



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

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 461**

**MINERALOGIA, GEOQUÍMICA E MINERAIS PESADOS DO PERFIL  
LATERITO-BAUXÍTICO COM COBERTURA E SUA RELAÇÃO COM O  
GRUPO ITAPECURU: LAVRA PILOTO CIRÍACO (RONDON DO PARÁ)**

**Dissertação apresentada por:**

**HELIANA MENDES PANTOJA**

**Orientador: Prof. Dr. MARCONDES LIMA DA COSTA (UFPA)**

---

**BELÉM  
2015**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)  
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

---

Pantoja, Heliana Mendes , 1980-

Mineralogia, geoquímica e minerais pesados do perfil laterito-bauxítico com cobertura e sua relação com o Grupo Itapecuru: lavra piloto ciríaco (Rondon do Pará) / Heliana Mendes Pantoja. – 2015.

xv, 70 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Marcondes Lima da Costa

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2015.

1. Bauxita - Rondon do Pará (PA). 2. Zircão. 3. Caulinita. I. Título.

CDD 22. ed. 549.53098115

---



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

**MINERALOGIA, GEOQUÍMICA E MINERAIS PESADOS DO PERFIL LATERITO-  
BAUXÍTICO COM COBERTURA E SUA RELAÇÃO COM O GRUPO ITAPECURU:  
LAVRA PILOTO CIRÍACO ( RONDON DO PARÁ)**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR**

**HELIANA MENDES PANTOJA**

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

**Data de Aprovação: 27/ 08 / 2015**

**Banca Examinadora:**

**Prof. MARCONDES LIMA DA COSTA**  
(Orientador-UFPA)

**Profª ADRIANA MARIA COIMBRA HORBE**  
(Membro-UNB)

**Prof. ROMULO SIMÕES ANGÉLICA**  
(Membro-UFPA)

*Aos meus pais  
Maria das Graças Pantoja e José Pantoja  
Que com determinação e coragem abdicaram de tudo em favor da educação e de um futuro  
melhor para seus filhos.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus que prolongou meus dias com saúde, paz e esperança para enfrentar mais esse desafio na minha vida acadêmica.

Ao Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará.

Agradeço especialmente ao Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa pela orientação, conselhos, compartilhamento de conhecimento e experiências profissionais.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES pela concessão de bolsa de estudo.

À empresa Votorantim pela oportunidade maravilhosa de estudar uma lavra piloto pertencente ao Projeto Alunina Rondon. Em especial aos geólogos Hércio Prazeres e Tereza Lee por toda colaboração e atenção recebida.

Agradeço a Oficina de Preparação de Amostras (OPA) e o Laboratório de sedimentologia pelo apoio na preparação de amostras.

Agradeço aos laboratórios: LACEM, LABMEV, LAMIGA, Pará-Iso pela concessão e suporte técnico durante a preparação ou realização de análises.

Aos técnicos de laboratório Natalino Valente, Joelma, João Lopez e Ana Paula pela atenção e disponibilidade.

Ao meu amigo Maurício Costa pela ajuda com a confecção dos mapas e imagens SRTM.

Aos meus amigos e companheiros do GMGA em especial a Fernanda Sobrinho, Daivison Abreu, Socorro Progene, Mônia Carvalho, Sauri Machado, Pablio Santos, Rose Norat, Darilena Porfirio, Leonardo Boiadeiro, Flavia Rodrigues, Luís Claudio, André Heron e Aline Silva pela ajuda, apoio e carinho.

À minha querida amiga irmã Michela Borges por toda ajuda, companheirismo, carinho e atenção recebida durante todos esses anos de amizade.

Com grande satisfação e reconhecimento que agradeço a todos que de modo direto ou indireto contribuíram com o desenvolvimento desta dissertação.

Por fim agradeço com todo meu amor a minha família que é meu porto seguro minha fonte de motivação.

*"Somente um progresso calmo e constante, livre de precipitação, conduz ao objetivo."*

**Provérbio chinês**

## RESUMO

O perfil laterito-bauxítico de Rondon do Pará estudado faz parte da Província Bauxitífera de Paragominas, a mais importante do Brasil, que hospeda depósitos de classe mundial e de considerável valor econômico. Este consiste de uma sequência de seis horizontes (da base para o topo): argila bauxítica, bauxita maciça, crosta ferro-aluminosa maciça, crosta ferro-aluminosa desmantelada, esferolitos ferruginosos e ao topo a cobertura argilosa equivalente a argila de Belterra. As rochas do Grupo Itapecuru, cujos sedimentos são as prováveis fontes do perfil laterito-bauxítico consistem de siltito e argilitos intemperizados. A composição mineralógica das três unidades estudadas (rochas do Grupo Itapecuru, perfil laterito-bauxítico e cobertura argilosa) é similar, sendo constituídas por caulinita, quartzo, hematita, gibbsita e goethita. Como minerais acessórios anatásio e minerais pesados (zircão, turmalina, rutilo, estaurolita e opacos). As três unidades diferem principalmente pela variação de teores e pela ausência de gibbsita e goethita nas rochas do Grupo Itapecuru. A composição química das três unidades mostra que,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  e PF, são os constituintes mais abundantes, relacionados com os principais minerais. Os conteúdos de elementos traços nas três unidades apresentam uma considerável heterogeneidade e somente V, Cr, Ga, Zr, Hf e Th estão acima da média crustal, todos estes se correlacionam bem com óxi-hidróxidos de ferro. Quando normalizadas aos condritos as três unidades divergem pela anomalia positiva de Ce nas rochas do Grupo Itapecuru, mas são similares na anomalia negativa de Eu, no empobrecimento dos ETRL e no enriquecimento dos ETRP. Os dados obtidos claramente apontam afinidades entre as três unidades, sugerindo que os sedimentos das rochas do Grupo Itapecuru são semelhantes aqueles da rocha mãe do perfil laterito-bauxítico, enquanto sua respectiva cobertura demonstra forte relação com as crostas e esferolitos. A estruturação do perfil laterito-bauxítico junto com os resultados mineralógicos e químicos permitem correlacioná-lo com os depósitos de Paragominas e Juruti.

**Palavras-chave:** Bauxita. Zircão. Caulinita

## ABSTRACT

The lateritic-bauxite profile studied in Rondon do Pará is part of the Paragominas Bauxite Province, the most important of the Brazil that hosts world-class deposits of considerable economic value. The deposit comprises six horizons: bauxitic clay at the bottom, massive bauxite, massive iron-aluminous crust, iron-aluminous crust dismantled, ferruginous spheroliths and a clay cover equivalent to the "argilas de Belterra" at the top. The sedimentary rocks of the Itapecuru Group are the probable source of the lateritic-bauxite profile and include weathered siltstone and claystone. The mineralogical composition of the three studied units (Itapecuru Group rocks, lateritic-bauxite profile and clay cover) is similar and consist to kaolinite, quartz, hematite, goethite and gibbsite, accessory minerals include anatase and heavy minerals (zircon, tourmaline, rutile, staurolite and opaque). The units differ mainly in this content variation and the absence of gibbsite and goethite in the rocks of Itapecuru Group. The chemical composition of the three units shows that  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  and LOI are the most abundant constituents, related to the major minerals. Trace elements content in the three units are heterogeneous with V, Cr, Ga, Zr, Hf and Th showing concentrations above the crustal average, these elements display good correlation with iron oxy-hydroxides. When normalized to chondrites, the three units differ by positive Ce anomaly in the Itapecuru Group rocks, but are similar in negative Eu anomaly, the depletion of LREE and enrichment of HREE. The data obtained show clear affinities between the three units, suggesting that the sediments of the Itapecuru Group are similar to those of the bedrock of lateritic-bauxite profile while their respective cover demonstrates strong relationship with the crusts and spheroliths. The structure of the lateritic-bauxite profile together with mineralogical and chemical data allow to correlate the Rondon do Pará lateritic-bauxite profile with the deposits of Paragominas and Juruti.

**Keywords:** Bauxite. Zircon. Kaolinite.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> – Mapa simplificado do nordeste do estado do Pará com a localização da área de estudo.....   | 4  |
| <b>Figura 2</b> – Visão panorâmica da Região de Rondon, com destaque para o relevo ondulado e superfícies de aplainamento dos platôs. ....   | 5  |
| <b>Figura 3</b> – Fluxograma dos procedimentos de preparação de amostras e das análises realizadas. ....   | 8  |
| <b>Figura 4</b> – Fluxograma com a ilustração do cálculo estequiométrico das principais fases minerais identificadas nas amostras analisadas. ....   | 12 |
| <b>Figura 5</b> – Exposição de rochas do Grupo Itapecuru na BR 222 Km 130: a) Perfil descrito e amostrado; b) Visão geral da sucessão estudada; c) Marcas de raízes recentes no argilito arenoso; d) Argilito com acamamento wavy. ....  | 14 |
| <b>Figura 6</b> – Perfis descritos e amostrados na lavra piloto Ciríaco. ....  | 15 |
| <b>Figura 7</b> – Lavra piloto Ciríaco: a) Posição dos perfis descritos; b) Principais horizontes individualizados.....  | 16 |
| <b>Figura 8</b> – Horizonte bauxítico: a) Blocos de bauxita decimétricos com textura “arenosa”, macroporosa e coloração avermelhada; b) Amostra de mão da bauxita retirada próximo ao contato com a crosta ferro-aluminosa maciça; c) Detalhe da amostra de mão em lupa binocular de goethita pulverulenta e macrocristais de gibbsita. ....   | 18 |
| <b>Figura 9</b> - Imagens da crosta ferro-aluminosa maciça: a) Nódulos de hematita com auréola de Al-goethita; b) Estrutura colunar com canais preenchidos por material argiloso; c) Nódulos de hematita substituídos parcialmente por Al-goethita, que invade também o cimento microcavernoso; d) Nódulos de hematita com película lustrosa de goethita na crosta ferro-aluminosa do perfil 4. .... | 19 |
| <b>Figura 10</b> – Crosta ferro-aluminosa desmantelada: a) Blocos de crosta ferro-aluminosa desmantelada envolvidas por óxi-hidróxidos de Fe-Al em matriz argilosa incoesa; b) Cavidades alongadas, algumas preenchidas com material esbranquiçado. ....   | 20 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 11</b> – Horizonte esferolítico ferruginoso: a) Contato brusco entre o HEF e cobertura argilosa; b) Imagem em lupa binocular mostrando esferolitos ferruginosos envoltos por goethita ocre em matriz argilosa; c) Formas mais comuns dos esferolitos. ....   | 21 |
| <b>Figura 12</b> – Difractogramas de raios X de amostras do Grupo Itapecuru: anatásio (Ant), caulinita (kln), hematita (Hem) e quartzo (Qtz). ....   | 23 |
| <b>Figura 13</b> – Fotomicrografia em lâmina polida do siltito argiloso a nicóis cruzados e a luz natural: Em a) e b) Grãos de quartzo desde arredondados e irregulares com bolsões de dissolução em cimento de argila e óxi-hidróxidos de Ferro; c) e d) Distintas morfologias dos grãos, seus contatos e cimento argilo-ferruginoso. ....  | 24 |
| <b>Figura 14</b> – Difractograma de raios X de amostras da argila bauxítica e bauxita: Anatásio (Ant), caulinita (kln), gibbsita (Gbs), hematita (Hem) e quartzo (Qtz).....  | 25 |
| Figura 15 – Difractogramas de raios X de amostras da Crosta Ferro-aluminosa Maciça (CFAM) e Crosta Ferro-aluminosa Desmantelada (CFAD): Hemtatita (Hem), goethita (Gt), gibbsita (Gbs) e caulinita (Kln). ....   | 26 |
| Figura 16 – Difractogramas de raios X de amostras de esferolitos ferruginosos e sua matriz argilosa: Anatásio (Ant), caulinita (Kln), hemtatita (Hem), gibbsita (Gbs) e goethita (Gt).....   | 27 |
| <b>Figura 17</b> – Difractogramas de raios X de amostras da cobertura argilosa: Anatásio (Ant), caulinita (Kln), hemtatita (Hem), gibbsita (Gbs), goethita (Gt) e quartzo (Qtz).....   | 28 |
| <b>Figura 18</b> – Fotomicografia em lâminas polidas a nicóis cruzados de amostras dos horizontes bauxítico (a, b e c), crosta ferro-aluminosa maciça (d), crosta ferro-aluminosa desmantelada (e) e esferolitos ferruginosos (f): Em a, b e c - Gibbsita preenchendo poros e cavidades e nódulos hematíticos, d – Porção nódular imersa em plasma gibbsítico, e – Cutã goethítico-hematítico em matriz muito porosa, f – Porção esferolítica em matriz ferruginosa..... | 29 |
| <b>Figura 19</b> – Fotomicografias obtidas com MEV utilizando elétrons secundários: a) cristais de gibbsita; b) Hematita intercrescida com gibbsita; c) Hematita vermiforme; c) Goethita botrioidal.....   | 30 |
| <b>Figura 20</b> – Distribuição quantitativa dos minerais na lavra piloto Ciríaco (LPC) comparada ao perfil de Paragominas. ....   | 31 |
| <b>Figura 21</b> – Fotomicografias de minerais pesados em luz natural dos principais minerais ultraestáveis identificados nas rochas do Grupo Itapecuru na BR 222 km 130. ....   | 32 |
| <b>Figura 22</b> – Fotomicografias de minerais pesados em luz natural dos principais minerais ultraestáveis identificados no perfil laterito-bauxítico e cobertura argilosa da lavra piloto Ciríaco. ....  | 33 |

- Figura 23** – Distribuição composicional comparativa dos minerais pesados do perfil laterito-bauxítico {Argila Bauxítica (ABX), Horizonte Bauxítico (HBX), Crosta Ferro-aluminosa Desmantelada (CFAD), Horizonte Esferolítico Ferruginoso (HEF)} da Cobertura Argilosa (CAR) e das rochas sedimentares do Grupo Itapecuru; Siltito Argiloso (SIA), Argilito Maciço (ARM), Argilito Arenoso (ARA), Argilito Caulinítico (ARC).....34
- Figura 24** – Fotomicrografias obtidas em MEV e respectivos desenhos das formas dos principais tipos de zircões presentes na cobertura argilosa e perfil laterito - bauxítico da lavra piloto Ciríaco. ....36
- Figura 25** – Fotomicrografias obtidas em MEV e respectivos desenhos das formas dos principais tipos de zircões presentes no Grupo Itapecuru. ....38
- Figura 26** – Fotomicrografias de seções polidas mostrando os tipos de zoneamentos presentes nos zircões das três unidades estudadas (Grupo Itapecuru, perfil laterito-bauxítico e cobertura argilosa): a, b, c e d zircões homogêneos (Zr1); e, f, g e h zircões com zoneamentos concêntricos bem desenvolvidos (Zr2); i, j, l zircões com zoneamentos irregulares (Zr3).....39
- Figura 27** – Composição semi-quantitativa (análise de MEV/EDS) de zircões das três unidades em: (a) diagrama Hf-Y-Nb (% peso) e (b) diagrama Zr/Hf vs Y (% peso). ....40
- Figura 28** – Diagrama binário Ca/(Ca+Na) vs Fe/(Fe+Mg) com a classificação das turmalinas das três unidades estudadas (rochas do Grupo Itapecuru, perfil laterito-bauxítico e cobertura. ....41
- Figura 29** – Fotomicrografias mostrando as formas e texturas superficiais da turmalina, rutilo e estauroлита das três unidades estudadas (rochas sedimentares, perfil laterito-bauxítico e cobertura): Na turmalina em (a), (b) e (c) formas prismáticas, e as texturas superficiais de abrasão e dissolução; No rutilo (d) e (e) marcas de ranhuras e na estauroлита (g) e (h) feição mamilar.....43
- Figura 30** – Distribuição dos valores de FWHM das reflexões 001 e 002 da caulinita com base em Amigó et al. (1994). Nas rochas do Grupo Itapecuru (RGI) ocorre variação dos índices de cristalinidade com diminuição dos valores em direção ao topo do perfil. No perfil laterito-bauxítico os índices de cristalinidade também variam, com o aumento dos valores para o topo do perfil e deste para a cobertura. ....45
- Figura 31** – Fotomicrografias (MEV) de caulinitas das rochas do Grupo Itapecuru: a) e b) caulinitas do siltito argiloso em placas euédricas pseudo-hexagonais empilhadas; c) caulinitas do argilito maciço em placas euédricas formando booklets; d) caulinitas do argilito caulinítico formando booklets de vários tamanhos com bordas irregulares.....46

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 32</b> – Fotomicrografias (MEV) de caulinitas do perfil laterito-bauxítico: a) caulinita da argila bauxítica com cristais euédricos com estrutura em acordeom; b) cristalitos de caulinita submicrométricas na argila bauxítica; c) caulinita da matriz dos esferolitos ferruginosos com cristalitos de bordas irregulares; d) caulinitas da cobertura argilosa com textura porosa. .... | 47 |
| <b>Figura 33</b> – Distribuição das concentrações médias dos elementos maiores, menores e traços no perfil laterito-bauxítico e cobertura da lavra piloto Ciríaco. ....  | 52 |
| <b>Figura 34</b> – Diagramas de dispersão para $Al_2O_3$ versus ( $TiO_2$ , PF, $SiO_2$ e $Fe_2O_3$ ) que retratam o comportamento desses pares no perfil laterito-bauxítico, cobertura argilosa e rochas intemperizadas do Grupo Itapecuru. ....  | 54 |
| <b>Figura 35</b> – Concentração de elementos maiores do horizonte bauxítico confrontados aos teores das bauxitas de Paragominas .....  | 55 |
| <b>Figura 36</b> – Diagrama ternário $SiO_2$ , - $Al_2O_3$ - $Fe_2O_3$ mostrando a variação química ao longo do perfil laterito-bauxítico, cobertura argilosa e rochas do Grupo Itapecuru; Diagrama ternário para o índice de intemperismo $Al_2O_3$ (A), $CaO + Na_2O$ (CN) e $K_2O$ (K), $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO)] \times 100$ . ....                                    | 56 |
| <b>Figura 37</b> – Normalização da composição química dos elementos menores e traços das três unidades (rochas do Grupo Itapecuru, perfil laterito-bauxítico e cobertura) confrontadas com a Crosta Continental Superior (CCS). ....   | 57 |
| <b>Figura 38</b> – Diagramas de dispersão para elementos químicos que indicam afinidade com $Fe_2O_3$ comportamento típico em evolução de perfil laterítico. ....  | 59 |
| <b>Figura 39</b> – Diagramas de dispersão entre elementos químicos imóveis, associados a minerais resistatos nas três unidades estudadas. ....   | 60 |
| <b>Figura 40</b> – Padrões de distribuição ETR das três unidades normalizados em relação aos condritos. ....   | 62 |

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores obtidos da análise de DRX através da meia altura e meia largura (FWHM) dos picos 001 e 002 da caulinita nas três unidades: Cobertura argilosa (CAR), Hz. Esferolítico Ferruginoso (HEF), Crosta Ferro-aluminosa Desmantelada (CFAD), Hz. Bauxítico (HBX), Argila Bauxítica (HABX), Argilito Caulinítico (ARC), Argilito Arenoso (ARA), Argilito Maciço (ARM), Siltito Argiloso (SIA). \*Kln (%) teores estimados por cálculo estequiométrico.....45

Tabela 2 – Concentrações médias dos elementos maiores, menores e traços de amostras representativas das três unidades estudadas confrontadas com a média da Costa Continental Superior (CCS) da terra. Legenda: ABX - Argila Bauxítica; HBX - Hz. Bauxítico; HBXC – Hz. Bauxítico Contato; CFAMB – Crosta Ferro-aluminosa Maciça base; CFAMT - Crosta Ferro-aluminosa Maciço Topo; CFAD - Crosta Ferro-aluminosa Desmantelada; HEF – Hz. Esferolítico Ferruginoso; SIA – Siltito Argiloso; ARM – Argilito Maciço; ARA – Argilito Arenoso; ARC – Argilito Caulinítico..... 50

## SUMÁRIO

|  |      |
|--|------|
| <b>DEDICATÓRIA</b> .....   | iv   |
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....  | v    |
| <b>EPÍGRAFE</b> .....  | vi   |
| <b>RESUMO</b> .....  | vii  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | viii |
| <b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....  | ix   |
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....  | xiii |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | 1    |
| 1.1 APRESENTAÇÃO.....  | 1    |
| <b>2 OBJETIVOS</b> .....   | 3    |
| 2.1 OBJETIVO GERAL.....  | 3    |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 3    |
| <b>3 LOCALIZAÇÃO E FÍSIOGRAFIA</b> .....   | 4    |
| 3.1 GEOLOGIA REGIONAL .....  | 6    |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....   | 7    |
| 4.1 AMOSTRAGEM .....   | 7    |
| 4.2.1 <b>Preparação das amostras</b> .....   | 7    |
| 4.2 <b>TÉCNICAS ANALÍTICAS</b> .....   | 8    |
| 4.2.1 <b>Difração de raios X</b> .....   | 9    |
| 4.2.2 <b>Extração de minerais pesados</b> .....  | 9    |
| 4.2.3 <b>Determinação da cristalinidade da caulinita</b> .....                                   | 9    |
| 4.2.4 <b>Microscopia óptica</b> .....  | 10   |
| 4.2.5 <b>Microscopia eletrônica de varredura</b> .....   | 10   |
| 4.2.6 <b>Quantificação mineralógica</b> .....  | 11   |
| 4.2.7 <b>Análise Química Total (AQT)</b> .....   | 12   |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....   | 13   |
| 5.1 <b>SUCESSÕES LITOLÓGICAS DO GRUPO ITAPECURU</b> .....  | 13   |
| 5.2 <b>ESTRUTURAÇÃO DOS PERFIS LATERITO-BAUXÍTICOS E COBERTURA DA LAVRA PILOTO CIRÍACO</b> ..... | 15   |

|  |    |
|--|----|
| <b>5.2.1 Horizonte Argiloso Bauxítico (HABX)</b> .....           | 17 |
| <b>5.2.2 Horizonte Bauxítico (HBX)</b> .....                     | 17 |
| <b>5.2.3 Crosta Ferro-aluminosa Maciça (CFAM)</b> .....          | 19 |
| <b>5.2.4 Crosta Ferro-aluminosa Desmantelada (CFAD)</b> .....    | 21 |
| <b>5.2.5 Horizonte Esferolítico Ferruginoso (HEF)</b> .....      | 22 |
| <b>5.3 COBERTURA ARGILOSA (CAR)</b> .....                        | 23 |
| <b>6 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA</b> .....                           | 24 |
| <b>7 MINERAIS PESADOS</b> .....                                  | 34 |
| <b>8 CRISTALINIDADE DA CAULINITA</b> .....                       | 47 |
| <b>9 COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b> .....                                | 52 |
| <b>10 CONCLUSÕES</b> .....                                       | 67 |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 68 |
| <b>ANEXO</b> .....   | 70 |
| <b>ANEXO A – Seção esquemática da lavra piloto Ciríaco</b> ..... | 71 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO

