,8 | -52 | -19,8 |
| Yb | 1,53 | 2,57 | 2,71 | 2,64 | -58,1 | -44,8 | -25,8 | -7,1 |
| Lu | 0,3 | 0,43 | 0,48 | 0,33 | -47 | -40,4 | -42,7 | -25,1 |

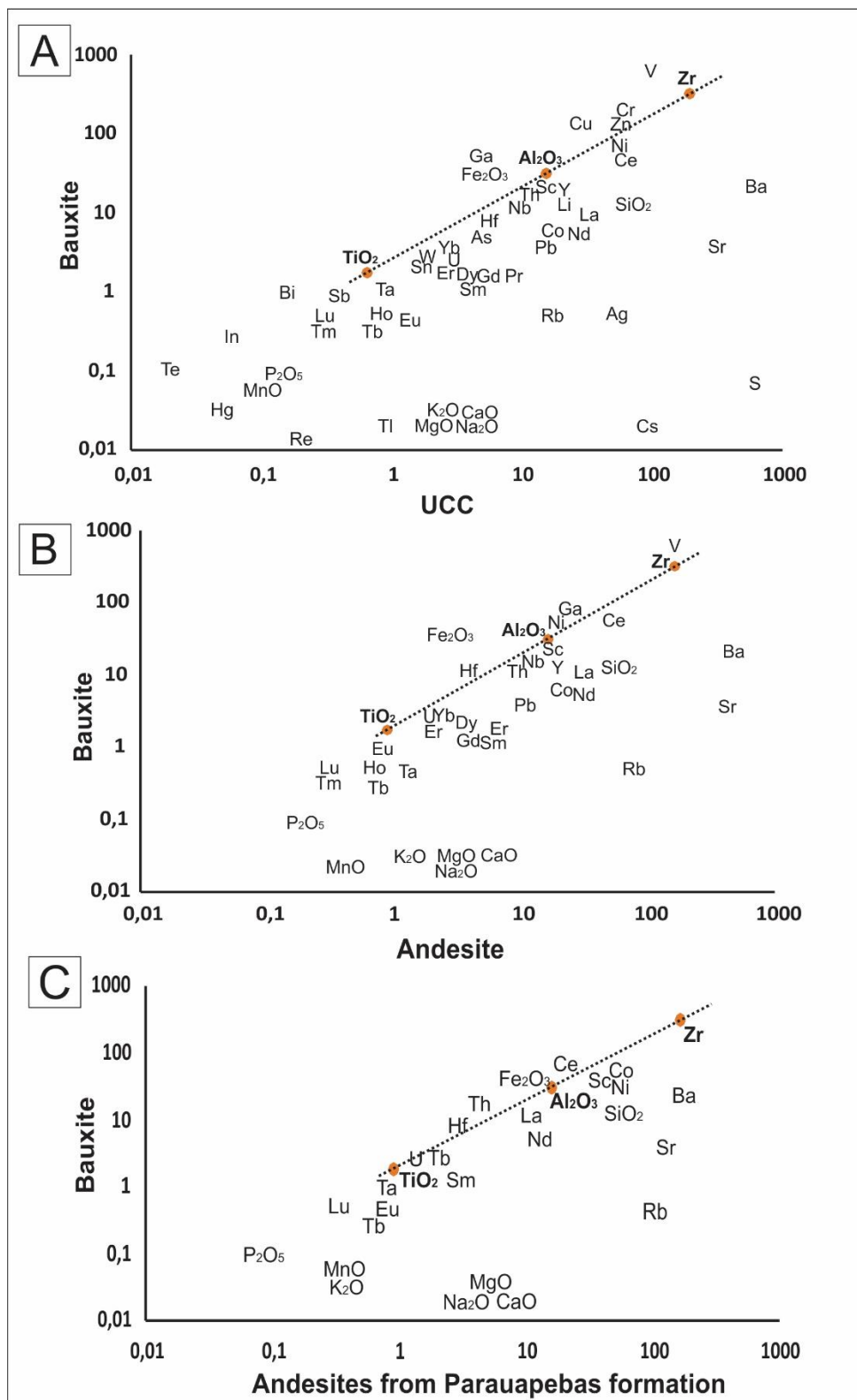


Figure 19- Isocon mass balance diagrams (after Grant 1986) considering the bauxite mean chemical composition and average chemical composition of the UCC of Gao *et al.* (2003) (A), the Earth Crust andesites (B) and the basaltic andesites from Parauapebas Formation of Grão Pará Group in Carajás (after data from Olszewski *et al.*, 1989) (C). Al_2O_3 , TiO_2 and Zr at least describe very well the isocons.

Os cálculos de balanço de massas (Tabela 2 e Figura 20a) demonstram claramente as perdas substanciais ao longo do perfil laterito bauxítico de SiO_2 , como consequência da decomposição da caulinita, sem neoformação de novo mineral com este componente; de Sr, Y, Ba, (U) e ETR. Estes últimos a perda é bem evidente e muito mais acentuada para os ETRL e bem menor para os ETRP, sendo que a sua intensidade é menor nos horizontes ferruginosos. Nos demais a perda está na ordem de grandeza de SiO_2 . Fica de fato demonstrado que os ETR estejam no perfil controlados não só pelo zircão como pelos óxi-hidróxidos de Fe. O Al_2O_3 apresenta ganho em todos horizontes, com destaque para o bauxítico, obviamente, isoladamente como caulinita e/ou gibbsita. O Fe_2O_3 como era de se esperar apresenta o ganho mais alto, e claro que, na crosta ferruginosa, fixado como hematita e goethita. Valores de ganho similares apresentam Ga, V, (Ni) e (Cu). Por sua vez Zn, As, Sc, Zr, Nb, Sn, Hf, Ta, W, Pb e Th apresentam ganhos de fato apenas no horizonte ferruginoso, portanto quando se associam de fato com oxi-hidróxidos de Fe.

Na figura 20 as perdas e ganhos nos horizontes do perfil laterito bauxítico se tornam bem evidentes e permite sumarizar o que foi descrito anteriormente. A perda de SiO_2 em todo perfil é evidente, compartilhada por Sr, Ba, (U) e ETR. Os ganhos de Al_2O_3 em todo perfil estão em padrão único, enquanto os de Fe_2O_3 , encontra similaridade em V, Cu, Ni e Ga. Por sua vez Zn, As, Y, Zr, Nb, Sn, Hf, Ta, W, Pb e Th formam um padrão a parte, que encontra suporte apenas no Fe_2O_3 no horizonte ferruginoso, quando são fixados, portanto comportam-se como ganho. Compreende elementos de alta mobilidade (Zn, As, Y, Pb, Th) e potencial para fixar e elementos refratários (Zr, Nb, Hf, Ta, Sn).