A região Amazônica e nesta principalmente o estado do Pará, detém as maiores reservas de bauxitas do Brasil. São bauxitas essencialmente formadas a partir de rochas siliciclásticas e aluminosilicáticas do Grupo Itapecuru/Formação Ipixuna (na região de Paragominas) ou Formação Alter do Chão (nas regiões de Porto Trombetas, Juruti e Almerim) (Kotschoubey et al., 2005; Costa et al., 2014). As bauxitas da Amazônia foram motivo de vários estudos iniciados na década de 60 e que se estendem a atualidade (Sombroek, 1966; Kronberg et al., 1982; Kotschoubey & Truckenbrodt, 1981; Kotschoubey et al., 1984, 1988 e 1997; Horbe & Costa, 1997 e 1999, Kotschoubey et al., 2005; Kotschoubey et al., 2005a; Cruz, 2011; Costa et al., 2014). Esses trabalhos abordam aspectos quanto a origem e evolução de perfis lateríticos bauxíticos e sua relação com a cobertura argilosa, conhecida por Argila de Belterra (Sombroek, 1966), cuja origem ainda suscita muitas controvérsias. Quanto a origem das bauxitas, elas teriam se formado *in situ*, em evolução complexa e polifásica durante o Terciário Superior ou Quaternário a partir de sedimentos da Formação Barreiras (Kronberg et al., 1982). Enquanto Truckenbrodt & Kotschoubey, (1981) e Kotschoubey et al. (1984, 1988, 1997, 2005, 2005a) demonstraram origem e evolução polifásica, porém, estabelecidas ainda no Terciário Inferior a partir de rochas sedimentares do Grupo Itapecuru/Formação Ipixuna do Cretáceo Superior (Góes, 1981). Kotschoubey et al. (2005) reforçam novamente o caráter polifásico e propõe um zoneamento faciológico regional para os depósitos da Província Bauxitífera de Paragominas (PBP).

Sem dúvida tanto os estudos pioneiros, como os mais recentes acrescentaram grandes avanços na constituição do entendimento atual sobre a formação e desenvolvimento de perfis lateríticos bauxíticos na região Amazônica, especialmente na PBP. Contudo, diante da sua grande extensão e complexidade continua carecendo de mais investigações sistemáticas e extensivas, principalmente mineralógicas e geoquímicas que possam contribuir e elucidar melhor o entendimento de sua origem e desenvolvimento.

Além dos depósitos de bauxita de Paragominas, que ainda não foram investigados de forma detalhada, as bauxitas de Rondon do Pará que constituem também expressivos depósitos, são ainda mais desconhecidos. Elas constituem atualmente o mais novo empreendimento do grupo Votorantim com vistas a produção de bauxita e alumina *in situ*. As pesquisas de exploração nesta região iniciaram ainda em 1974 através da CBM uma das empresas de seu grupo. Entretanto as pesquisas de exploração mineral somente avançaram através do Projeto Alumina Rondon nestes últimos anos. Motivados pelos trabalhos já realizados na região e pela oportunidade talvez única de estudar um depósito bauxítico em excelente exposição em uma lavra piloto, desenvolveu-se o presente estudo. Este compreendendo pesquisas mineralógicas e geoquímicas com o objetivo de contribuir para o entendimento de sua formação e evolução, e ao mesmo tempo avaliar sua correlação com os depósitos de Paragominas e outros da região Amazônica, que em parte já se encontram bem investigados. Com esses resultados espera-se contribuir para ampliar as atividades de exploração mineral de bauxitas na região Amazônica.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

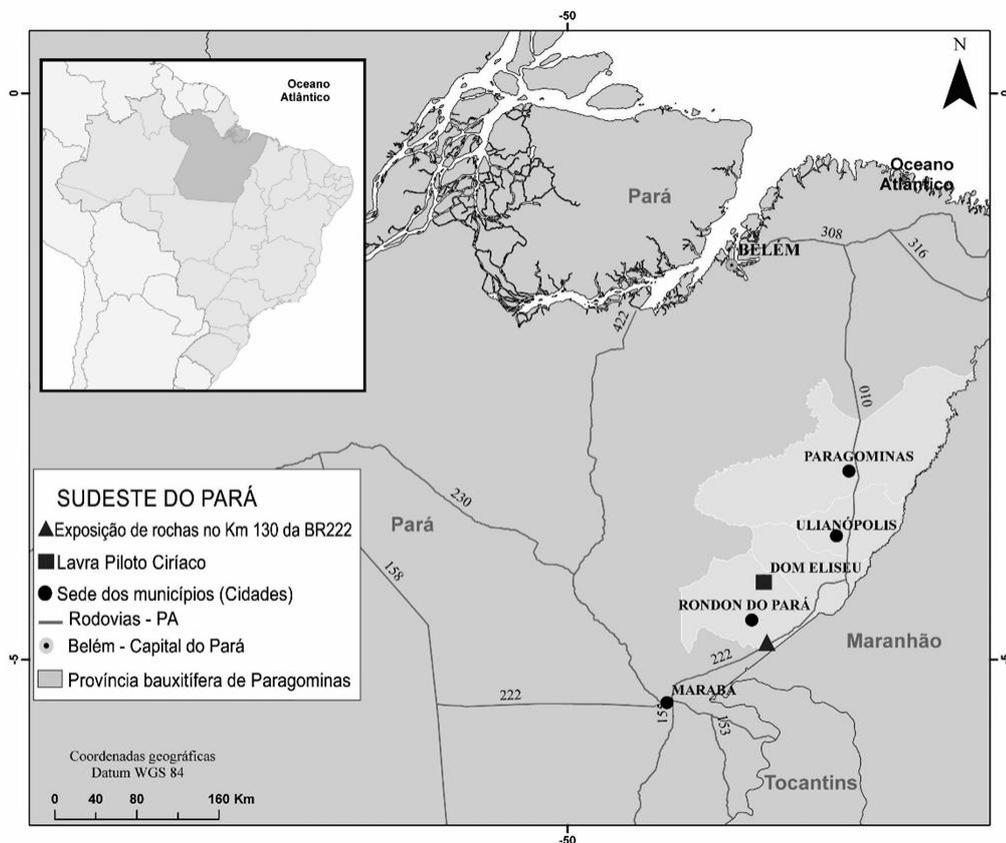
Estudo do perfil laterítico-bauxítico e sua cobertura na lavra piloto Ciríaco (LPC) e sua possível relação com as rochas do Grupo Itapecuru (GIT) e as bauxitas de Paragominas.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterização geológica do perfil laterito-bauxítico e sua cobertura na lavra piloto Ciríaco e possível afinidade com os sedimentos de rochas siliciclásticas do Grupo Itapecuru, prováveis rochas mãe do perfil laterítico que se encontram expostas na BR 222 Km 130;
- Caracterização mineralógica e morfológica;
- Determinar a composição química e avaliar a sua importância para a caracterização dos materiais e sua contribuição para entendimento genético e evolutivo;
- Extração e caracterização morfológica, mineralógica e química dos zircões e sua importância para definição de proveniência e afinidade entre o perfil laterítico, cobertura e as rochas do Grupo Itapecuru;
- Correlações entre formações lateríticas bauxíticas da lavra piloto Ciríaco e sua relação com as bauxitas de Paragominas e Juruti.

### 3 LOCALIZAÇÃO E FISIOGRAFIA

O presente trabalho foi desenvolvido na lavra piloto Ciríaco (coordenadas centrais: 08° 01'79" S de latitude e 95° 23' 79" W de longitude na zona SB-22) dentro do Projeto Alumina Rondon do Grupo Votorantim S/A, no platô Rondon Norte, município de Rondon do Pará, Estado do Pará. O acesso a lavra a partir de Rondon do Pará é feito por rodovia não pavimentada com 56 km de extensão que dá acesso a Vila Santa Lúcia. Como não foi alcançada rocha pré-laterização na lavra, e por sua vez aflora parcialmente intemperizada na rodovia BR 222 km 130 (coordenada 08°05'083" S de latitude e 94° 60'88" W de longitude, zona SB-22), este local foi selecionado para descrição e coleta de amostras representativas das possíveis rochas-mães do perfil laterito-bauxítico. Ele está a sudeste da lavra piloto, e em terras do município de Abel Figueiredo. A sede do município de Rondon do Pará, a cidade Rondon do Pará, que conta com bom apoio logístico, se encontra a 570 km de Belém capital do Pará (Figura 1), interligadas por rodovias asfaltadas.



**Figura 1** – Mapa simplificado do nordeste do estado do Pará com a localização da área de estudo.

A região de Rondon do Pará comporta atualmente um clima tropical quente e úmido com dois períodos bem distintos de distribuição: um chuvoso que se estende de janeiro a maio com precipitação em torno de 2050 a 2450 mm e outro relativamente seco de junho a dezembro, com chuvas ocasionais. A temperatura média anual oscila entre 23,5 °C e 26,9 °C (INMET, 2013). Rondon, assim como as demais regiões que abrangem a Província de Paragominas apresenta superfícies planas tabulares, nas quais, se levantam platôs baixos delimitados em rebordos erosivos e amplos vales chatos (Dantas & Teixeira, 2013). Além destas feições, Rondon do Pará é marcada por vales fluviais abertos e relevo ondulado com vários morros (Figura 2). A vegetação atual é representada por extensas áreas de pastagem para bovinos, em parte cultivo de soja e reflorestamento com eucaliptos (*Eukalyptus*) e teca (*Tectona grandis*), substituindo a floresta tropical, que ainda se encontra na forma de pequenas manchas. Revelando uma paisagem com forte componente antrópico dos últimos 40 anos.



**Figura 2** – Visão panorâmica da região de Rondon, com destaque para o relevo ondulado e superfícies de aplainamento dos platôs.

Fonte: Heliana Pantoja (outubro/2013).

### 3.1 GEOLOGIA REGIONAL

A região de Rondon do Pará desenvolveu-se sobre rochas sedimentares siliciclásticas e aluminossilicatadas do Grupo Itapecuru de idade Cretácea como parte da Bacia do Grajaú (Rossetti, 2001). Esta Bacia se estabeleceu sobre gnaisses, granitos, e rochas metassedimentares do cinturão de dobramento Gurupi, Tocantins - Araguaia, Cráton São Luís e Bacia do Parnaíba (Rossetti, 2001). No seu conjunto essa Bacia foi preenchida com arenitos, conglomerados, evaporitos, calcários e folhelhos, que constituem o Grupo Itapecuru que envolve a Formação Alcântara, Formação Ipixuna e Formação Cujupe (Rossetti et al., 1997; Rossetti & Truckenbrodt, 1997). Logo após o preenchimento da Bacia do Grajaú a região experimentou longo período de estabilidade tectônica e mudanças climáticas de seco para úmido culminando com o desenvolvimento de extensos e profundos depósitos lateríticos, levando a formação de bauxitas, aqui representadas pela Província Bauxitífera de Paragominas, que tiveram nas rochas do Grupo Itapecuru (Kotschoubey et al., 1997; Anaisse et al., 2001) a sua principal fonte. A bauxita de Rondon do Pará também pertenceria provavelmente a este mesmo cenário geológico, dado a sua proximidade, e consideradas como parte da mesma Província descrita por Kotschoubey et al. (1997; 2005; 2005a). Na região em apreço afloram rochas da porção noroeste da Bacia do Grajaú representadas pelo Grupo Itapecuru e Formação Ipixuna. Os litotipos do Grupo Itapecuru são arenitos caulíníticos, friáveis intercalados com argilitos e níveis de conglomerados, siltitos, argilitos avermelhados e brechas intraformacionais depositados em sistema estuarino-lagunar (Góes, 1981;1995; Kotschoubey et al., 2005a). Enquanto que, a Formação Ipixuna apresenta arenitos caulíníticos intercalados com argilitos e siltitos depositados em sistema flúvio-estuarino (Góes, 1981; Kotschoubey et al., 2005a). Segundo Kotschoubey et al. (2005) ambos sustentam o manto laterítico ferruginoso/aluminoso, bauxítico na porção central e setentrional da Província bauxitífera de Paragominas.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 DESCRIÇÃO GEOLÓGICA E AMOSTRAGEM**

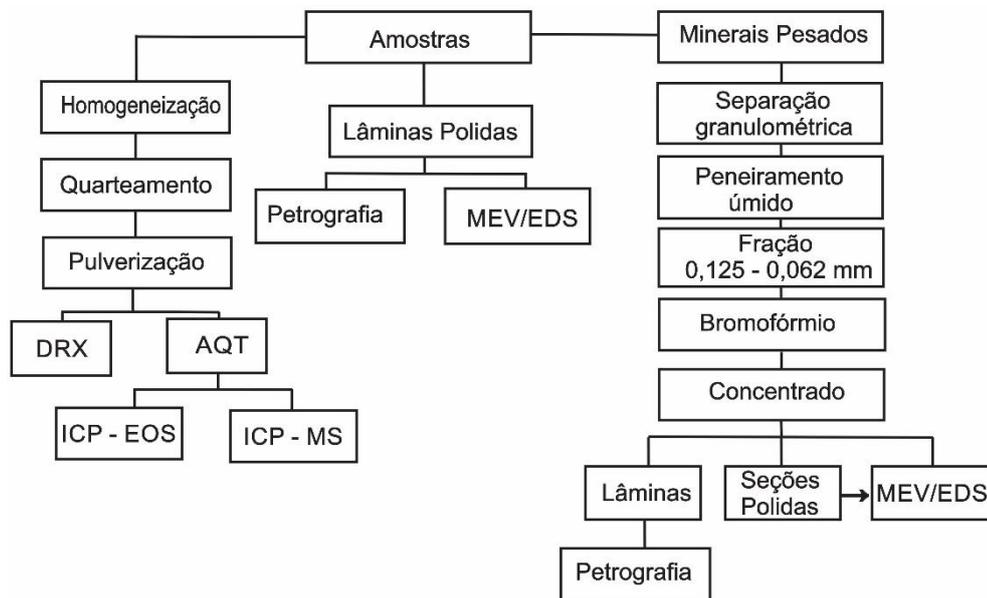
Os trabalhos de campo foram realizados em duas grandes exposições rochosas: lavra piloto Ciríaco no município de Rondon do Pará aberta pelo Projeto Alumina Rondon da Votorantim e em um grande corte de estrada as margens da BR 222 km 130 no município de Abel Figueiredo. A exposição na BR 222 km 130 se encontra a 300 m de altitude. Aqui foi descrito um perfil geológico e a partir deste se realizou coleta de amostras representativas de cada variação faciológica. A lavra piloto Ciríaco, cujo topo se encontra a 255 m de altitude, tem 35 m de comprimento e está direcionada N-S, com 18 m de largura (direção Leste-Oeste) e profundidade variando de 20 a 30 m. Dentro da cava foram descritos 5 perfis geológicos representativos da mesma, sendo dois na parede leste, dois na parede oeste e um na parede sul, todos acompanhados de imagens, que também se estenderam ao conjunto da cava. Em seguida foram coletadas 36 amostras dos principais horizontes e suas variações em todos os cinco perfis. A amostragem no perfil laterito-bauxítico obedeceu a espessura do horizonte, em que aqueles com mais de 1m a coleta envolveu uma amostra da base e outra do topo. A amostragem da cobertura argilosa foi realizada anteriormente pelos técnicos da Votorantim Metais a cada 1m de intervalo. Durante os trabalhos de campo descrições litológicas tentaram identificar variações granulométricas, cor, texturas, estruturas, vazios, grau de coesão, dureza e constituição mineral, representada principalmente por: quartzo, gibbsita, caulinita e óxi-hidróxidos de ferro. Assim foi possível reconhecer as variações litológicas e os principais horizontes do perfil laterito-bauxítico e sua cobertura e elaborar os perfis.

#### **4.1.1 Preparação das amostras**

Após a coleta as amostras foram preparadas na Oficina de Preparação de Amostras (OPA), laboratório de gemologia e no laboratório de sedimentologia, todos pertencentes ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará e tratadas da seguinte forma:

- 1) Separação de fragmentos para confecção de lâminas;
- 2) Homogeneização e quarteamento das amostras;
- 3) Separação de uma alíquota de 150 g para as diversas análises;

- 1) Das 150 g foram retiradas 25 g e pulverizadas em graal de ágata para análises químicas e difração de raios X;
- 2) 100g da crosta ferro-aluminosa maciça, crosta ferro-aluminosa desmantelada e bauxita foram britadas a 3 mm no OPA para separação de minerais pesados;
- 3) Por fim os 100 g de amostras para extração de minerais pesados passaram por desagregação em graal de ágata, separação granulométrica em ultrassom e peneiramento a úmido (Figura 3).



**Figura 3** – Fluxograma dos procedimentos de preparação de amostras e das análises realizadas.

#### 4.2 TÉCNICAS ANALÍTICAS

Para a caracterização mineralógica empregou-se difração de raios X (DRX), microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV), disponíveis nos laboratórios do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (PPGG/IG/UFGPA). As análises químicas foram realizadas por ICP-EOS e ICP-MS na Acme Analytical Laboratories (Vancouver) Ltd, enquanto a análise microquímica no MEV-EDS no LABMEV e LAMIGA (PPGG/IG/UFGPA).

#### **4.2.1 Difração de raios X**

As principais fases minerais foram identificadas por difração de raios X (DRX), em amostra total pelo método do pó. Para este fim, empregou-se difratômetro de raios X da marca PANalytical, modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), com goniômetro PW 3050/60 ( $\theta/\theta$ ), tubos de raios X cerâmico, anodo de cobre ( $\lambda_{CuK\alpha1} = 1,540598 \text{ \AA}$ ) e filtro  $K\beta$  de níquel. O modelo do equipamento é o PW3373/00 com foco fino longo (2200 W – 60 KV) e detector tipo RTMS, X'Celerator. A varredura foi de 3 a 75° em  $2\theta$ ; voltagem de 40 KV e corrente de 30 mA; tamanho do passo de 0,02° em  $2\theta$  e tempo passo de 10s. A interpretação de dados dos registros se obteve através do software X'PERT HIGHSCORE por comparação com fichas do PDF (Powder Diffraction Files) fornecidas pelo ICDD (International Center for Diffraction Date). As análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização Mineralógica (LCM).

#### **4.2.2 Extração de minerais pesados**

Os clássicos minerais pesados, embora acessórios das rochas, incluindo as lateríticas, podem auxiliar na identificação da proveniência e fonte dos sedimentos, e ainda contribuir para avaliar processos intempéricos. Os minerais pesados foram extraídos da fração 0,062 - 0,125 mm e separados com bromofórmio. Contudo, antes da extração desses minerais, as amostras dos horizontes (bauxítico, crosta ferro-aluminosa maciça, crosta ferro-aluminosa desmantelada e a matriz dos esferolitos) passaram por extrações respectivamente do ferro amorfo, argilominerais e da gibbsita para facilitar a identificação dos mesmos, envolvidos por estas fases minerais. Para os procedimentos se utilizou cerca de 20 g de cada amostra colocadas em béquer de teflon com 40 mL de ácido clorídrico a 10 %, aquecidas em banho de areia a 60 °C por uma hora, lavadas com água deionizada e seca em estufa a 40 °C. Posteriormente receberam 50 mL de NaOH a 5 M e novamente foram aquecidas a 60 °C, lavadas com água deionizada e secas em estufa a 40 °C.

#### **4.2.3 Determinação da cristalinidade da Caulinita**

A determinação da cristalinidade da caulinita tem sido empregada na tentativa de compreender as características deste mineral nos sedimentos do Grupo Itapecuru, perfil laterito-bauxítico e na cobertura argilosa. Para a determinação da cristalinidade se utilizou o índice de Amigó et al. (1994), que relaciona valores a cristalinidade da caulinita através dos resultados de difração de raios X em lâmina orientada, por meio da largura e meia altura FWHM (Full Width at Half Maximum) das reflexões 001 e 002 (ângulos entre 10° e 15° e 22° a 30°). Na qual os valores ( $> 0,4$ ) indicam baixa cristalinidade, enquanto os ( $< 0,3$ ) média a alta cristalinidade. Como as amostras do Grupo Itapecuru apresentaram os picos 001 e 002 bem individualizados em difração de raios X pelo método do pó não foi necessária a análise em lâmina orientada.