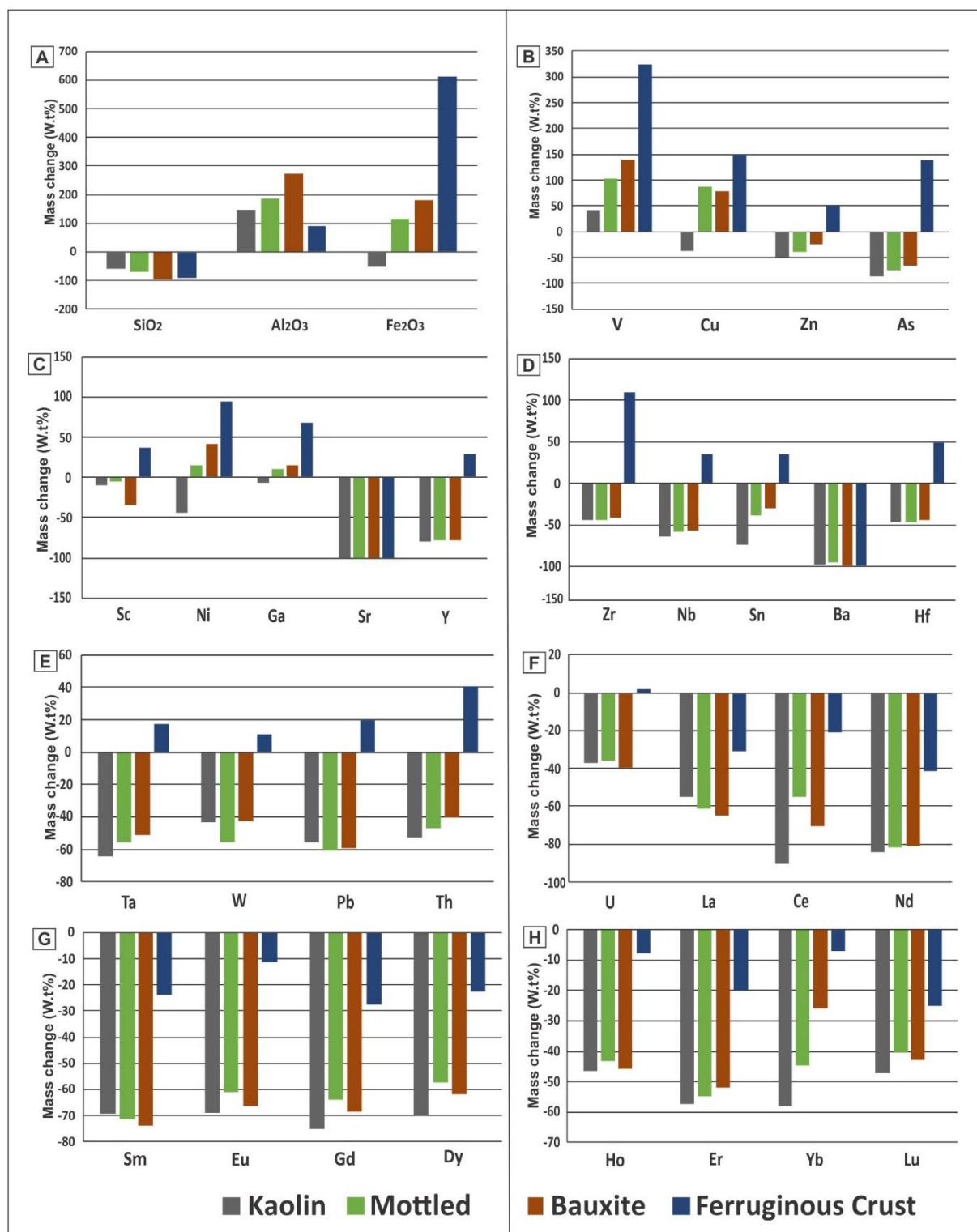


Figure 20- Distribution of the mass balance data for SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃), V, Cu, Zn, As, Sc, Ni, Ga, Sr, Y, Zr, Nb, Sn, Ba, Hf, Ta, W, Pb Th, U, La, Ce, Nd), ETRL and ETRP on the basis of titanium (as immobile element) as TiO₂ along of the investigated bauxite-bearing laterite profile at Serra Sul, Carajás.

7 CONCLUSÕES

A sucessão de horizontes investigada na Serra Sul, na Província Mineral de Carajás, composta pelos horizontes caulínico, mosqueado, bauxita nodular, bauxita argilosa, crosta ferruginosa e sua contraparte desmantelada representa um clássico perfil laterítico maduro com horizonte bauxítico ainda muito argiloso. Sua constituição mineralógica e química é simples e clássica para perfis lateríticos maduros completos derivados de rochas aluminossilicatadas, pobres em quartzo, não mineralizadas, ou seja, sem qualquer anomalia geoquímica, indicando assim rocha parental de domínio comum. O perfil assemelha-se a maioria dos depósitos lateríticos bauxíticos da Amazônia, com exceção da quase ausência da cobertura argilosa, a Argila de Belterra. A zona equivalente a bauxita corresponde a bauxita de baixo teor de alumina indicada pela relativa baixa quantidade de gibbsita, a alumina aproveitável, mas rica em Fe_2O_3 e ainda SiO_2 ligada a caulinita, portanto detentora da sílica reativa. Portanto, localmente não se trata de um minério adequado para alumínio.

A abundância de caulinita e gibbsita, a quase ausência de quartzo, os baixos teores de anatásio e aliados aos baixos teores de Zr e dos demais elementos químicos refratários (Hf, Nb, Ta, Y, Sc,), da mesma forma dos metais base e daqueles fortemente ligados aos oxihidróxidos de Fe (V, Mo, Ni, Ga, Bi, Sb, As e Th), bem como os cálculos de balanço de massas demonstram que estas formações lateríticas bauxíticas podem ter sido derivadas de rochas andesíticas, a exemplo daquelas da Formação Parauapebas que ocorrem associadas às formações ferríferas bandadas da Província Mineral de Carajás, e menos provavelmente de rochas sedimentares pelíticas da Formação Águas Claras. Os cálculos de balanço de massa também deixaram claro a evolução laterítica completa, ao ressaltar os padrões geoquímicos de perdas de SiO_2 e de metais alcalinos e alcalinos terrosos, Sr, Ba, ETR; e os fortes ganhos de Fe_2O_3 e V, Cu, Ni, Ga, ainda de Zn, As, Y, Zr, Nb, Sn, Hf, Ta, W, Pb e Th, estes últimos apenas na crosta ferruginosa.

Embora os perfis estudados não mostrem diretamente potencial para extração comercial de bauxita, a presença das mesmas em uma região com grande diversidade litológica, algumas favoráveis a formação de bauxita, dada a presença de aluminossilicatos, e considerando as condições favoráveis à lateritização que prevaleceram no Terciário Inferior, que favoreceram a formação dos grandes depósitos de ferro, fortalecem a potencialidade para prospecção de novos depósitos de bauxitas na Província Mineral de Carajás, em um cenário, por enquanto dominado por ferro laterítico.

REFERÊNCIAS

- Almeida R.C.C. 1980. *Contribuição à petrologia do granito central da Serra dos Carajás*. MS Dissertation, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geofísicas e Geológicas, Belém, 84p.
- Almeida F.F, Melcher R.C, Cordani U.G, Kawashita K, Vandomos P. 1968. Radiometric age determinations from Northern Brazil. *Bol.SBG*. São Paulo, **17** (1): 3-14.
- Althoff F.J, Barbey P, Boullier A.M. 2000. 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian Craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral Province, Brazil). *Precambrian Research*, **104**: 187-206.
- Anderson W.L, Dyer R.C, Torres D.D. 1974. Ocorrências de manganês na bacia do Rio Itacaiúnas, Centro-Leste do estado do Pará. *In: SBG, 28º Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre. Anais[...]*. v. 6, p. 149-164.
- Araújo O.J.B. & Maia R.G.N. 1991. *Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás; Subprojeto Recursos Minerais; Folha SB.22.Z-A Serra dos Carajás – Estado do Pará*. Brasília,DF, DNPM/CPRM, p.136.
- Assad R. & Beisiegel V.R. 1978. Depósito de bauxita da Serra dos Carajás. *In: SBG, 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, Anais[...]* v.4, p. 1385-1391.
- Avelar V.G, Lafon J-M, Correia F.C, Macambira E.M.B. 1999. O magmatismo arqueano da região de Tucumã, Província Mineral de Carajás: novos dados geocronológicos. *Revista Brasileira de Geociências*, **29** (4): 453-460.
- Barbosa O, Ramos J.R.A, Gomes F.A, Helmbold R. 1966. *Geologia, estratigrafia, estrutural e economia da área do “Projeto Araguaia”*. Monografia da DMG. Rio de Janeiro, 94p.
- Bardossy G. & Aleva G.J.J. 1990. *Lateritic bauxites*. Amsterdam, Elsevier, 624p. (Developments in Economic Geology, 27).
- Barros C.E, Dall’Agnol R, Vieira E.A.P, Magalhães M.P. 1995. Granito Serra dos Carajás: avaliação do potencial metalogenético para estanho com base em estudos da borda oeste do corpo. *Boletim do Museu Emílio Goeldi. Ciências da Terra*, **7**: 93-123.
- Barros C.E.M, Macambira M.J.B, Barbey P. 2001. Idade de zircão do Complexo Granítico Estrela: relações entre magmatismo, deformação e metamorfismo na Província Mineral de Carajás. *In: SBG, 7º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, Anais [...]*, p. 156-159.
- Basei M.A.S. 1974. Estudo geocronológico do magmatismo da Amazônia. *In: SBG, 28º Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre. Anais [...]*, v.6, p. 287-296.
- Beauvais A. & Tardy Y. 1993. Degradation and dismantling of iron crust under climatic changes in Central Africa. *Chemical Geology*, **107**: 277-288.
- Beisiegel V. de R. & Farias N.F. 1978. Ocorrência de cobre na Serra dos Carajás. *In: SBG, 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Recife. Anais[...]*, v.4, p. 419-1430.