#### **4.2.4 Microscopia óptica**

Foi empregada para o estudo mineralógico e micromorfológico das rochas sedimentares do Grupo Itapecuru parcialmente intemperizadas e dos perfis laterítico-bauxíticos, bem como para a identificação e caracterização morfológica dos minerais pesados extraídos. Foram confeccionadas 18 lâminas polidas de amostras das crostas, bauxita e esferolitos, e montadas 10 lâminas com minerais pesados. Os minerais pesados transparentes foram avaliados de modo semiquantitativos por contagem de 100 a 150 grãos, sendo considerados entre estes os com menos de 1 % como traço. Empregou-se microscópio de luz transmitida e refletida trinoculares da marca Zeiss Axiolab 2500, com câmera digital acoplada pertencente ao LAPETRO PPGG/IG/UFGA.

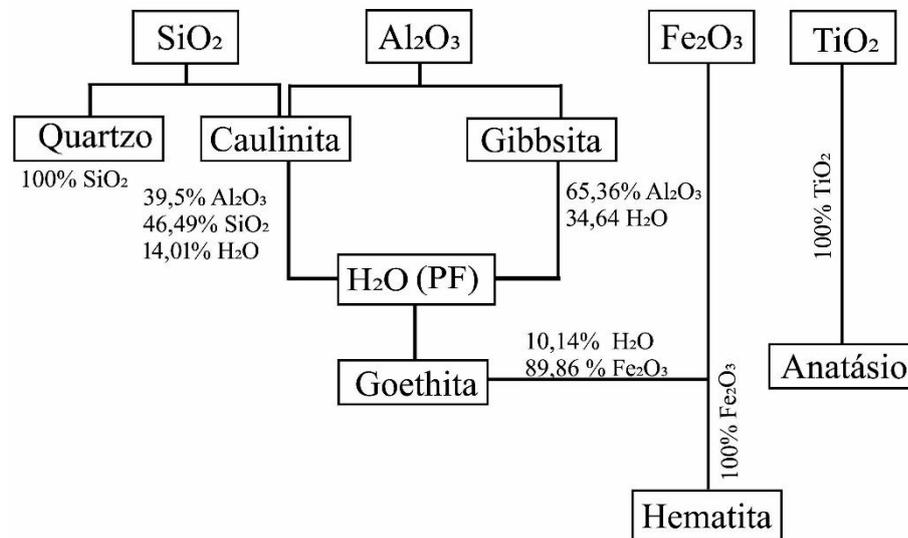
#### **4.2.5 Microscopia eletrônica de varredura**

As análises de MEV/EDS foram empregadas tanto para o estudo das rochas do Grupo Itapecuru como do perfil laterito-bauxítico e cobertura argilosa, com vistas a caracterização mineral (morfologia e composição química, considerando os elementos mais abundantes Fe, Ti, Si, Zr e Al). Esta técnica também foi empregada para a caracterização dos minerais pesados via morfologias e composição química.

Para classificação dos cristais de zircões aplicou-se a metodologia de Pupin (1980) e, como refinamento foram confeccionadas seções polidas para caracterização das feições internas com base em Corfu et al. (2003). Todos os materiais foram metalizados com ouro para facilitar a condutividade elétrica. Empregou-se o equipamento LEO-1430 e as condições de análises das imagens transcorreram com elétrons secundários, corrente do feixe de elétrons =  $90 \mu\text{A}$ , voltagem de aceleração constante = 10 kV e distância de trabalho = 15 mm. As análises realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LABMEV) e no Laboratório de Mineralogia e Geoquímica Aplicada (LAMIGA) do (PPGG/IG/UFGA). O microscópio eletrônico de varredura do LAMIGA é da marca Hitachi (modelo TM 3000) e, empregou-se também detector de elétrons secundários, mas com voltagem 15 kV, as análises semiquantitativas foram realizadas com detector SED 3000 acoplado ao MEV através do software Swift ED.

#### **4.2.6 Quantificação mineralógica**

A quantificação das fases minerais no perfil laterito-bauxítico e cobertura foi realizada por cálculo estequiométrico a partir das análises químicas em amostra total, identificação por difração de raios X, microscopia ótica e composição química teórica de cada mineral. Os procedimentos empregados com base nos trabalhos de Kotschoubey et al. (1997) e Peixoto & Horbe, (2008) estão ilustrados no fluxograma da figura 4. Nos horizontes onde havia apenas caulinita todo o  $\text{SiO}_2$  foi atribuído a esta. Em contrapartida quando havia caulinita e quartzo todo o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  foi considerado da caulinita, permitindo deste modo calcular a quantidade total  $\text{SiO}_2$  necessário para a sua constituição e o restante atribuído ao quartzo. Para a obtenção do percentual de gibbsita e caulinita primeiramente determinava-se a quantidade necessária de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$  para caulinita e o excedente então empregados para calcular a gibbsita. Os valores remanescentes de  $\text{H}_2\text{O}$  e os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  foram direcionados para goethita e/ou hematita e, por fim, todo o  $\text{TiO}_2$  destinado ao anatásio.



**Figura 4** – Fluxograma com a ilustração do cálculo estequiométrico das principais fases minerais identificadas nas amostras analisadas.

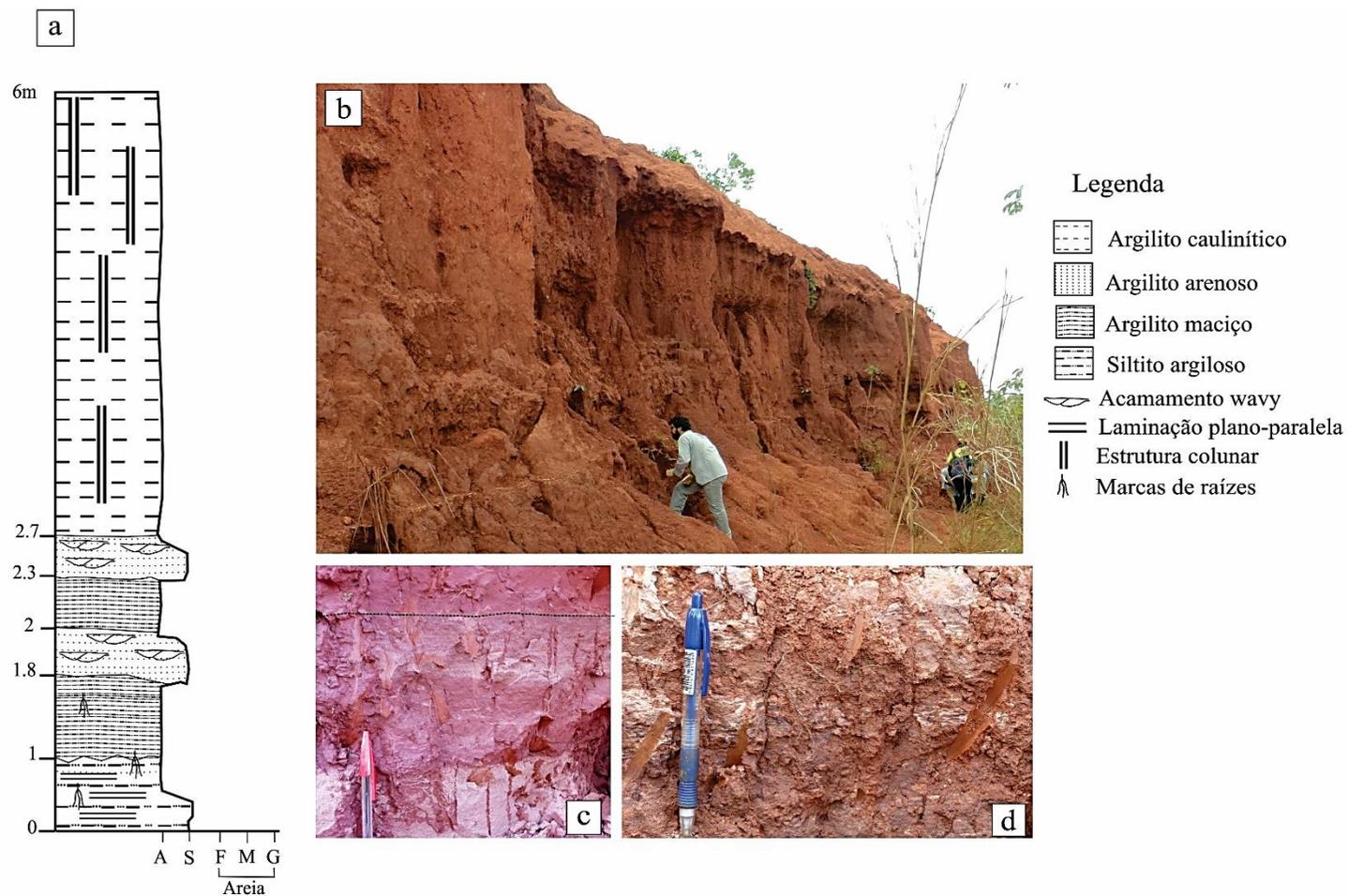
#### 4.2.7 Análise Química Total (AQT)

Para avaliação da composição química dos materiais investigados e sua variação ao longo dos perfis e entre estes, além de possíveis relações com a cobertura argilosa e as rochas sedimentares intemperizadas do Grupo Itapecuru foram selecionadas 20 amostras de três perfis. Os elementos maiores foram determinados por ICP-EOS após fusão total de cada amostra com metaborato de lítio. A determinação dos elementos traços e terras raras ocorreu por ICP-MS, após também passar por fusão total, com metaborato/tetraborato de lítio e serem digeridos em ácido nítrico, já os metais preciosos e os metais de base foram digeridos com água régia. A perda ao fogo (PF) foi obtida após a calcinação das amostras a 1000 °C, enquanto o carbono total (TOT/C) e o enxofre total (TOT/S) foram analisados por LECO.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 SUCESSÕES LITOLÓGICAS DO GRUPO ITAPECURU

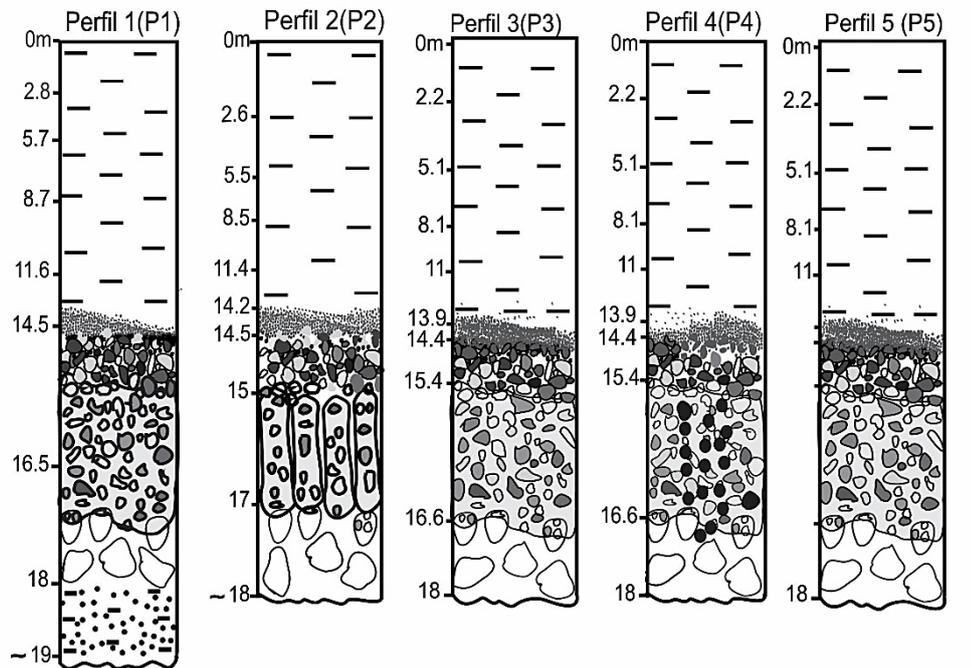
A base da unidade aflorante é constituída por siltito argiloso marrom avermelhado, que é sobreposto por argilito maciço, este por sua vez sucedido por um argilito arenoso com acamamento wavy e ao topo um argilito ligeiramente caulínítico com feições colunares verticais. O siltito argiloso marrom avermelhado tem no mínimo 1m de espessura, localmente com laminação plano-paralela em camada lateralmente contínua. Grãos (silte) de quartzo moderadamente selecionados, em geral subarredondados a arredondados se encontram imersos em material argiloso de coloração marrom avermelhada, com pontuações milimétricas esbranquiçadas, interpretadas como de caulinita segundo pretéritos grãos de feldspatos. O argilito maciço logo acima, com 80 cm de espessura, é friável apresenta marcas de raízes de coloração também marrom avermelhado. O argilito arenoso que sucede tem apenas 20 cm de espessura, no qual, é possível identificar acamamento wavy e grãos de quartzo tamanho areia em matriz argilosa. Segue-se então novamente o argilito maciço e argilito com acamamento wavy que converge para o argilito caulínítico com estruturas colunares, também de coloração marrom amarelada e aspecto untuoso. A morfologia externa dessas estruturas colunares sugere perfurações de raízes, cujas cavidades foram preenchidas com material lateral e camadas de topo. A sucessão como um todo (Figura 5) corresponde a um pacote sedimentar com ligeira granodecrescência ascendente e espessamento do argilito em direção ao topo aparente da seção. Basicamente as diferenças entre os litotipos da seção estudada, são apenas granulométricas e em parte pelas estruturas sedimentares, como laminação plano - paralela, acamamento wavy, marcas de raízes e colunas.



**Figura 5** – Exposição de rochas do Grupo Itapecuru na BR 222 Km 130: a) Perfil descrito e amostrado; b) Visão geral da sucessão estudada; c) Marcas de raízes recentes no argilito arenoso; d) Argilito com acamamento wavy.

## 5.2 ESTRUTURAÇÃO DOS PERFIS LATERITO-BAUXÍTICOS E COBERTURA DA LAVRA PILOTO CIRÍACO

Todos os perfis investigados são em termos gerais constituídos dos mesmos horizontes, assim denominados (da base para o topo): Horizonte Argiloso Bauxítico (HABX), Horizonte Bauxítico (HBX), Crosta Ferro-aluminosa Maciça (CFAM), Crosta Ferro-aluminosa Desmantelada (CFAD), Horizonte Esferolítico Ferruginoso (HEF) e ao topo uma Cobertura Argilosa (CAR) (Figura 6 e 7), equivalente a Argila de Belterra.



### Legenda

|   |   |
|---|---|
|  Cobertura argilosa                  |  Nódulos com filme goethíticos                         |
|  Horizonte esferolítico ferruginoso  |  Crosta ferro-aluminosa com estrutura colunar          |
|  Crosta ferro-aluminosa desmantelada |  Horizonte bauxítico com blocos de bauxita ferruginosa |
|  Crosta ferro-aluminosa maciça       |  Argila bauxítica                                      |

**Figura 6** – Perfis descritos e amostrados na lavra piloto Ciríaco.

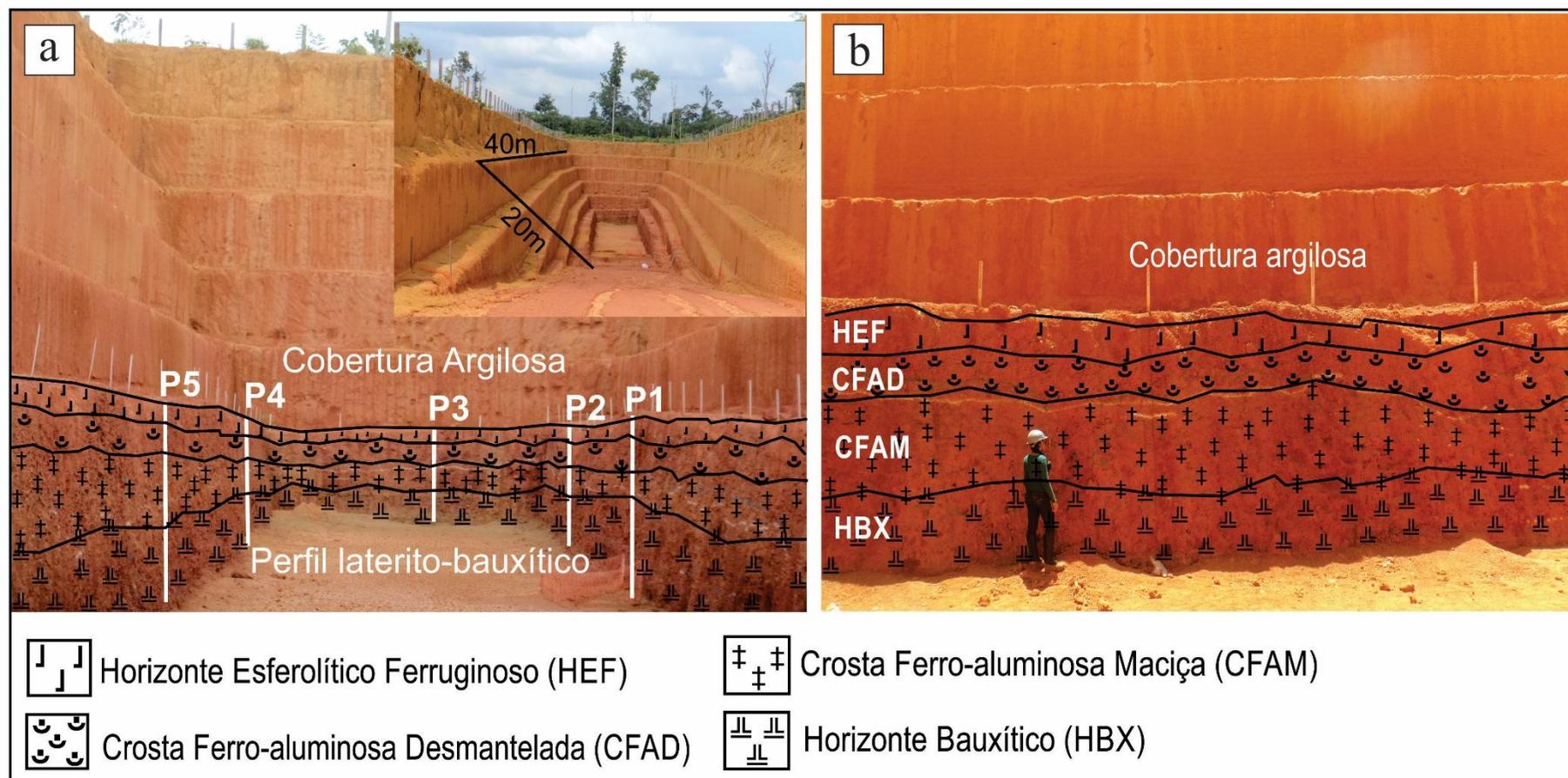


Figura 7 – Lavra piloto Ciríaco: a) Posição dos perfis descritos; b) Principais horizontes individualizados

### **5.2.1 Horizonte Argiloso Bauxítico (HABX)**

O horizonte argiloso bauxítico de coloração rosa a avermelhada, é formada por porções mm compactas, gibbsíticas e imersas em domínio argiloso caulínico. Pontuações esbranquiçadas representadas por fragmentos (mm) microporosos, provavelmente de caulim (caulinita), também se dispersam na matriz argilosa marrom avermelhada. O HABX apresenta espessura aparente que varia de 0,60 m a 1,5 m, em média 1,2 m e passa gradual e irregular para o horizonte bauxítico acima. O HABX não está exposto em grande parte da lavra, pois não se constitui em potencial minério.

### **5.2.2 Horizonte Bauxítico (HBX)**

O HBX corresponde à bauxita maciça com espessura em torno de 1 m (perfis P1 e P2) a 1,4 m nos demais (Figura 8). A coloração é avermelhada a roxa, muito porosa e com aspecto “arenoso”. Macrocristais (mm) de gibbsita ocupam pequenas cavidades, as quais, quando mais abundante desenvolve uma trama cavernosa. Blocos centimétricos a decimétricos compactos e também microporosos, formados por gibbsita microcristalina, em tonalidade rosada estão envoltos por matriz terrosa a argilosa. O contato com a crosta ferro-aluminosa maciça sobreposta, é gradual e também irregular.