- Beisiegel V. de R, Bernardelli A.L, Drummond N.F, Ruff A.W, Tremaine J.W. 1973. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, **3**: 215-242.
- Bitton D. & Volkoff B. 1993. Alteration déferruginisante des cuirasses massives et formation des horizons gravillionares ferruginex dans les sois de l’Afrique Central Humide. *C.R. Acad Science*, **316**: 1447-1454.
- Braun J.J, Pagel,M, Muller J.P, Bilong P, Michard A, Guillet B. 1990. Cerium anomalies in lateritic profiles. *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**: 781–795.
- Cordani U.G & Neves B.B. de B. 1982. Geologic Evolution of South America during the Archean and Early Proterozoic. *Revista Brasileira de Geociências*, **12**: 79-88.
- Costa M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, **21**: 140-160.
- Costa J.B.S, Araújo O.J.B, Santos A, Jorge João X. da. S, Macambira M.J.B, Lafon, J.M. A. 1995. Província Mineral de Carajás: aspectos tectono-estruturais, estratigráficos e geocronológicos. *Bol. do Museu Paraense Emílio Goeldi. Sér. Ciências da Terra*, **7**: 199-235.
- Costa J.B.S, Bemerguy R, Hasui Y, Borges M.S, Ferreira Junior C.R.P, Bezerra P.E.L, Fernandes J.M.G, Costa M.L. 1996. Neotectônica da região amazônica: aspectos estruturais, tectônicos, geomorfológicos e estratigráficos. *Geonomos, Brasil*, **4** (2): 23-44.
- Costa M. L, Horbe A. C, Horbe M.A, H, Teixeira J.T, Costa W.A.M. 1988. A região laterítica-bauxítica do pitinga (AM). *In: SBG, 35° Cong. Bras. Geol., Belém Anais[...]* v.1, p. 256-270.
- Costa M.L & Araújo E.S. 1997. Caracterização mineralógica e geoquímica multi-elementar de crostas ferruginosas lateríticas tipo minérios de ferro em Carajás., *Geociências* (São Paulo), Brasil, **16** (1): 157-175.
- Costa M.L, Souza D.J.L, Angélica R.S. 2009. The contribution of laterization processes to the formation of the Kaolin deposits from Eastern Amazon. *Journal of South American Earth Sciences*, **27**: 219-234.
- Costa M.L, Queiroz J.D.S, Silva A.C.S, Almeida H.D.F, Costa L.C.C. 2011. Perfil laterítico desenvolvido sobre formação ferrífera bandada (jaspilito) em Carajás. *In: SBG; 12° Simpósio de Geologia da Amazônia, Boa Vista, Roraima, v. 8, p. 403-407.*
- Costa M.L, Cruz G.S, Almeida H.D.F, Pöllmann H. 2014. On the geology, mineralogy and geochemistry of the bauxite-bearing regolith in the lower Amazon basin: evidence of genetic relationships. *Jornal of Geochemical Exploration* **146**: 58-74.
- Dall’Agnol R. 1982. Os granitos anorogênicos da Amazônia brasileira. Suas analogias com os “younger granites” do oeste da África. *In: 5° Congresso Latino Americano de Geologia Buenos Aires, Conference Paper, v.2, p. 13-131.*
- Dall’Agnol R, Teixeira N.P, Rämö O T, Moura C. A. V, Macambira M. J. B. 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic, rapakivi, A-type granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. *Lithos, Amsterdam*, **80** (1-4): 101-129.