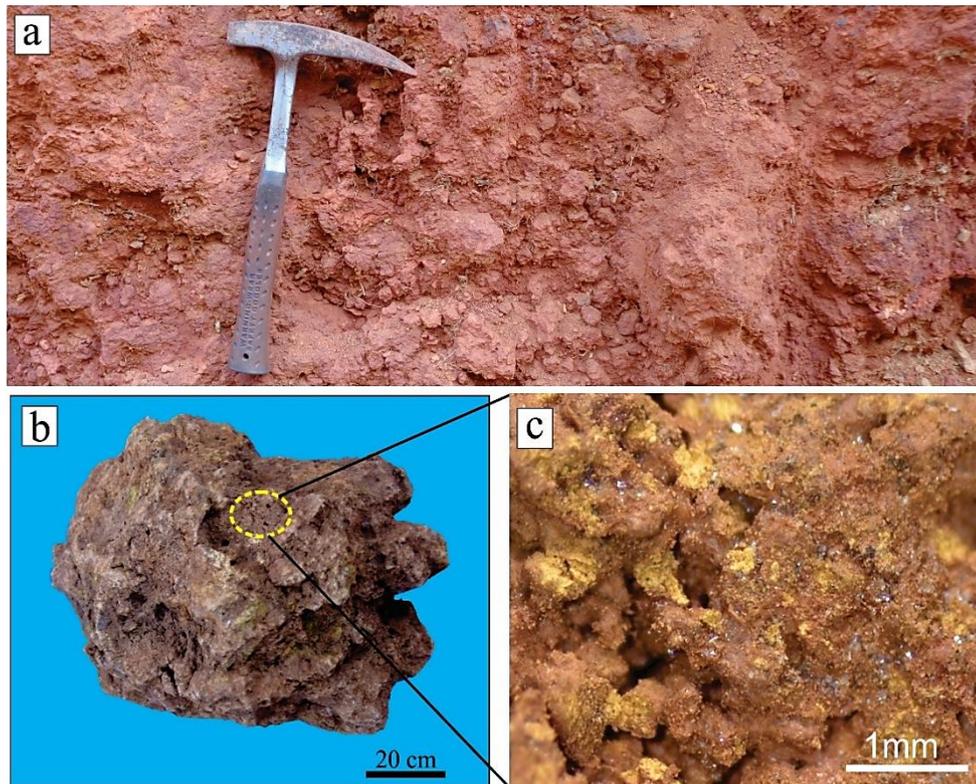
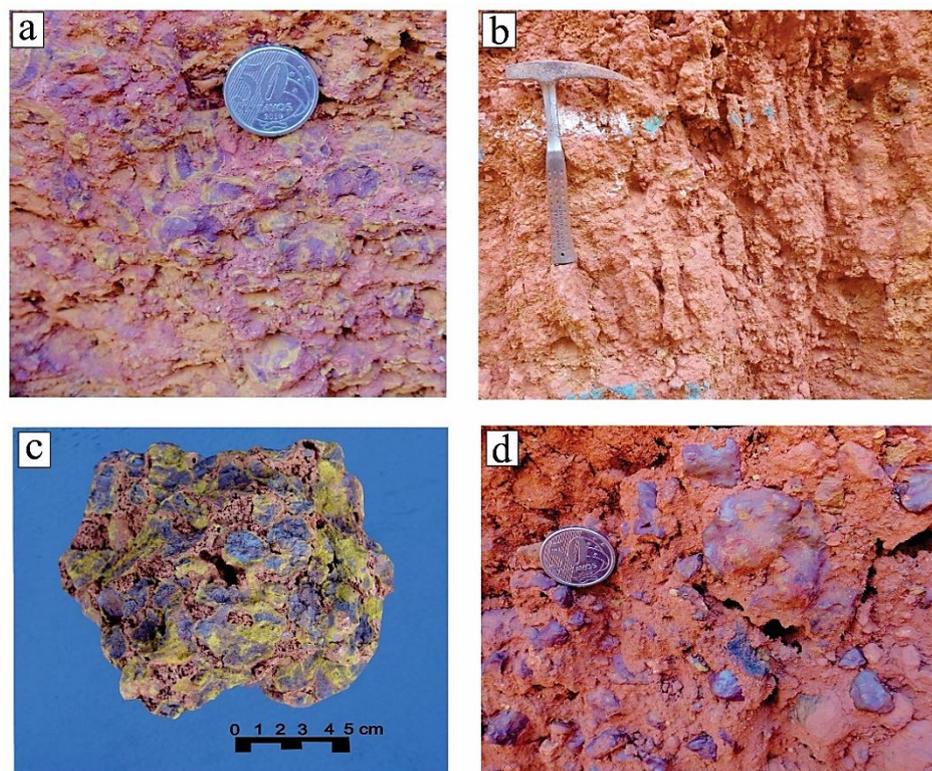


Figura 8 – Horizonte bauxítico: a) Blocos de bauxita decimétricos com textura “arenosa”, macroporosa e coloração avermelhada; b) Amostra de mão da bauxita retirada próximo ao contato com a crosta ferro-aluminosa maciça; c) Detalhe da amostra de mão em lupa binocular de goethita pulverulenta e macrocristais de gibbsita.

### 5.2.3 Crosta Ferro-aluminosa Maciça (CFAM)

A CFAM com espessura variável de 0,8 m a 1,25 m nos perfis (P1, P2, P4) e de 1,5 m em (P3 e P5) se apresenta na frente de lavra desde, aspecto colunar (P2) e possíveis cavidades de perfurações de raízes pivotantes (P4), preenchidas por material incoesos, esferolítico a nodular, matriz argilosa amarela até maciça (P1, P3 e P5). Internamente a crosta é formada por nódulos e esferolitos centimétricos, marrons a vermelhos, em matriz rosa microcristalina e microporosa, conferindo-lhe localmente um aspecto tipo pele de onça ou brechóide (Figura 9 a). Os nódulos e esferolitos alcançam até 3 cm de diâmetro e normalmente são envolvidos por um córtex amarelo ocre de aspecto pulverulento e geralmente delgado, mas em algumas porções se torna levemente espesso (Figura 9 c). É notável também nos espaços internódulos a presença de uma matriz argilosa de aspecto poroso, provindo talvez de horizontes superiores (Costa, 1984; Kotschoubey et al., 2005).

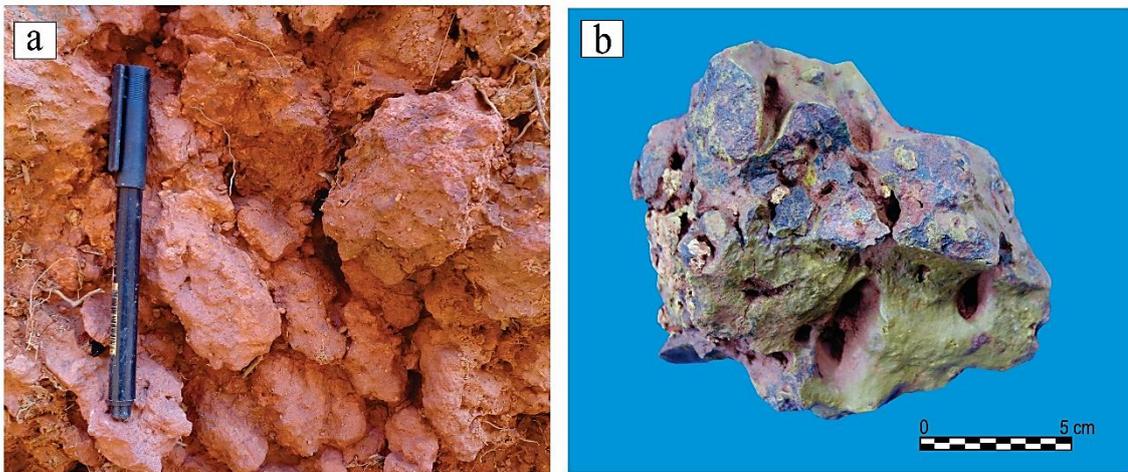
No topo, se encontra fragmentada em contato suave e predominantemente ondulado com a CFAD. O aspecto fragmentado sugere que em algum momento a CFAM passou por exposição subaérea ocasionando sua erosão. No perfil 2 a CFAM se diferencia por apresentar uma estrutura colunar (Figura 9 b) de textura maciça e muito porosa com inúmeros canais preenchidos com material argiloso bastante friável. Internamente as colunas mostram feições semelhantes as crostas dos outros perfis. Em contrapartida a CFAM do perfil 4 apresenta feições tubulares, sugestivas de perfurações de raízes pretéritas, que parecem ter fragmentado e originado a formação de material argiloso, muito mais abundante neste perfil (Figura 9 d). Em termos gerais as CFAM expostas na lavra piloto Ciríaco são correlacionáveis as crostas ferro-aluminosas descritas em outros depósitos laterito-bauxíticos por Tardy, (1993); Horbe & Costa, (1999); Kotschoubey et al. (1997 e 2005) e Costa et al. (2014).



**Figura 9** - Imagens da crosta ferro-aluminosa maciça: a) Nódulos de hematita com auréola de Al-goethita; b) Estrutura colunar com canais preenchidos por material argiloso; c) Nódulos de hematita substituídos parcialmente por Al-goethita, que invade também o cimento microcavernoso; d) Nódulos de hematita com película lustrosa de goethita na crosta ferro-aluminosa do perfil 4.

#### 5.2.4 Crosta Ferro-aluminosa Desmantelada (CFAD)

A crosta ferro-aluminosa dismantelada (Figura 10 a) é semelhante a crosta ferro-aluminosa maciça, porém é desagregada, tem uma espessura que varia nos perfis de 0,80 m a 1 m. Fragmentos e blocos ferro-aluminosos encontram-se imersos em matriz “arenoargilosa”, pouco abundante de cor rósea, ela é sobreposta pelo horizonte esferolítico ferruginoso em contato brusco e ondulante. Os fragmentos são decimétricos e, as vezes, são revestidos por uma fina película amarelo ocre (Figura 10b). Apresentam várias cavidades alongadas ou arredondadas algumas, preenchidas parcialmente por um material de coloração esbranquiçada.

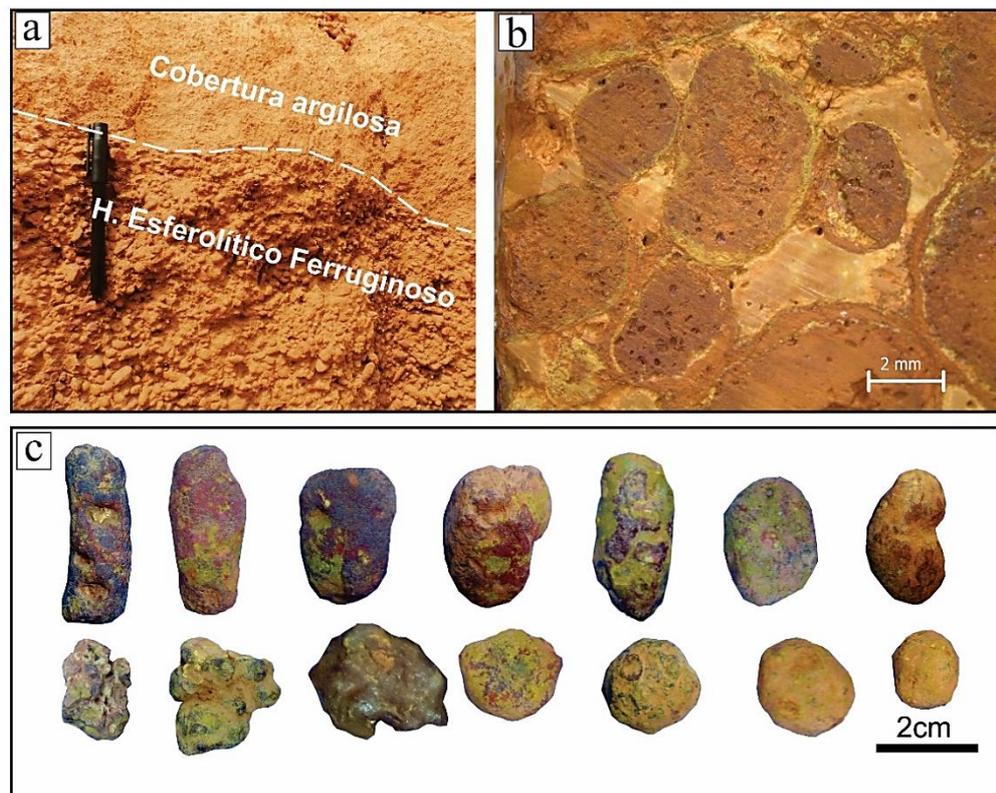


**Figura 10** – Crosta ferro-aluminosa dismantelada: a) Blocos de crosta ferro-aluminosa dismantelada envolvidas por óxi-hidróxidos de Fe-Al em matriz argilosa incoesa; b) Cavidades alongadas, algumas preenchidas com material esbranquiçado.

### 5.2.5 Horizonte Esferolítico Ferruginoso (HEF)

O horizonte esferolítico ferruginoso forma um pacote que varia de 0,25 cm até 60 cm de espessura e passa bruscamente para a cobertura argilosa (Figura 11a). Os esferolitos são mais coesos na base e tornam-se incoesos no topo. Apresentam-se tanto individualmente, como agregados. Na base em contato com a CFAD exibem formas subarredondadas, alongadas, ou irregulares (Figura 11b), enquanto em direção ao topo são mais arredondados e subsféricos.

O diâmetro deles varia da ordem de menos de 1 cm até 3 cm, em granodecrescência para o topo, sugerindo seleção gradativa. Superficialmente são polidos e brilhosos, vermelhos arroxeados com porções amareladas e mais raramente com pontuações esbranquiçadas (Figura 11c).



**Figura 11** – Horizonte esferolítico ferruginoso: a) Contato brusco entre o HEF e cobertura argilosa; b) Imagem em lupa binocular mostrando esferolitos ferruginosos envolvidos por goethita ocre em matriz argilosa; c) Formas mais comuns dos esferolitos.

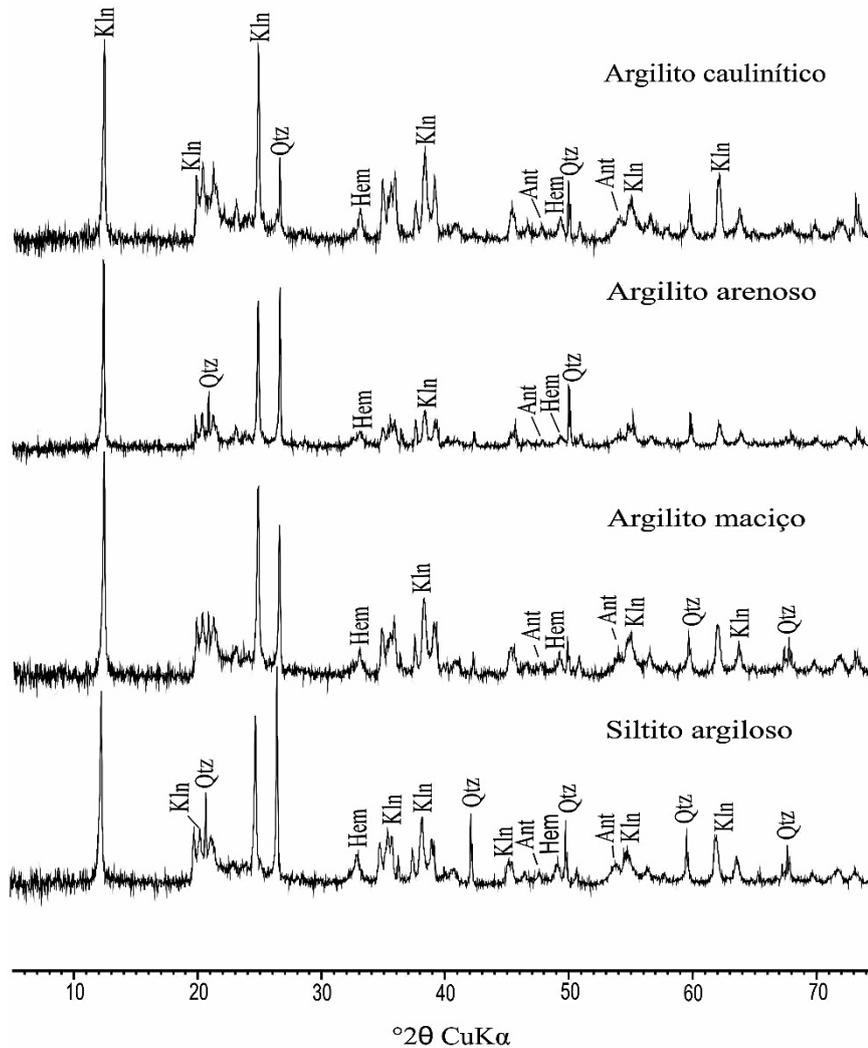
Internamente são lilás ou avermelhados, microporosos. Os esferolitos se encontram densamente empacotados com uma matriz “argiloarenosa” e, portanto restrita. Além dos esferolitos, é possível observar normalmente na base do horizonte, fragmentos irregulares da CFAD. Enquanto próximo ao topo ocorrem nódulos de bauxita de textura fina e coloração creme amarelada de aspecto porcelanado, sem a individualização de um horizonte. O contato do HEF com o horizonte subjacente, juntamente com os aspectos superficiais e composicionais destes, sugerem que sejam produtos de dismantelamento químico e erosivo da crosta ferro-aluminosa subjacente, depositada por gravidade na meia encosta (Kotschoubey et al., 1997, 2005; Costa, 1991; Horbe & Costa, 1999 e Costa et al., 2014). Segundo Costa, (1991) e Costa et al. (2005), os esferolitos ferruginosos se estabeleceram quando a crosta foi exposta a clima seco e semiárido, com pouca cobertura de floresta e plena atividade erosiva.

### 5.3 COBERTURA ARGILOSA (CAR)

A cobertura argilosa está onipresente em todos os perfis e apresenta espessura variável, em média de 13,5 m. Apresenta-se homogênea em termos de coloração e granulometria muito fina e friável. É ligeiramente avermelhada na base e amarelada para o topo. No contato com HEF delinea-se pequenos nódulos gibbsíticos (< 1 cm) de cor creme e aspecto porcelanado dispersos na matriz argilosa. Essas características permite correlacioná-la regionalmente com a Argila de Belterra descritas por: Sombroek, (1966), Truckenbrodt & Kotschoubey, (1981), Truckenbrodt et al. (1991), Horbe, (1995), Boulangé & Carvalho, (1997); Horbe & Costa, (1999 e 2005).

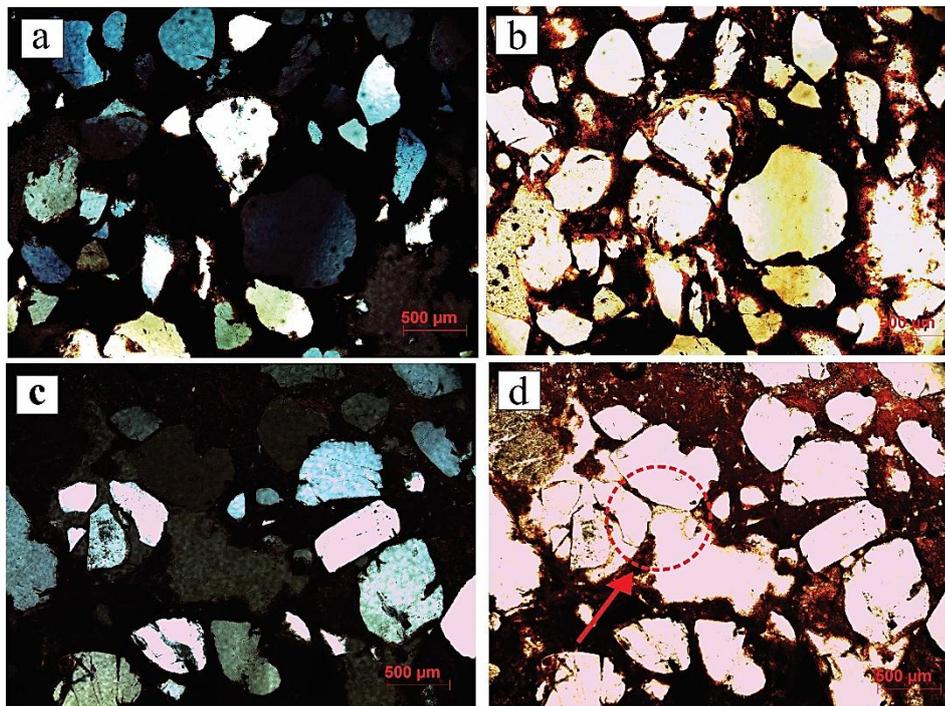
## 6 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

As litologias do Grupo Itapecuru são representadas pelos mesmos minerais, sem grande variação entre seus teores, fundamentalmente: quartzo, caulinita, hematita e mais restrito anatásio (Figura 12), as constituem, independentes de estrutura e granulometria.



**Figura 12** – Difrátogramas de raios X de amostras do Grupo Itapecuru: anatásio (Ant), caulinita (kln), hematita (Hem) e quartzo (Qtz).

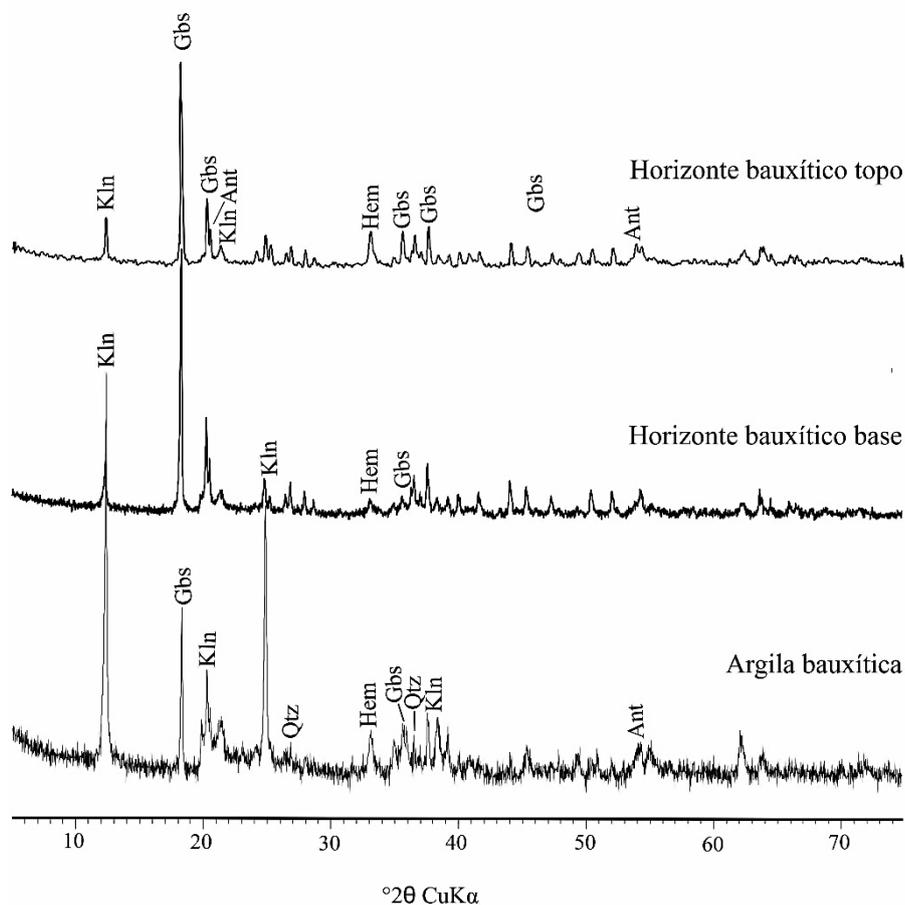
O siltito argiloso é formado de grãos de quartzo incolores, límpidos, pouco fraturados e formas variadas, quando visualizado em microscópio óptico revela um arcabouço constituído principalmente de grãos monocristalinos. Estes, são em sua maioria subangulosos, subarredondados a arredondados, estando geralmente em contato pontual ou paralelo com grãos adjacentes (Figura 13 a e c). Apresentam extinção predominantemente reta e mais restritamente ondulante, óxidos de ferro envolvem as bordas desses grãos, bem como preenche espaços intersticiais do arcabouço (Figura 13 b e d).