Dall'Agnol R, Cunha I.R.V, Guimarães F.V, Oliveira D. C, Teixeira M.F.B, Feio G. R. L, Lamarão C.N. 2017. Mineralogy, geochemistry, and petrology of Neoproterozoic ferroan to magnesian granites of Carajás Province, Amazonian Craton: The origin of hydrated granites associated with charnockites. *Lithos* (Oslo. Print), **277**: 3-32.

Figueiras A.J.M & Villas R.N.N. 1984. Estudo petrológico e sedimentológico da sequência clástica (pós Grupo Grão Pará) da Serra dos Carajás, Estado do Pará. *In: SBG, 35º Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro. Anais[...]*, p. 832-846.

Figueiredo E, Silva R. C, Lobato Lydia M, Zucchetti T. 2020. Geotectonic signature and hydrothermal alteration of metabasalts under- and overlying the giant Serra Norte iron deposits, Carajás Mineral Province. *Ore Geology Reviews*, **120**: 1-14.

Gibbs A.K, Wirth K.R, Hirat W.K, Olszewski Jr. W.S. 1986. Age and composition of the Grão Pará group volcanics, Serra dos Carajás. *Rev. Bras. Geociências*, **16** (2): 201-211.

Gomes C.B, Cordani U.G, Basei M.A.S. 1975. Radiometric ages from the Serra dos Carajás area, northern Brazil. *Geological Society of American Bulletin*, **86**: 939-942.

Hirata W.K, Rigon J.C, Cordeiro A.A.C, Meireles E.de.M. 1982. Geologia regional da Província Mineral de Carajás. *In: SBG, 1º Simpósio de geologia da Amazônia, Belém, Anais[...]*, p. 100-108.

Horbe A.C & Costa M.L. 1990. Balanço geoquímico do perfil laterítico da Serra da Madeira, Pintanga – AM. *In: SBG, 36º Congresso Brasileiro de Geologia, Natal, Anais[...]*, v.2, p. 865-867.

Horbe A.C & Costa M.L. 2005. Lateritic crusts and related soils in eastern Brazilian Amazonia. *Geoderma* (Amsterdam), **126**: 225-239.

Horbe A.C & Anand R.R. 2011. Bauxites on igneous rocks from Amazonia and Southwestern of Australia: implication for weathering process, *Elsevier*, **111**: 1-12.

Issler R.S. 1977. Esboço estratigráfico tectônico do Crato do Guaporé. *Revista Brasileira de Geociências*, **3**: 177-211.

Katzer F. 1903. *Grundzüge der geologie des unterm Amazonasgebietes des Staates Pará in Brasilien*. Leipzig, M. Weg. 296 p.

Kotschoubey B. & Lemos V.P. 1985. Considerações sobre a origem e a gênese das bauxitas da Serra dos Carajás. *In: SBG. Núcleo Norte, 2º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, Anais[...]*, v.2, p. 48-61.

Kotschoubey B, Truckenbrodt W, Hieronymus B. 1987. Phases and zonality of the bauxitic alteration in the northeast of the State of Pará (Brazil). *Travaux Icsoba*, **16** (17): 115-127.

Kotschoubey B, Truckenbrodt W, Hieronymus D, Alves C.A. 1989. Preliminary study of aluminous laterites and bauxites from the Serra Norte (Carajás Mineral Province), Northern Brazil. *Travaux Icsoba*, **19** (22): 95-103.

Kotschoubey B, Calaf J.M.C, Lobato A.C.C, Leite A.S, Azevedo C.H.D. 2005. Caracterização e gênese dos depósitos de bauxita da Província Bauxitífera de Paragominas, Nordeste da Bacia do Grajaú, Nordeste do Pará, Oeste do Maranhão. *In: Marini O.J.*,

Queiroz E.T., Ramos B.W. (eds.). *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília,DF, CT-MINERAL/FINEP, ADIMB, p. 691-782.

Knup P.E. 1971. Reconhecimento geológico na região dos rios Itacaiúnas e Tocantins, estado do Pará. *In: SBG, 25º Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo. Anais[...]*, v.2, p. 123-127.

Lemos V.P. & Kotschoubey B. 1983. Alteração supergênica das rochas básicas do Grupo Grão Pará - Implicações sobre a gênese do depósito de bauxita de N-5, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, **13** (3): 165-177.

Liu X, Wang Q, Deng J, Zhang Q, Sun S, Meng J. 2010. Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, Western Guangxi, China. *Journal of Geochemical Exploration*, **105** (3): 137-152.

Lindenmayer Z.G. 1981. *Aspectos geológicos da Província Mineral de Carajás*. Rio de Janeiro, Docegeo, 12p.

Macambira J. B & Schrank A. 2002. Químio-estratigrafia e evolução dos jaspilitos da Formação Carajás (Pa). *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, **32** (4): 567-578.

Machado N, Lindenmayer Z, Krogh T.E, Lindenmayer D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Research*, **49**: 329-354.

Martins L.P.B. 1982. Aspectos petrográficos das principais litologias da sequência Salobo. *In: SBG, 1º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, Anais[...]*, p. 253-262.

Montalvão R.M.G, Tassinari C.G, Bezerra P.E.L. 1984. Geocronologia dos granitoides e gnaisses das regiões de Rio Maria: Fazenda Mata Geral e Rio Itacaiúnas, Sul do Pará. *In: SBG, 33º Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro. Anais[...]*, v.6, p. 2757-2766.

Negrão L.B.A, Costa M.L, Pöllmann H, Horn A. 2018. An application of the Rietveld refinement method to the mineralogy of bauxite-bearing regolith in the Lower Amazon. *Mineralogical Magazine*. **82**: 413-431.

Negrão L.B. & Costa M.L. 2020 (submitted). Mineralogy and geochemistry of a bauxite-bearing lateritic profile for identification of its parent rock in the huge Carajás iron deposits, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*.

Nesbitt H.W. 1979. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature*, **279**: 206–210.

Oliveira S.B, Costa M.L, Prazeres Filho H. 2016. The lateritic bauxite deposit of Rondon do Pará: a new giant deposit in the Amazon Region, northern Brazil. *Economic Geology*, **111**: 1–14.

Olszewski W.J, Wirth K.R, Gibbs A.K, Gaudette H.E, 1989. The age, origin, and tectonics of the Grão Pará Group and associated rocks, Serra dos Carajás, Brazil: Archean continental volcanism and rifting. *Precambrian Res.* **42**: 229–254.

Pantoja H.M. & Costa M.L. 2020. Heavy minerals and zircon morphology: proxies between Rondon do Pará bauxites and Itapecuru rocks. *BJGEO*. (under revision).

Peixoto F.S & Horbe A.M.C. 2008. Bauxitas do nordeste do Amazonas., *Revista brasileira de geociências*, **38**: 406-422.

Pidgeon R.T, Macambira M.J.B, Lafon J.M. 2000. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. *Chemical Geology*, **166**: 169-171.

Pinheiro R.V.L & Holdsworth R.E. 1995. Significado tectônico da clivagem transversa em dobras na Mina de Serra Pelada, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências da Terra*, **7**: 259-278.

Pinheiro R.V.L & Holdsworth R.E. 2000. Evolução tectono-estratigráfica dos Sistemas Transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Crato Amazônico, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **30** (4): 597-606.

Puty C.O.F, Martins R.C, Montalvão R.M.G, Jorge João X.S, Carreira J.M, Silva G.H, Neves A.P, Gilffoni L.E, Lourenço R.S, Frizzo S.J. 1972. *Projeto Marabá*. Belém, DNPM; CPRM, v.1, 124p.

Ramos J. R. 1967. Estratigrafia da região do Xingu-Tocantins. *In: 1º Simpósio sobre a Biota amazônica. Atas[...]*, Belém, CNPQ, p. 373-388.

Rio Doce Geologia e Mineração S.A. – DOCEGEO. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. *In: SBG, 35º Congr. Bras. Geol., Belém, Anais[...]*, Anexo, p. 10-54.

Sahoo P.K, Guimarães J.T.F, Souza P.W.M, Silva M.S, Maurity C.W, Rodrigues T.M, Silva D.F, Mardegan S.F, Furtini A.E.N, Dall'Agnol R. 2016. Geochemistry of upland lacustrine sediments from Serra dos Carajás, Southeastern Amazon, Brazil: Implications for catchment weathering, provenance, and sedimentary processes. *Journal of South American Earth Sciences*, **72**: 178-190.