**Figura 13** – Fotomicrografia em lâmina polida do siltito argiloso a nicóis cruzados e a luz natural: Em a) e b) Grãos de quartzo desde arredondados e irregulares com bolsões de dissolução em cimento de argila e óxi-hidróxidos de Ferro; c) e d) Distintas morfologias dos grãos, seus contatos e cimento argilo-ferruginoso.

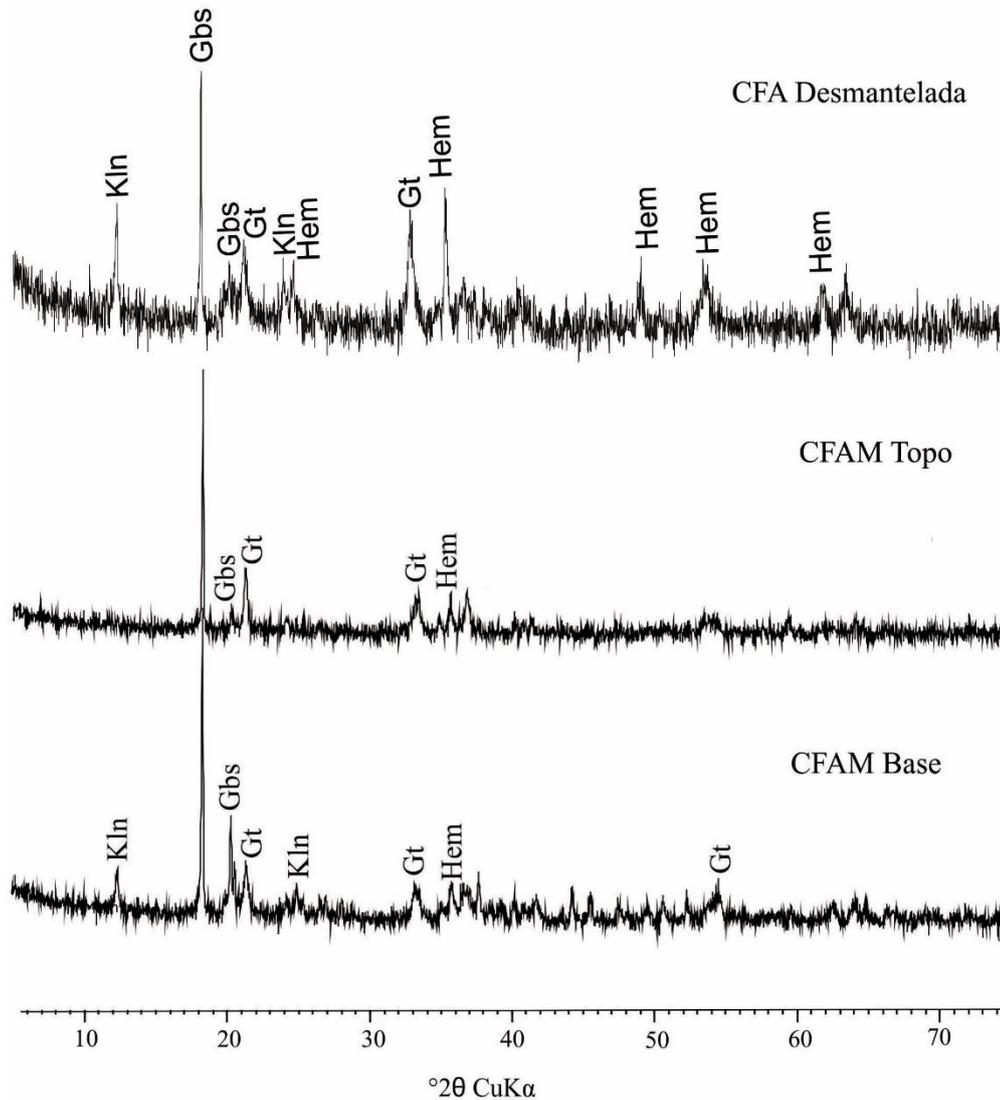
Em contrapartida os perfis laterito-bauxíticos e sua cobertura argilosa, segundo as análises de difração de raios X e microscopia ótica, são constituídos principalmente de caulinita, gibbsita, quartzo, hematita, goethita e anatásio como traço.

O padrão de distribuição desses minerais nos horizontes se assemelha aos padrões de perfis lateríticos bauxíticos na Amazônia (Costa, 1991; Horbe & Costa 1999; Kotshoubey et al., 2005; Costa et al., 2014). Assim, no HABX a caulinita é o principal mineral, enquanto a gibbsita ocorre de forma restrita e anatásio como traço. Já o HBX é obviamente dominado por gibbsita, tendo hematita e caulinita como minerais subordinados e anatásio como acessório. As reflexões dos espectros de DRX (Figura 14) bem delineadas e estreitas correspondem a gibbsita meso a macrocristalinos, enquanto aquelas mais largas a gibbsita criptocristalina.



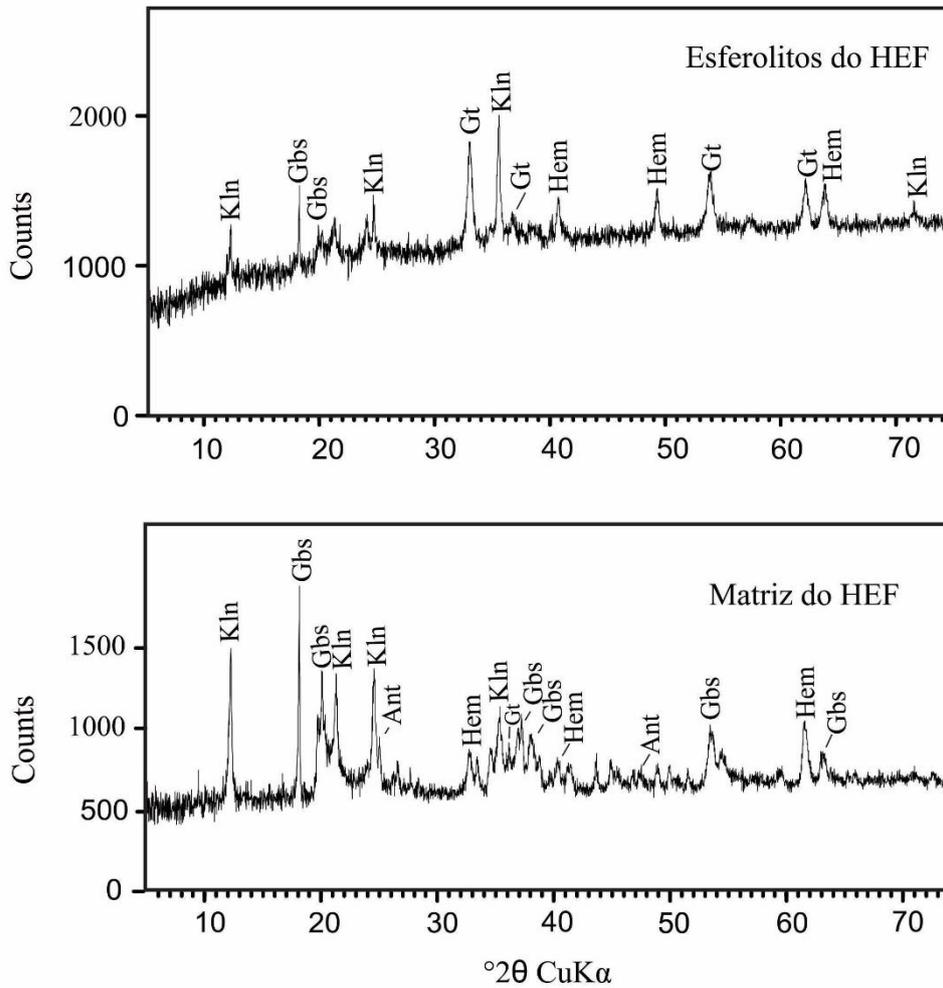
**Figura 14** – Difratograma de raios X de amostras da argila bauxítica e bauxita: Anatásio (Ant), caulinita (kln), gibbsita (Gbs), hematita (Hem) e quartzo (Qtz).

Nas crostas ferro-aluminosas gibbsita, hematita e goethita (Figura 15) são as principais fases minerais, enquanto que, a caulinita está restrita a matriz e cavidades.

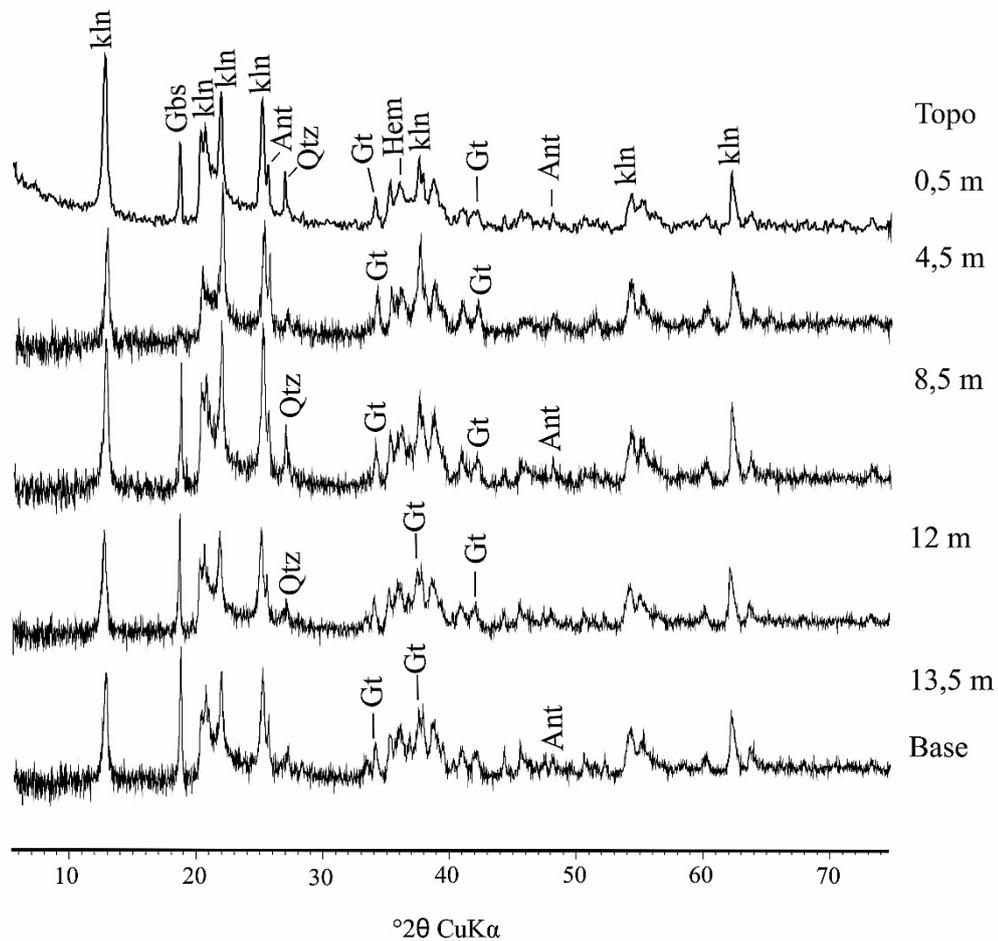


**Figura 15** – Difratoogramas de raios X de amostras da Crosta Ferro-aluminosa Maciça (CFAM) e Crosta Ferro-aluminosa Desmantelada (CFAD): Hemtatita (Hem), goethita (Gt), gibbsita (Gbs) e caulinita (Kln).

O HEF distingue-se mineralogicamente das crostas ferro-aluminosas apenas pelo maior conteúdo de caulinita que juntamente com hematita e goethita constituem a matriz (Figura 16). Na cobertura argilosa a caulinita é o mineral dominante, seguido por goethita, tendo gibbsita e quartzo como acessório e mais raramente hematita e anatásio (Figura 17).



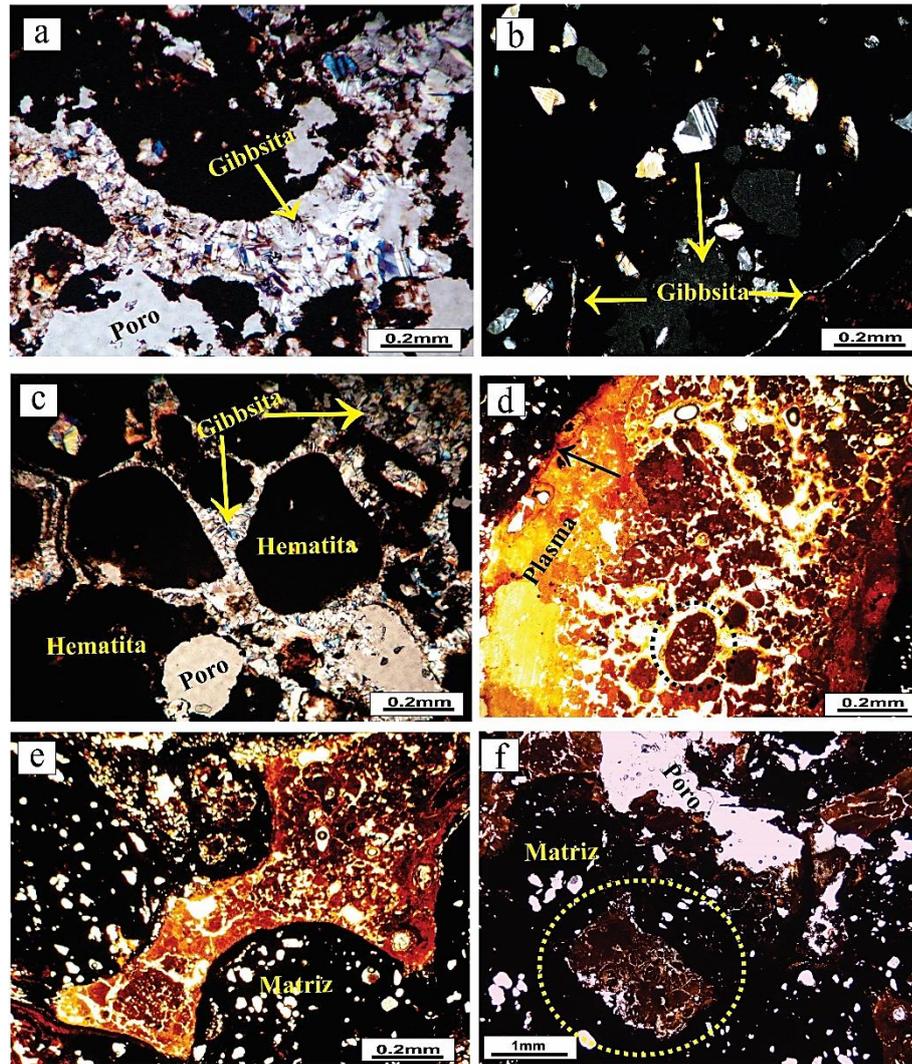
**Figura 16** – Difractogramas de raios X de amostras de esferolitos ferruginosos e sua matriz argilosa: Anatásio (Ant), caulinita (Kln), hematita (Hem), gibbsita (Gbs) e goethita (Gt).



**Figura 17** – Difratoigramas de raios X de amostras da cobertura argilosa: Anatásio (Ant), caulinita (Kln), hematita (Hem), gibbsita (Gbs), goethita (Gt) e quartzo (Qtz).

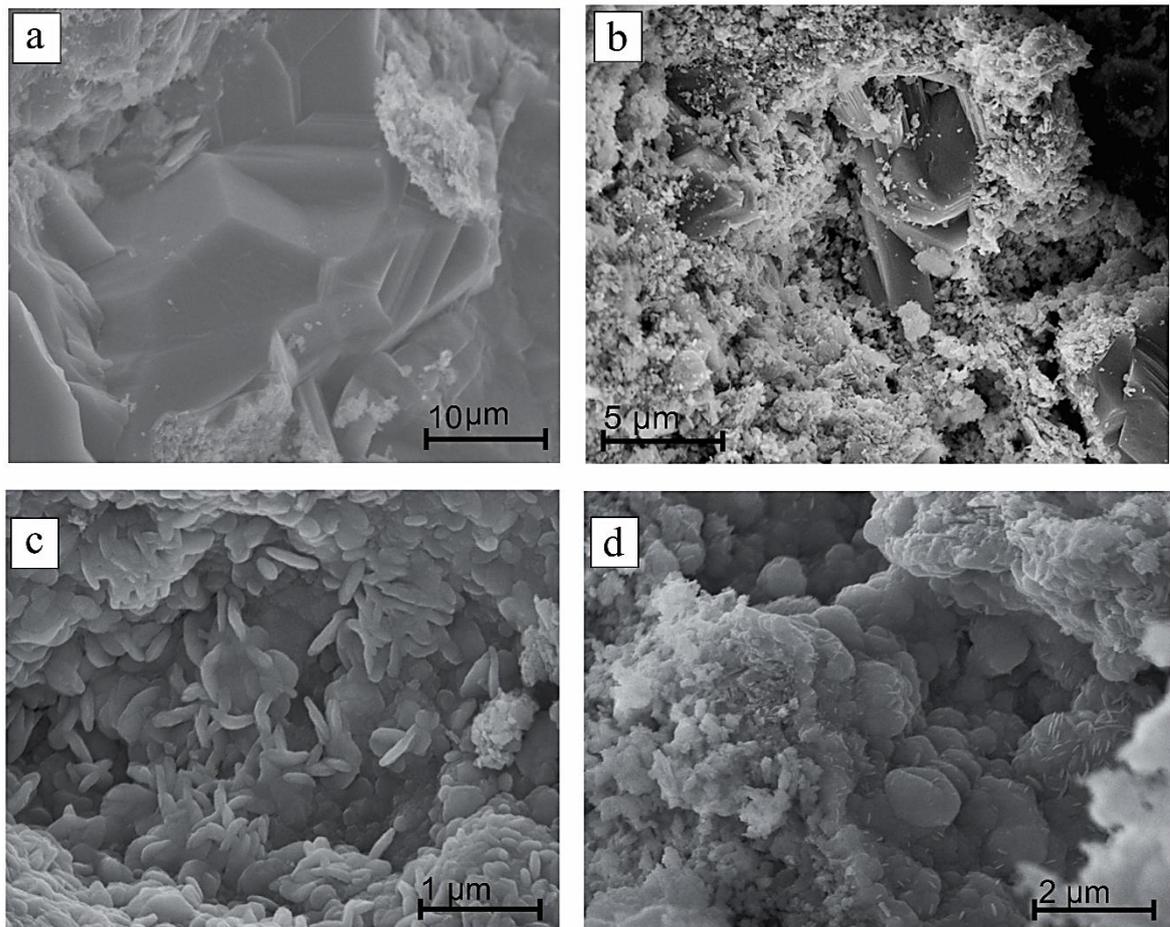
As bauxitas vistas a partir de microscópio óptico em lâminas polidas mostram gibbsita criptocristalina a microcristalina compondo a matriz juntamente com óxidos de ferro e caulinita. Em contrapartida gibbsita meso a macrocristalina, em cristais prismáticos subédricos com maclamento polissintético, ocupam fissuras e cavidades em diversos formatos: arredondados, alongados ou irregular (Figura 18 a, b e c). As crostas ferro-aluminosas ao microscópio exibem um plasma amarelo avermelhado de aspecto nodular que lhes conferem uma textura brechóide (Figura 18d).

Cavidades e fraturas são frequentes e geralmente se encontram preenchidas por gibbsita mesocristalina. Embora pouco frequentes observa-se cutãs goethíticos-hematíticos (Figura 18e) com inúmeros poros de dissolução. Os esferolitos observados em microscópio óptico ocorrem de forma subarredondada e bastantes porosos imersos em cimento de hidróxido de ferro (Figura 18f).