Santos Jr. A.E. & Rossetti D.E. 2003. Paleoambiente e estratigrafia da Formação Ipixuna, área do Rio Capim, leste da sub-bacia Cametá. *Revista Brasileira de Geociências*, **33**: 313-324.

Santos P.H.C, Costa M.L, Leite A.S. 2016. The Piriá aluminous lateritic profile: Mineralogy, geochemistry and parent rock. *Brazilian Journal of Geology*, **46**: 617-636.

Santos P.H.C. & Costa M.L. 2020. Geochemistry and mineralogy of Décio bauxite in Rondon do Pará and the Itapecuru siliciclastics as parent rocks (eastern amazon). *Journal of South American Earth Sciences*. (submitted).

Schellmann W. 1983. A new definition of laterite. *Geological Survey of India, Memoirs*, **120**: 1-7.

Silva A. C. S, Costa M. L. 2020. Genesis of the soft iron ore at S11D Deposit, in Carajás, Amazon Region, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, **50**: 1-19.

Souza Filho P. W. M, Guimaraes J. T. F, Silva M. S, Costa F. R, Sahoo P. K, Maurity C. W, Dall'agnol R. 2016. Basin morphology, sedimentology and seismic stratigraphy of an

upland lake from Serra dos Carajás, southeastern Amazon, Brazil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, **11**: 71-83.

Su N, Yang S, Yue W. 2017. Rare earth element chemistry indicates chemical alteration of zircons during the evolution of weathering profile. *Acta Geochim* **36** (3):433–436.

Suzczynski E. 1972. A origem vulcânica do minério de ferro primário Serra dos Carajás - Estado do Pará - Região Amazônica. In: SBG, 26° Congresso Brasileiro de Geologia, Belém, v.1, p. 103 - 120.

Tallarico F.H.B. 2002. The occurrence of Ilvaite in the Igarapé Bahia Cu-Au deposit, Carajás Province, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **32** (1): 149-152.

Tallarico F. H. B, MacNaughton N.J, Groves D.I, Fletcher I.R, Figueiredo B.R, Carvalho J.B, Rego J.L, Nunes A.R. 2004. Geological and SHRIMP II U-Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil. *Mineralium Deposita*, **39**: 68-86.

Teixeira J.B.G. 1994. Geochemistry, petrology and tectonic setting of archean basaltic and dioritic rocks from the N4 iron deposit. Serra dos Carajás, Pará, Brazil. Thesis Doctor of Philosophy, Department of Geosciences, The Pennsylvania State University, 175p.

Teixeira J.B.G, Ohmoto H, Eggler D.H. 1997. Elemental and oxygen isotope variations in Archean mafic rocks associated with the banded iron-formation at the N4 iron deposit, Carajás, Brazil. In: Costa M.L. & Angélica R.S. (coord.) *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém, FINEP; SBG-Núcleo Norte, p. 161-203.

Towse D & Winson P. 1959. Lateritas aluminosas do Baixo Amazonas. *Eng. Min. Met.*, **30**(177):133-135.

Vasquez M.L, Sousa C.S, Carvalho J.M.A. 2008. *Mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Pará, escala 1:1.000.000*. Programa Geologia do Brasil (PGB), Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil, Mapas Geológicos Estaduais. Superintendência Regional de Belém, CPRM Serviço Geológico do Brasil.

Villas R.N, Galarza Toro M.A, Almada M.C, Viana A.S, Rones P. 2001. Geología do depósito Igarapé Bahia/Alemão, Província Carajás, Pará. In: Jost H. *et al.* (eds.) *Caracterização de depósitos auríferos em distritos mineiros brasileiros*. Brasília,DF, DNPM/ADIMB, p 215-240.

Wang X, Jiao Y, Du Y, Ling W, Wu L, Cui T, Zhou Q, Jin Z, Lei Z, Weng S. 2013. REE mobility and Ce anomaly in bauxite deposits f WZD area, Northern Guizhou, China. *Journal of Geochemical Exploration*, **133** (2013): 103-107.