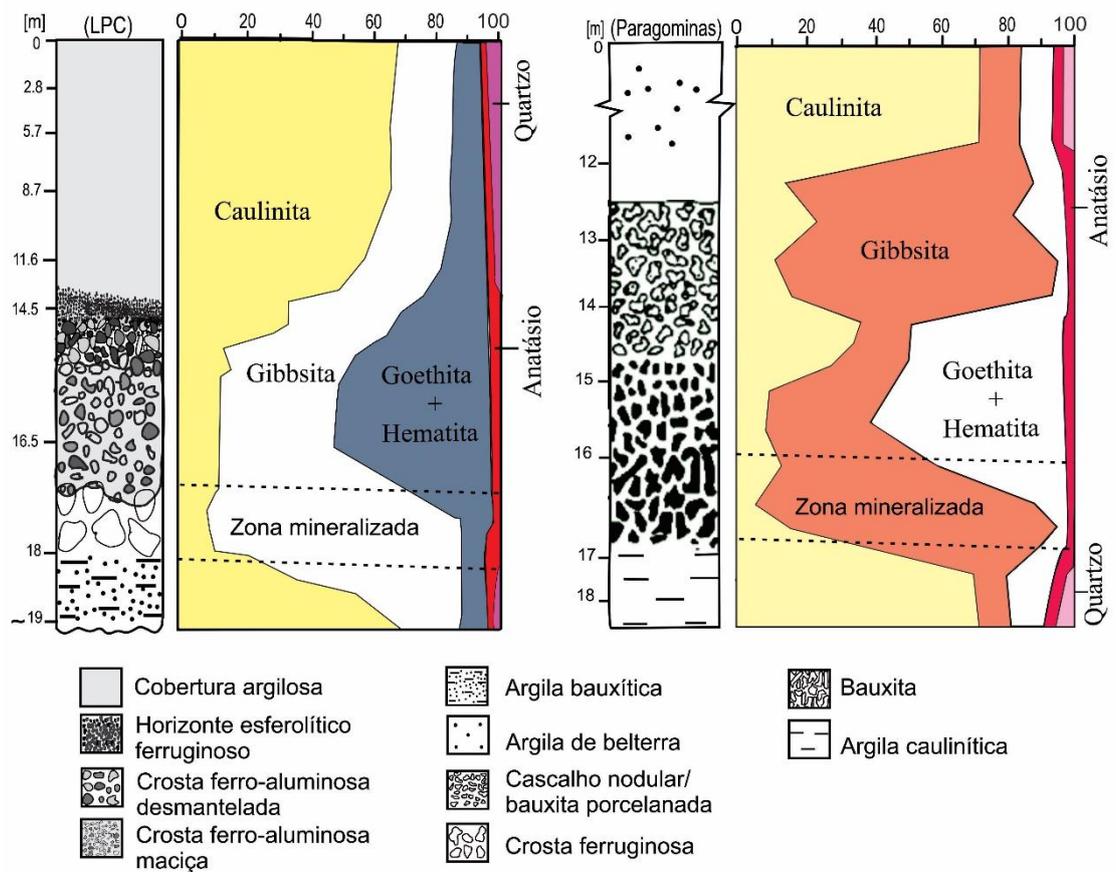
**Figura 18** – Fotomicrografia em lâminas polidas a nicóis cruzados de amostras dos horizontes bauxítico (a, b e c), crosta ferro-aluminosa maciça (d), crosta ferro-aluminosa desmantelada (e) e esferolitos ferruginosos (f): Em a, b e c - Gibbsita preenchendo poros e cavidades e nódulos hematíticos, d - Porção nodular imersa em plasma gibbsítico, e - Cutã goethítico-hematítico em matriz muito porosa, f - Porção esferolítica em matriz ferruginosa.

Em imagens de MEV os cristais de gibbsita microcristalina exibem suas formas prismáticas hexagonais, tabulares típicas, principalmente nas cavidades (Figura 19 a). Restritamente goethitas férricas exibem cristais com grandes variedades de hábitos como botrioidal, vermiformes e placoso com contorno hexagonal (Figura 19 c e d). A gibbsita é mesocristalina e assim como, aquela observada em lâmina polida ocupam fraturas e poros, com formas subédrica e anédrica, porém como um todo predomina a gibbsita criptocristalina.



**Figura 19** – Fotomicrografias obtidas com MEV utilizando elétrons secundários: a) cristais de gibbsita; b) Hematita intercrescida com gibbsita; c) Hematita vermiforme; d) Goethita botrioidal.

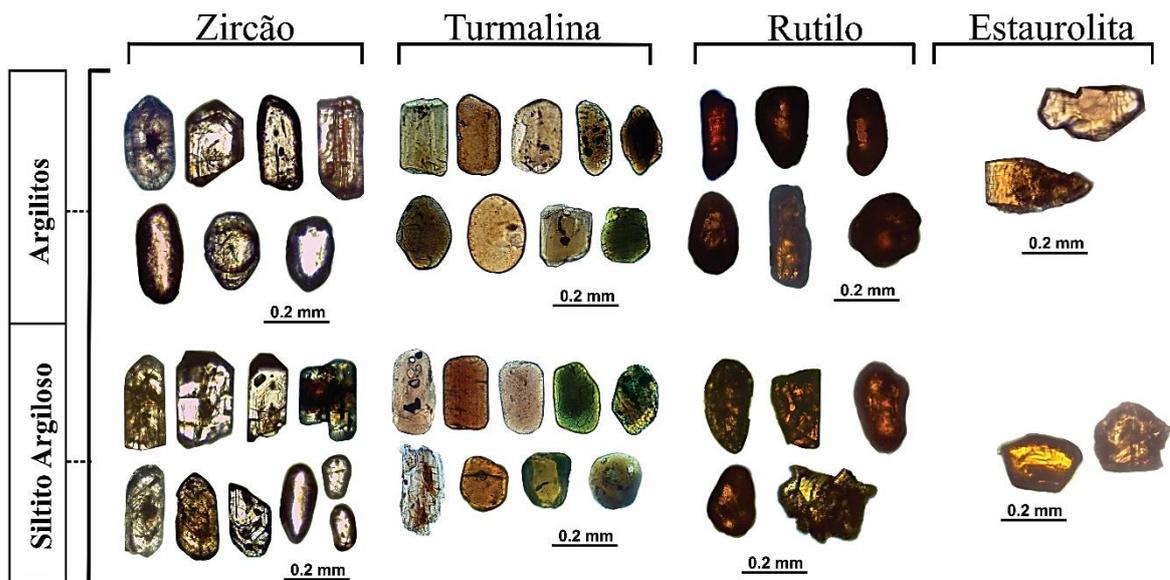
A distribuição quantitativa dos minerais (Figura 20) mostra claramente o maior domínio de gibbsita no HBX, de hematita e goethita na CFAM, CFAD e HEF. Enquanto caulinita é mais abundante no HABX e CAR. O anatásio distribui-se por todo o perfil em pequenas quantidades (< 7 %) e quartzo é mais restrito a argila bauxítica e na cobertura argilosa. Esse padrão de distribuição é similar aquele observado em Paragominas (Kotschoubey et al., 1997 e 2005) e Juruti (Costa et al., 2014).



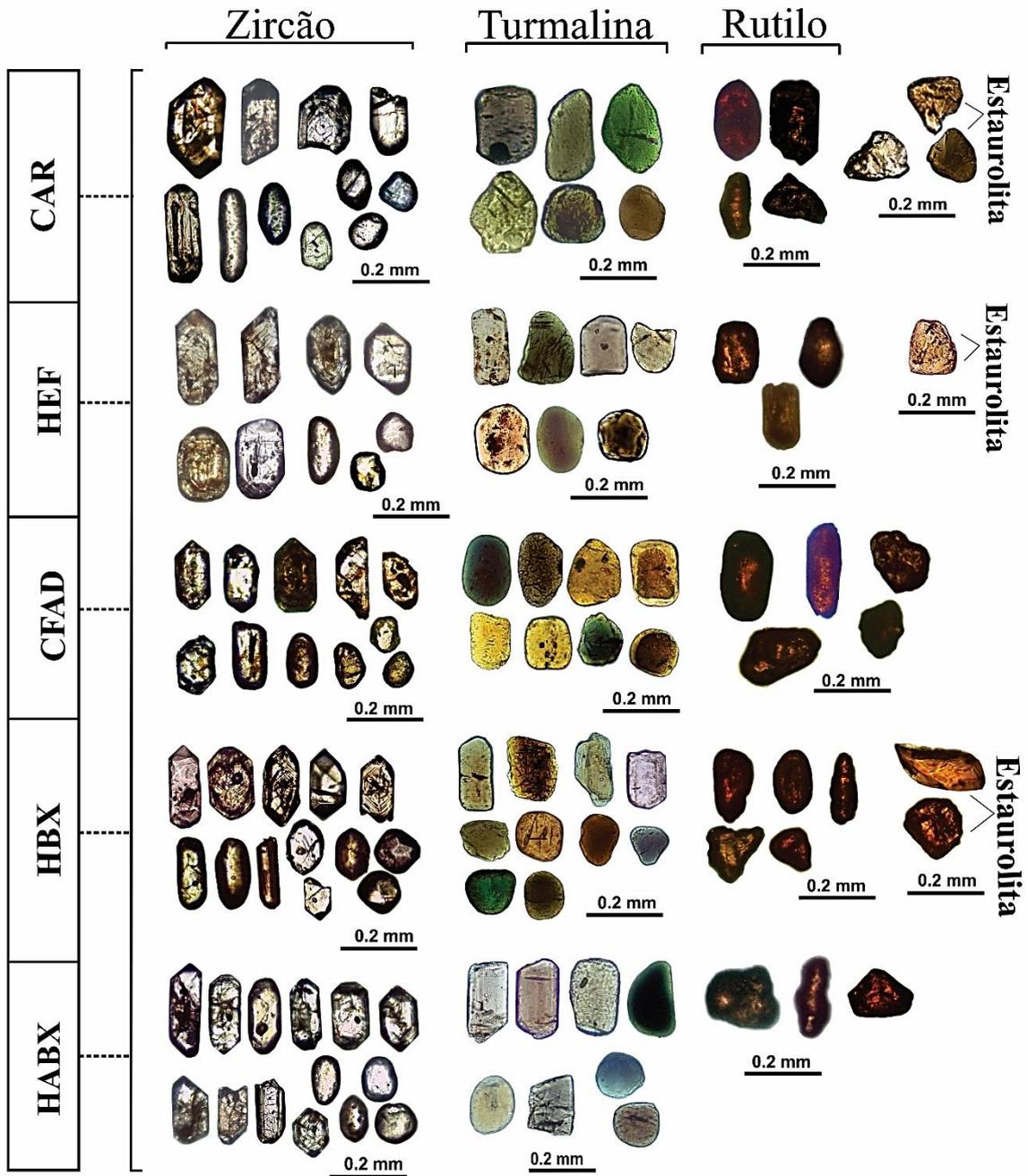
**Figura 20** – Distribuição quantitativa dos minerais na lavra piloto Ciríaco (LPC) comparada ao perfil de Paragominas de Kotschoubey et al. (1997).

## 7 MINERAIS PESADOS

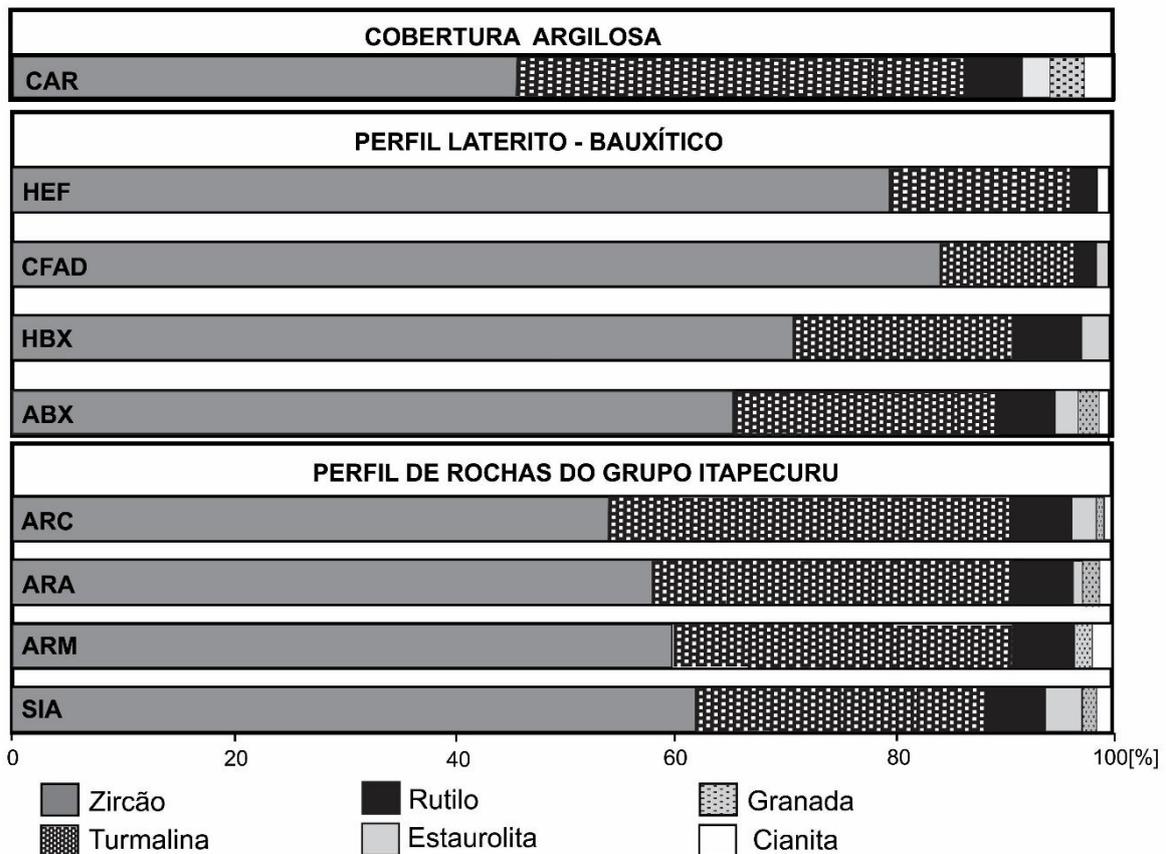
Os minerais pesados identificados e sua abundância nas rochas sedimentares do Grupo Itapecuru, no perfil laterito-bauxítico e cobertura argilosa mostram clara similaridade mineralógica entre si. Os minerais pesados identificados estão representados por minerais ultraestáveis a processos intempéricos como: zircão, turmalina, rutilo e estauroлита (Figuras 21 e 22). Os zircões e as turmalinas são percentualmente majoritários em todas as amostras (Figura 23). Outros minerais, que ocorrem em menor frequência, ou como, traços são cianita e granada, presentes principalmente nas rochas sedimentares. Os opacos ocorrem em grandes quantidades em todas as amostras e são representados principalmente por magnetita, ilmenita e hematita. Os minerais identificados se apresentam sob larga variedade de formas, cores e texturas superficiais.



**Figura 21** – Fotomicrografias de minerais pesados em luz natural dos principais minerais ultraestáveis identificados nas rochas do Grupo Itapecuru na BR 222 km 130.



**Figura 22** – Fotomicrografias de minerais pesados em luz natural dos principais minerais ultraestáveis identificados no perfil laterito-bauxítico e cobertura argilosa da lavra piloto Ciríaco.



**Figura 23** – Distribuição composicional comparativa dos minerais pesados do perfil laterito-bauxítico {Argila Bauxítica (ABX), Horizonte Bauxítico (HBX), Crosta Ferro-aluminosa Desmantelada (CFAD), Horizonte Esferolítico Ferruginoso (HEF)} da Cobertura Argilosa (CAR) e das rochas sedimentares do Grupo Itapecuru; Siltito Argiloso (SIA), Argilito Maciço (ARM), Argilito Arenoso (ARA), Argilito Caulinítico (ARC).

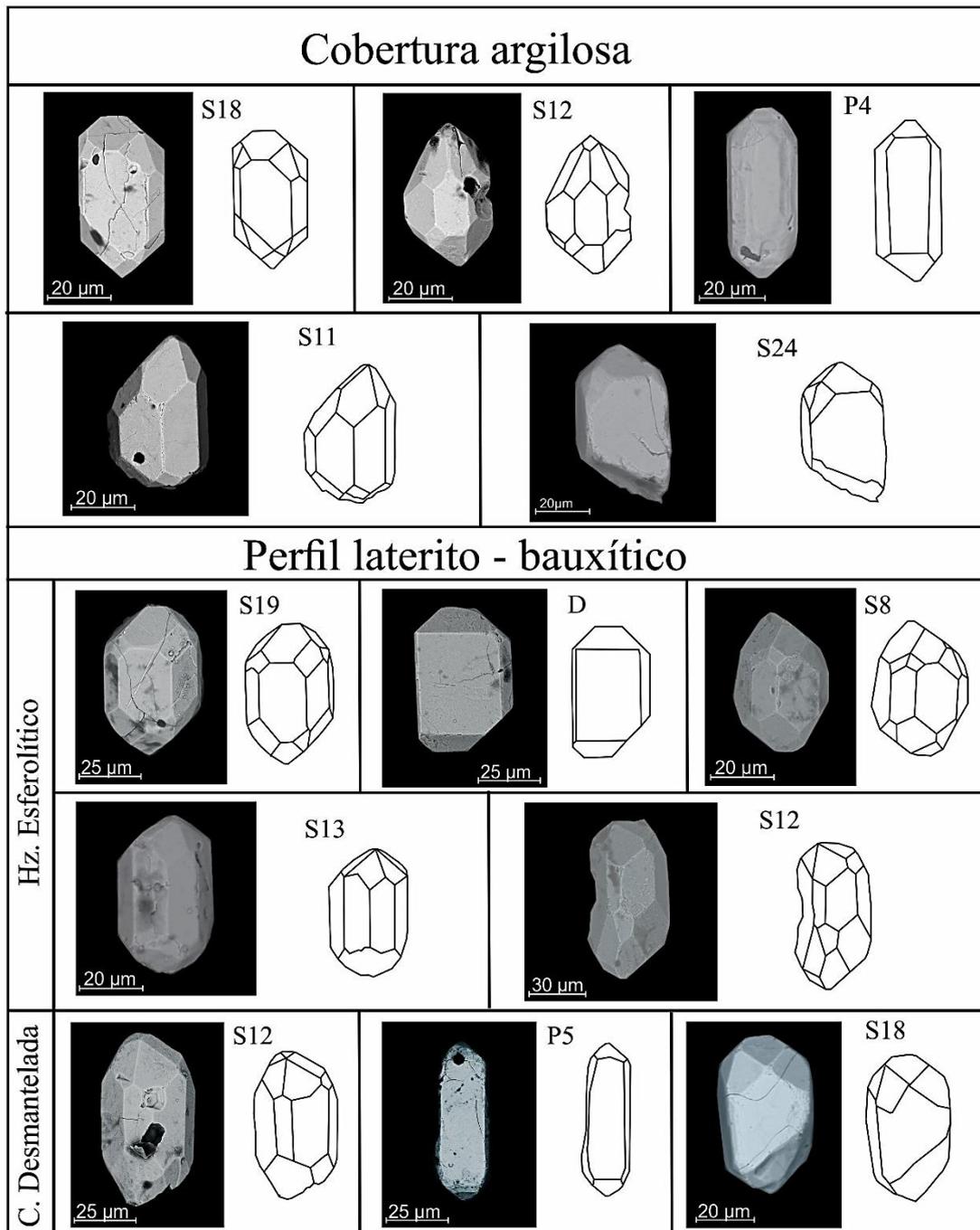
### Zircão

O zircão é o mineral mais abundante tanto nos litotipos do Grupo Itapecuru, como no perfil laterito-bauxítico e cobertura argilosa com uma frequência de 45 % a 80 %, sendo mais abundante no topo do perfil laterítico. Varia de incolor, castanho, rosado ou amarelo, porém é mais comum como incolor.

Exibe cristais prismáticos (curtos ou longos), euédricos a subédricos, com terminações bipiramidais simples ou complexas. Em geral as arestas se encontram ligeiramente arredondadas. Em menor frequência, ocorrem grãos subarredondados a arredondados, alguns são prismáticos com cavidades, marcas de impacto e fraturas. Muitos deles exibem também fraturas conchoidais, zoneamentos e inclusões de opacos.

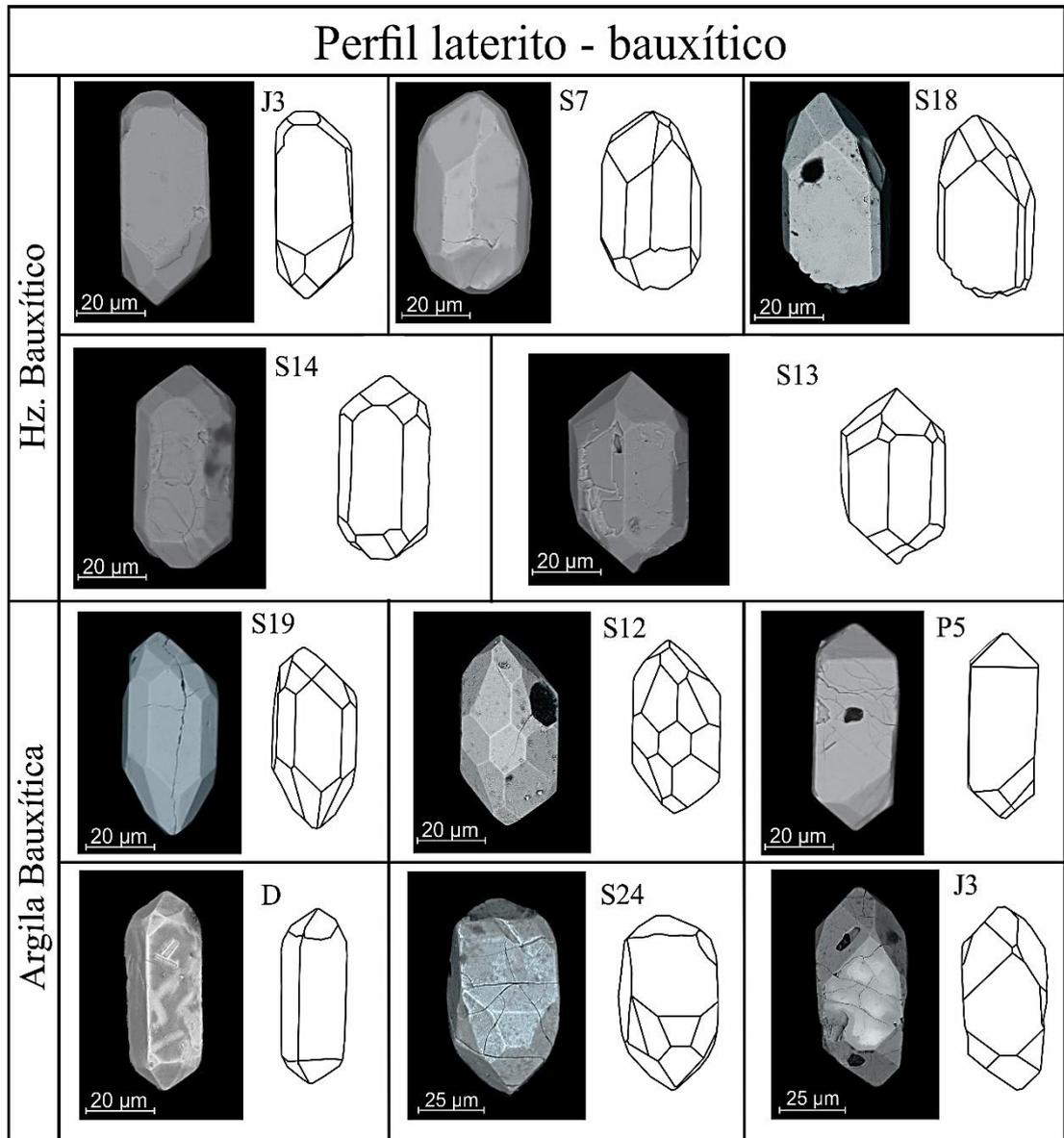
As formas prismáticas euédricas e subédricas são mais frequentes nos horizontes argiloso bauxítico, bauxita e matriz dos esferolitos, enquanto que, as formas subarredondadas a arredondadas são mais recorrentes a matriz da crosta desmantelada, a cobertura argilosa, bem como ao siltito e argilitos do Grupo Itapecuru.

O estudo tipológico de cristais de zircão comparado ao diagrama de Pupin, (1980) tem sido muito utilizado como indicador de proveniência. Segundo Pupin, (1980) as morfologias dos zircões estão de maneira intrínseca relacionadas aos fatores: temperatura de cristalização e composição química do magma e de voláteis, principalmente a água. A temperatura é considerada responsável pelo desenvolvimento das faces dos prismas, enquanto que, o desenvolvimento das formas piramidais está relacionado a composição química do magma. Com isto, ele desenvolveu uma classificação genética a partir do relativo desenvolvimento das faces prismáticas {100} vs. {110} e {211} vs. {101} e, propôs 64 tipos de zircões, genericamente denominados por letras que representam informações das características petrogenéticas do magma fonte. A avaliação morfológica com base em Pupin, (1980) aplicada a grãos que apresentavam ao menos uma face distinguível proporcionou a identificação de 18 tipos. No geral os tipos “S, P, D e J” (Figura 24 e 25) são os mais frequentes em todas as amostras tanto do perfil laterito-bauxítico, cobertura argilosa quanto do Grupo Itapecuru. O tipo “S” é o mais abundante, e é considerado como típico de magmas fontes de granitos cálcico-alcálicos. Enquanto, o segundo mais comum o tipo “P” e também o “D” ocorrem mais em granitos com fonte de magmas alcalinos (Pupin, 1980).

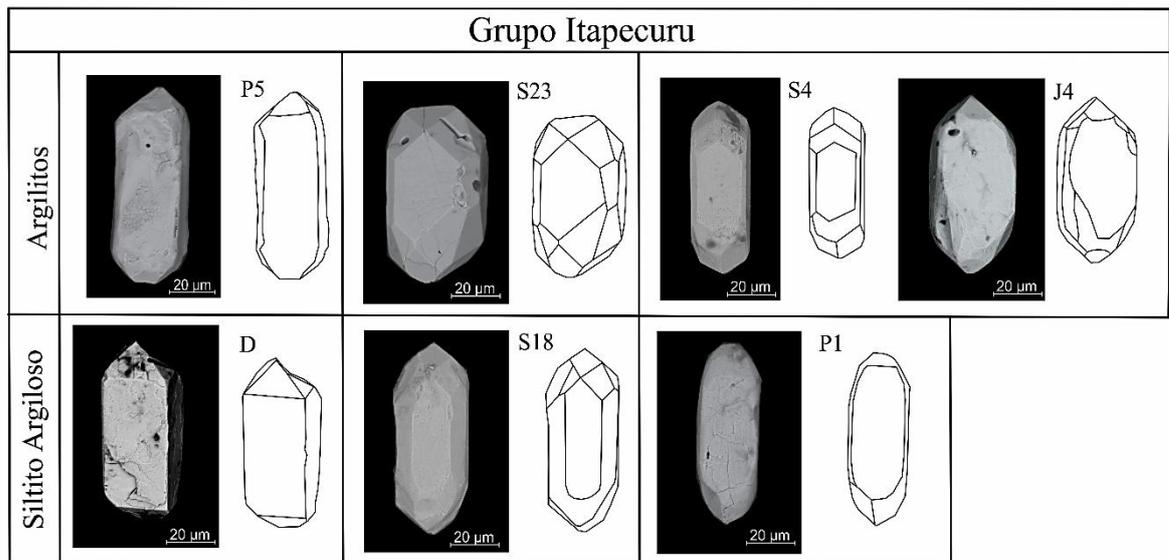


**Figura 24** – Fotomicrografias obtidas em MEV e respectivos desenhos das formas dos principais tipos de zircões presentes na cobertura argilosa e perfil laterito - bauxítico da lavra piloto Ciríaco de acordo com Pupin, (1980).

Continuação

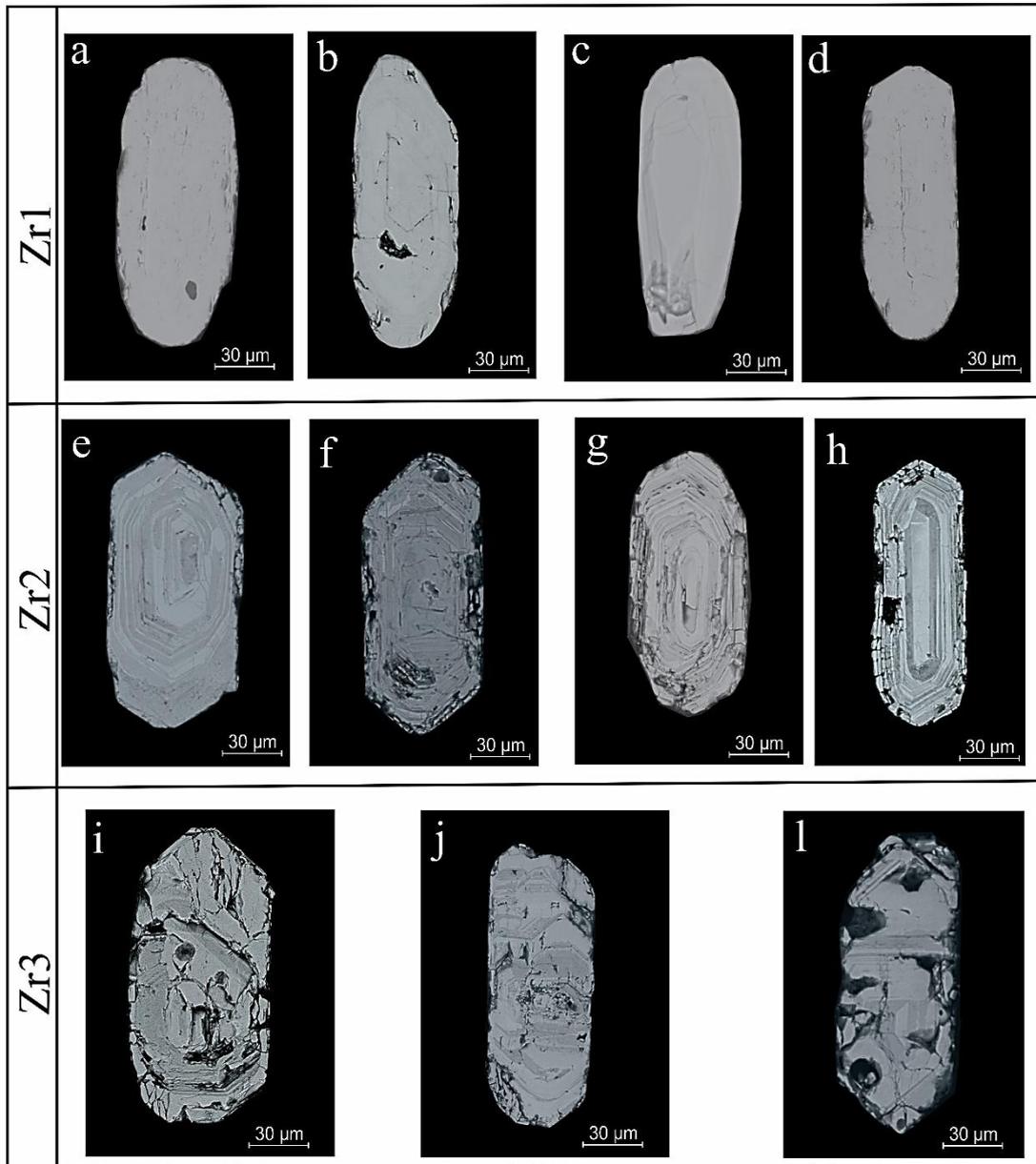


**Figura 24** – Fotomicrografias obtidas em MEV e respectivos desenhos das formas dos principais tipos de zircões presentes na cobertura argilosa e perfil laterito - bauxítico da lava piloto Ciríaco de acordo com Pupin, (1980).



**Figura 25** – Fotomicrografias obtidas em MEV e respectivos desenhos das formas dos principais tipos de zircões presentes no Grupo Itapecuru de acordo com Pupin, (1980).

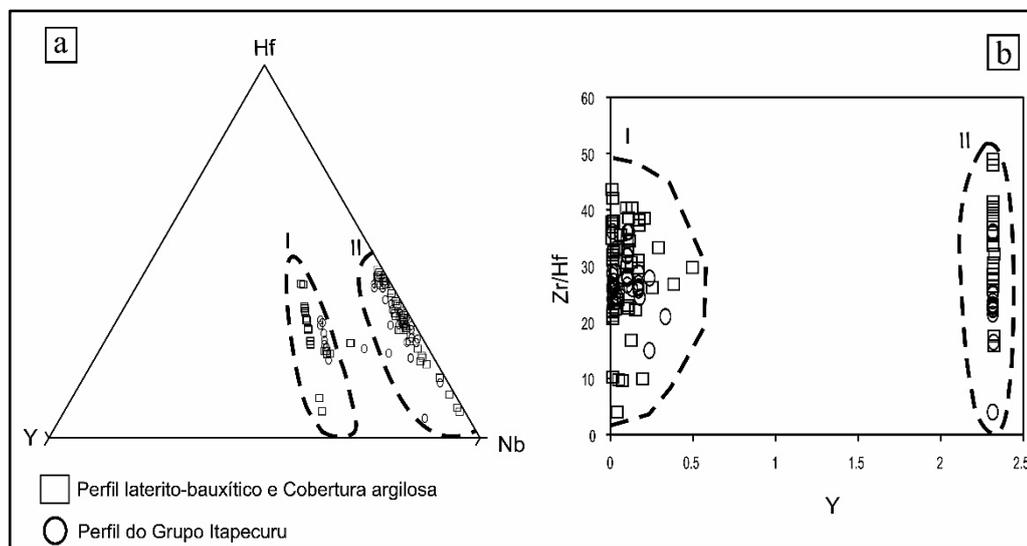
A investigação da morfologia interna dos zircões permitiu separá-los em três tipos: homogêneos (Zr1), com zoneamento concêntrico (Zr2) e com zoneamento irregular (Zr3) (Figura 26). Os zircões Zr1 são os mais frequentes, com até 50 %, ocorrendo em grãos de formas prismáticas euédricas, subarredondados a arredondados, enquanto que os Zr2 compõem até 45 % e são observados mais nas formas prismáticas subarredondadas. Os Zr3 alcançam apenas cerca de 5 %, sendo mais comuns nos prismas euédricos e subédricos, que as vezes apresentam as bordas fraturadas.



**Figura 26** – Fotomicrografias de seções polidas mostrando os tipos de zoneamentos presentes nos zircões das três unidades estudadas (Grupo Itapecuru, perfil laterito-bauxítico e cobertura argilosa): a, b, c e d zircões homogêneos (Zr1); e, f, g e h zircões com zoneamentos concêntricos bem desenvolvidos (Zr2); i, j, l zircões com zoneamentos irregulares (Zr3).

Análises químicas pontuais em cristais de zircões das três unidades revelaram concentrações de Zr, Hf, Y e Nb distintas, que plotados nos diagramas Hf-Y-Nb e Zr/Hf vs Y, indicam dois grupos composicionais (Figura 27).

Os zircões apresentam razões  $Zr/Hf$  de 10 a 60, esta diferença sugere que os grãos procedem de fontes distintas como já sugerido pela morfologia externa e interna. Com base em todas as características observadas nos zircões individualmente ou em grupos pode-se admitir que de fato sejam de fontes distintas. Assim as formas euédricas a subédricas seriam oriundas de rochas ígneas ou metamórficas e os subarredondados a arredondados, a grãos retrabalhados, transportados de áreas distantes do atual sítio de deposição ou de estabelecimento do perfil laterítico. Vale ressaltar que não foram encontrados contrastes entre os zircões das rochas sedimentares do Grupo Itapecuru, do perfil laterito-bauxítico e da cobertura argilosa.

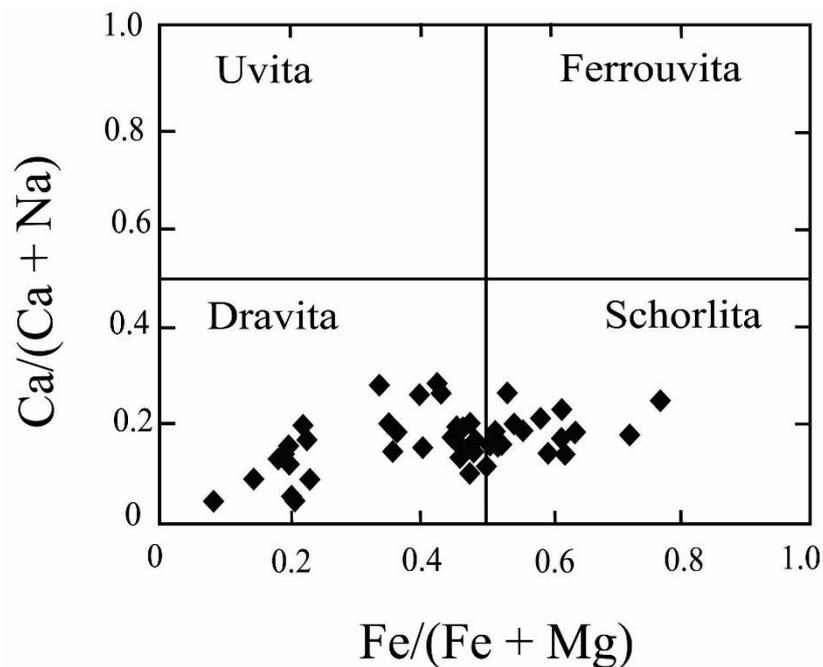


**Figura 27** – Composição semi-quantitativa (análise de MEV/EDS) de zircões das três unidades em: (a) diagrama Hf-Y-Nb (% peso) e (b) diagrama  $Zr/Hf$  vs Y (% peso).

### Turmalina

A turmalina, assim como o zircão, é abundante tanto no perfil laterito-bauxítico e cobertura argilosa como nas rochas intemperizadas do Grupo Itapecuru. Entre os minerais pesados ela corresponde a aproximadamente 25 % no siltito arenoso e 35 % nos argilitos, enquanto no perfil laterito-bauxítico e cobertura oscilam entre 15 e 35 % sendo mais rara na crosta ferro-aluminosa desmantelada.

A turmalina se apresenta principalmente sob forma prismática, euédrica a subédrica (prismas longos ou curtos), sendo menos frequentes, as formas arredondadas ou irregulares. Essas últimas são mais comuns na crosta desmantelada. A coloração varia de verde, que é a mais frequente, a amarelo amarronzado a marrom escuro que são as menos frequentes. As feições mais recorrentes são: presença de inclusões em forma de bolhas, microfraturas, estrias, arestas desgastadas, dissolução (corrosão) e sobrecrescimento. A turmalina constitui um grupo de minerais de composição complexa, que podem mais facilmente serem distinguidas em termos de abundância de Fe, Ca, Na e Mg, que são os elementos que compõem os tipos mais comuns de turmalinas como: shorlita, dravita, uvita e elbaita. As análises de EDS, em grãos de turmalinas das três unidades estudadas, quando plotadas no diagrama  $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Na})$  vs  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  (Figura 28) se concentram no campo da dravita e shorlita, estas são comuns tanto em fontes metamórficas como graníticas (Henry & Guidotti, 1985).



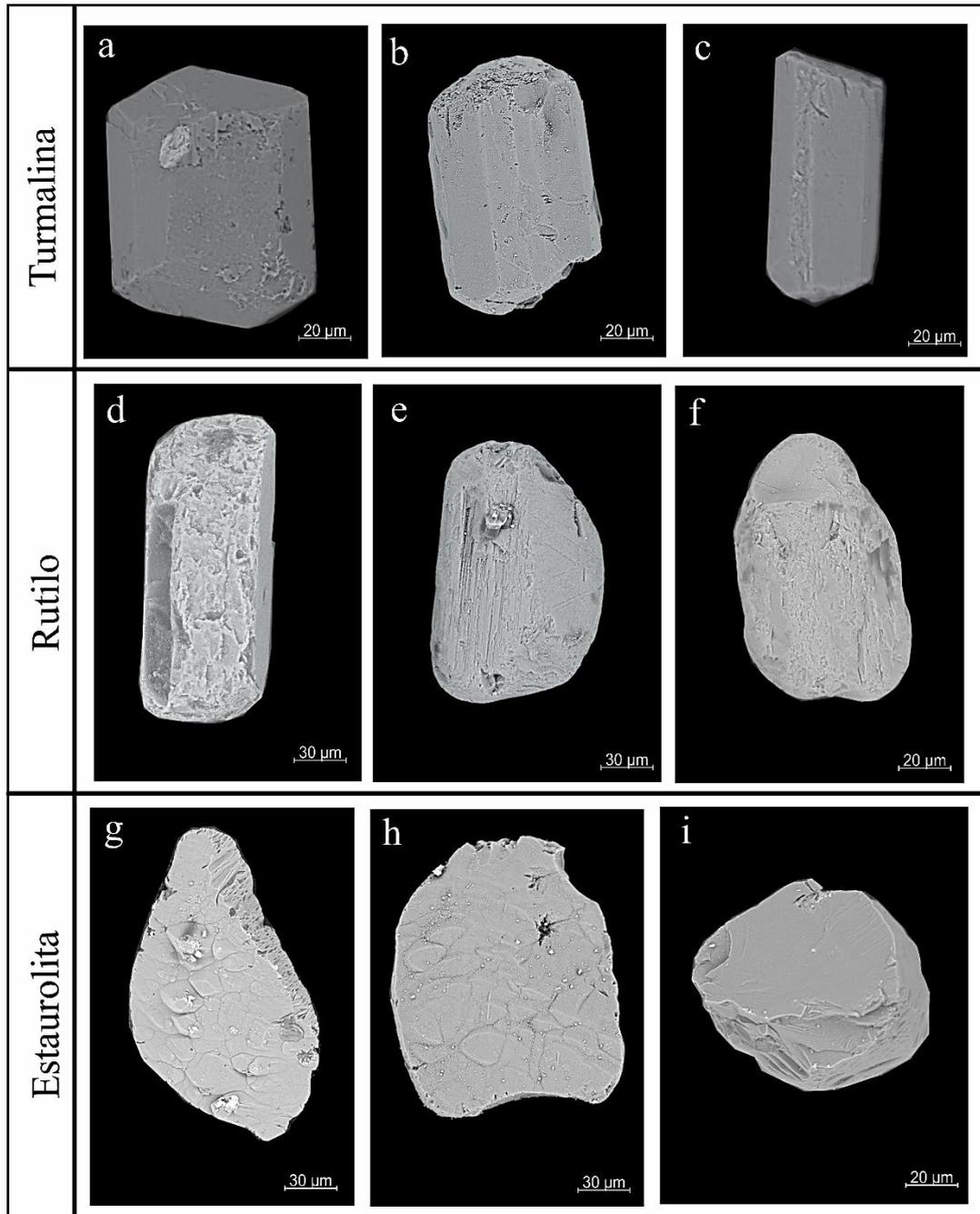
**Figura 28** – Diagrama binário  $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Na})$  vs  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  com a classificação das turmalinas das três unidades estudadas (rochas do Grupo Itapecuru, perfil laterito-bauxítico e cobertura).

### **Rutilo**

Apresenta-se como grãos avermelhados a amarronzados, em formas prismáticas subédricas, subarredondados, arredondados e mais raramente irregulares. Grãos preservando a geminação em cotovelo são comuns, além de formas aciculares. Evidências de desgastes nas superfícies como sulcos e ranhuras em suas bordas (Figura 29) são também comuns. Em termos percentuais seus teores estão na ordem de 5 % no siltito argiloso e 8 % no argilito arenoso. No perfil laterito-bauxítico e cobertura argilosa, ocorre uma variação significativa com teores maiores na argila bauxítica (5 %), horizonte bauxítico (7 %) e cobertura argilosa (4 %) e tão somente (2 %) na crosta desmantelada e (1 %) na matriz dos esferolitos. O rutilo ocorre como mineral acessório frequentemente em rochas metamórficas principalmente em xistos, gnaisses e anfibolitos, mas também ocorre em rochas ígneas, porém mais restrito.

### **Estaurolita**

A estaurolita se apresenta principalmente como grãos irregulares, angulosos a subarredondados com fratura conchoidal e raramente prismática. A cor varia de amarelo pálido a amarelo avermelhado. Em detalhes (Figura 29) observa-se feições mamilares e cavidades orientadas em direção ao plano de clivagem. A sua frequência no siltito é aproximadamente de 2 %, e 4 % no argilito e no perfil laterito-bauxítico e cobertura argilosa fica entre 2 e 5 %, sendo mais abundante no horizonte bauxítico. A estaurolita é um mineral típico de rochas metamórficas e ocorre comumente em micaxistos.



**Figura 29** – Fotomicrografias mostrando as formas e texturas superficiais da turmalina, rutilo e estauroлита das três unidades estudadas (rochas sedimentares, perfil laterito-bauxítico e cobertura): Na turmalina em (a), (b) e (c) formas prismáticas, e as texturas superficiais de abrasão e dissolução; No rutilo (d) e (e) marcas de ranhuras e na estauroлита (g) e (h) feição mamilar.

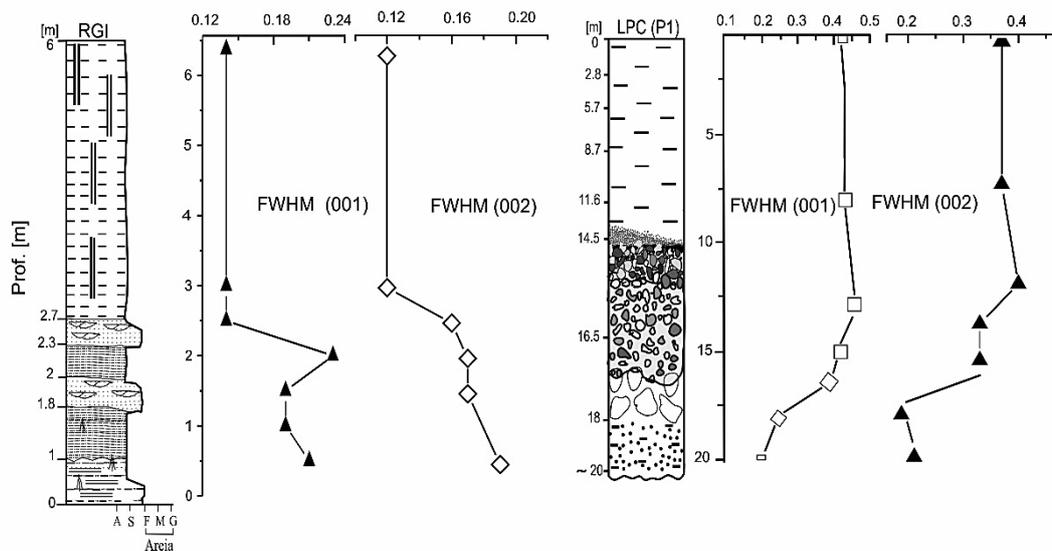
## 8 CRISTALINIDADE DA CAULINITA

A caulinita é um dos minerais mais abundantes tanto nas rochas do Grupo Itapecuru como no perfil laterito-bauxítico e respectiva cobertura argilosa. Embora muito abundante, as suas características e concentrações divergem nas três unidades. No perfil do Grupo Itapecuru a caulinita é o principal mineral em todas as litologias, ocorrendo tanto na matriz, como em pequenos fragmentos dispersos nesta. Por outro lado, no perfil laterito-bauxítico, ela é o mineral dominante da argila bauxítica constituindo sua massa principal ao lado da gibbsita. No horizonte bauxítico ela é restrita e se encontra involucrando as massas gibbsíticas e ainda no interior destas. Na crosta ferro-aluminosa, ela é restrita a massa internodular, mas também se encontra intercrecida minoritariamente nos nódulos, aumenta de teor na crosta ferro-aluminosa desmantelada e no horizonte esferolítico ferruginoso, ocupando a matriz dos mesmos. Em contrapartida na cobertura argilosa é o principal mineral, porém como material muito fino, em coloração alaranjada na base e amarelo pálido para o topo, provocada pela presença de hematita e goethita também muito finas e de distribuição homogênea. Os dados de difração de raios X usados para estimar a cristalinidade de acordo com Amigó et al. (1994) sugerem possíveis gerações distintas de caulinita nas três unidades (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores de FWHM das reflexões 001 e 002 da caulinita obtidos da análise de DRX com base em Amigó et al. (1994) em amostras das três unidades: CAR: Cobertura Argilosa; HEF: Hz. Esferolítico Ferruginoso; CFAD: Crosta Ferro-aluminosa Desmantelada; HBX: Hz. Bauxítico; HABX: Argila Bauxítica; ARC: Argilito Caulínítico; ARA: Argilito Arenoso; ARM: Argilito Maciço; SIA: Siltito Argiloso. \*Kln (%) teores estimados por cálculo estequiométrico.

| Amostra | Kln 2 $\theta$ (001) | Kln D(A°)(001) | FWHM (001) | Kln 2 $\theta$ (002) | Kln D(A°)(002) | FWHM (002) | *Kln % |
|---------|----------------------|----------------|------------|----------------------|----------------|------------|--------|
| CAR     | 12,36                | 7,15           | 0,42       | 24,89                | 3,57           | 0,40       | 65,00  |
| CAR     | 12,35                | 7,15           | 0,43       | 24,86                | 3,57           | 0,37       | 65,00  |
| CAR     | 12,31                | 7,18           | 0,46       | 24,82                | 3,58           | 0,37       | 65,00  |
| HEF     | 12,36                | 7,15           | 0,41       | 24,86                | 3,57           | 0,33       | 31,30  |
| CFAD    | 12,31                | 7,18           | 0,39       | 24,85                | 3,57           | 0,33       | 16,64  |
| HBX     | 12,39                | 7,13           | 0,24       | 24,90                | 3,57           | 0,18       | 17,04  |
| HABX    | 12,36                | 7,15           | 0,20       | 24,89                | 3,57           | 0,20       | 68,00  |
| ARC     | 12,36                | 7,15           | 0,14       | 24,87                | 3,57           | 0,13       | 68,50  |
| ARA     | 12,34                | 7,16           | 0,20       | 24,85                | 3,58           | 0,15       | 57,70  |
| ARM     | 12,34                | 7,16           | 0,19       | 24,84                | 3,57           | 0,16       | 55,10  |
| SIA     | 12,39                | 7,13           | 0,20       | 24,89                | 3,57           | 0,19       | 68,20  |

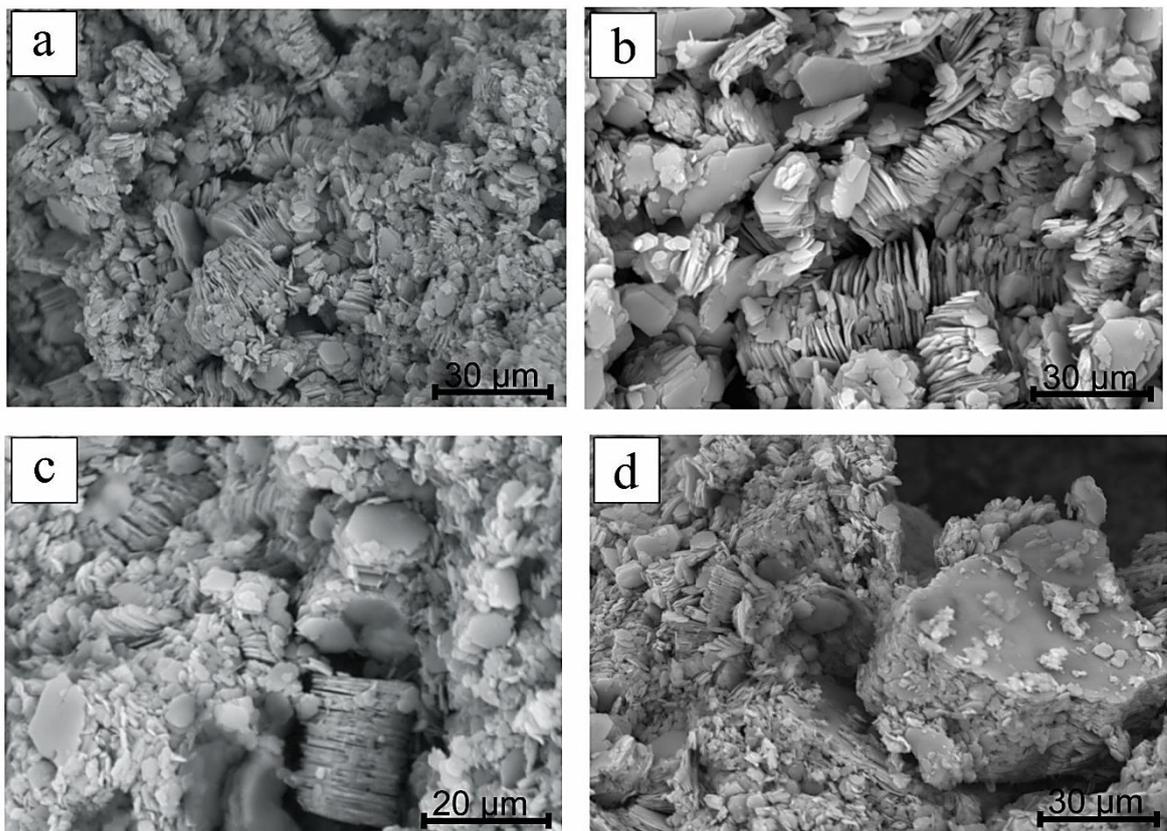
Os valores dos índices de Amigó et al. (1994), nas rochas do Grupo Itapecuru diminuem da base para o topo (0,20 a 0,14), enquanto no perfil laterito-bauxítico eles aumentam em direção ao topo (0,20 a 0,41), e deste para a cobertura argilosa, porém nela se mantem praticamente constantes (0,42 a 0,43) (Figura 30). O aumento dos valores de FWHM ( $> 0,3$ ) corresponde a cristais com baixa cristalinidade.



**Figura 30** – Distribuição dos valores de FWHM das reflexões 001 e 002 da caulinita com base em Amigó et al. (1994). Nas rochas do Grupo Itapecuru (RGI) ocorre variação dos índices de cristalinidade com diminuição dos valores em direção ao topo do perfil. No perfil laterito-bauxítico os índices de cristalinidade também variam, com o aumento dos valores para o topo do perfil e deste para a cobertura.

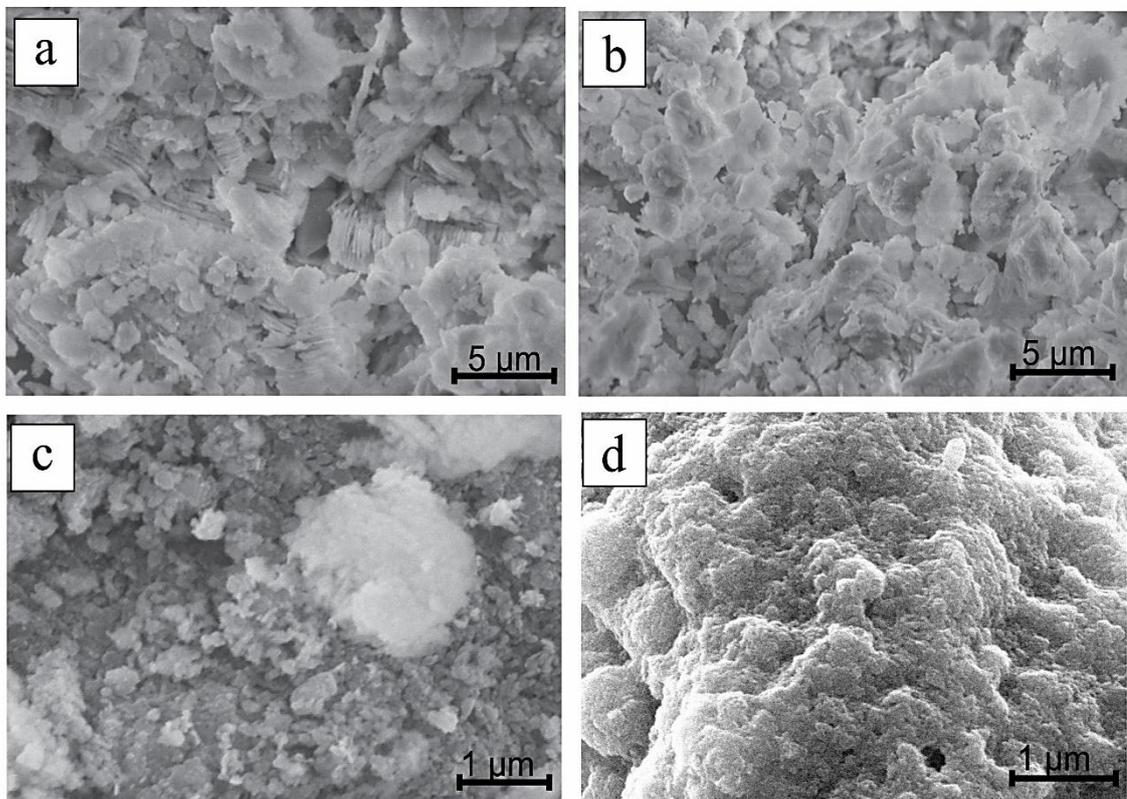
As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das caulinitas também permitiram avaliar subjetivamente as diferenças de cristalinidade e de tamanho das partículas. Estas se revelaram nas três unidades estudadas bimodais a trimodais, o que sugere formação e crescimento dos cristais em diferentes condições microambientais ou a partir da dissolução parcial de partículas maiores (Giral-Kacmarčík et al., 1998; Balan et al., 2007).

Os cristais das caulinitas das rochas do Grupo Itapecuru exibem duas morfologias distintas, porém euédricas em todos os litologias com cristais em booklets ou plaquetas isoladas micrométricas (Figura 31). Os tamanhos das partículas variam com dimensão entre 10 – 20  $\mu\text{m}$  de diâmetro no plano basal, e exibem um bom desenvolvimento das placas, sendo hexagonal para pseudo-hexagonal (Figuras a e b) com bordas regulares ou mais restritamente irregulares (Figuras 31 c e d).



**Figura 31** – Fotomicrografias (MEV) de caulinitas das rochas do Grupo Itapecuru: a) e b) caulinitas do siltito argiloso em placas euédricas pseudo-hexagonais empilhadas; c) caulinitas do argilito maciço em placas euédricas formando booklets; d) caulinitas do argilito caulínítico formando booklets de vários tamanhos com bordas irregulares.

Em contrapartida ao longo do perfil laterito-bauxítico os cristais de caulinita variam bastante, com morfologias euédricas a anédricas (Figura 32). Na argila bauxítica base do perfil laterito-bauxítico ainda é possível se reconhecer booklets de caulinita micrométricas (Figura 32 a e b), porém entre estes, e recobrimdo ocorrem caulinita submicrométrica, que se torna única nos horizontes superiores. Na porção intermediária do perfil laterito-bauxítico para o topo deste, onde as caulinitas se encontram principalmente nas matrizes da CFAD e HEF constituem cristais submicrométrico ( $< 1 \mu\text{m}$ ). Geralmente estes, são anédricos com bordas arredondadas ou irregulares, ou mesmo, formam uma massa porosa (Figura 32 c). Na cobertura argilosa os cristais são nanométricos com textura microporosa e aspecto microagregado (Figura 32 d).



**Figura 32** – Fotomicrografias (MEV) de caulinitas do perfil laterito-bauxítico: a) caulinita da argila bauxítica com cristais euédricos com estrutura em acordeom; b) cristalitos de caulinita submicrométricas na argila bauxítica; c) caulinita da matriz dos esferolitos ferruginosos com cristalitos de bordas irregulares; d) caulinitas da cobertura argilosa com textura porosa.

As imagens de MEV quando comparadas aos valores do índice de Amigó et al. (1994), demonstram que, a diminuição nos valores dos índices em direção ao topo do perfil do Grupo Itapecuru corresponde a cristais com elevada ordem cristalina. Enquanto para o perfil laterito-bauxítico e cobertura o aumento dos valores dos índices da base para o topo são acompanhados de diminuição de cristalinidade, a qual, eleva-se junto com o decréscimo no tamanho das partículas de caulinita. Está diminuição de tamanho dos cristais das caulinitas da base para o topo do perfil laterito-bauxítico sugere que, talvez tenham sido gradualmente substituídas por uma geração mais recente, e de mais baixa ordem cristalina (Tardy, 1993; Tardy & Roquim, 1998). Outra possibilidade para explicar a diminuição de cristalinidade das caulinitas ao longo do perfil laterito-bauxítico pode ser a maior quantidade de ferro presentes nos horizontes ferruginosos, ou mesmo, pela substituição do Al por Fe nos sítios octaédricos da caulinita (Gaite et al., 1997; Fritsch et al., 2002 e 2005; Balan et al., 1999 e 2007). Contudo esta possibilidade não pode ser avaliada neste trabalho, uma vez que, os cristalitos de caulinita do topo do perfil laterítico e da cobertura são muitos pequenos para que se possa obter microanálises seguras. Por outro lado, Balan et al. (2007) demonstraram que, o Fe distribuído homogeneamente na superfície da caulinita não afeta sua cristalinidade, mas que, os defeitos de empilhamentos dos cristais podem ser a provável causa disto. Esta variação de cristalinidade das caulinitas no perfil laterito-bauxítico de Rondon é comparável aquele observado em perfis lateríticos da África e região Amazônica (Balan et al., 1999; Fritsch et al., 2005; Monteiro et al., 2007; Balan et al., 2007). As características das caulinitas ao longo do perfil laterito-bauxítico e sua cobertura, de fato sugerem gerações distintas deste mineral, pelo menos variação em seu grau de cristalinidade, com diminuição desta aumentando para o topo, e principalmente na cobertura argilosa. Sendo portanto muito distinta das rochas sedimentares do Grupo Itapecuru, prováveis rochas-mães do perfil.

## 9 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As rochas intemperizadas do Grupo Itapecuru, o perfil laterito-bauxítico e sua cobertura argilosa são constituídos fundamentalmente dos mesmos componentes químicos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ , além de perda ao fogo (PF) (Tabela 2).  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  seguidos em menor proporção de  $\text{TiO}_2$  são os constituintes mais abundantes das rochas do Grupo Itapecuru, que somados a PF correspondem em média 99,7 % da composição química, porém, seu volume pouco varia ao longo do perfil indicando uma certa homogeneidade dos sedimentos. O  $\text{SiO}_2$  se destaca no argilito maciço onde quartzo é mais frequente e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  apresenta teor mais baixo, mas as razões  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  são praticamente constantes (2 até 2,8) e coincidem com a abundância de caulinita e quartzo em todas as litologias. Os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  variam entre 6,4 a 9,6 % e são condizentes com hematita, enquanto os teores de  $\text{TiO}_2$  se mostram regulares em média 1 %, compatíveis com o modesto teor de anatásio.

No perfil laterito-bauxítico e sua cobertura  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  correspondem sozinhos em média a 77,7 % de sua composição. Em conjunto com PF chega a 97 %, ou seja, retratam perfil laterítico e produto dele derivado (cobertura argilosa) com elevada lixiviação dos componentes químicos moveis e forte concentração dos imóveis, ou moveis-imóveis como (Al, Fe, Ti) (Hanilçi, 2013; Yu et al., 2014; Costa et al., 2014). Como é normal em uma evolução laterítica as concentrações destes elementos químicos são muito variáveis e dependente do horizonte, refletindo a constituição mineralógica variável em termos de teores, mas restritas a caulinita, gibbsita, quartzo, hematita, goethita e anatásio (Costa et al., 2014). Isto fica claro na distribuição dos teores dos elementos ao longo do perfil laterítico como um todo (Figura 33), em que  $\text{SiO}_2$  diminui de 31 para 3 %, porém, aumenta e permanece constante na cobertura 28 a 32 %. Enquanto nesse sentido  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aumenta com ápice no horizonte bauxítico 49,98 %, um fato típico, e assume valor ainda elevado e constante em toda seção da cobertura 35 a 38 %. Similarmente aumentam também os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , sendo que o seu maior valor se dá na crosta ferro-aluminosa até 49,98 % e nos esferolitos ferruginosos, fato também presumível devido a mineralogia, enquanto na cobertura decrescem bruscamente (11-12 %), permanecendo praticamente constantes. Este comportamento do Si, Al, e Fe é similar aqueles observados em perfis laterítico-bauxítico estudados no Brasil e no mundo afora (Maclean et al., 1997; Mameli et al., 2007; Hanilçi, 2013; Oliveira et al., 2013; Yu et al., 2014).

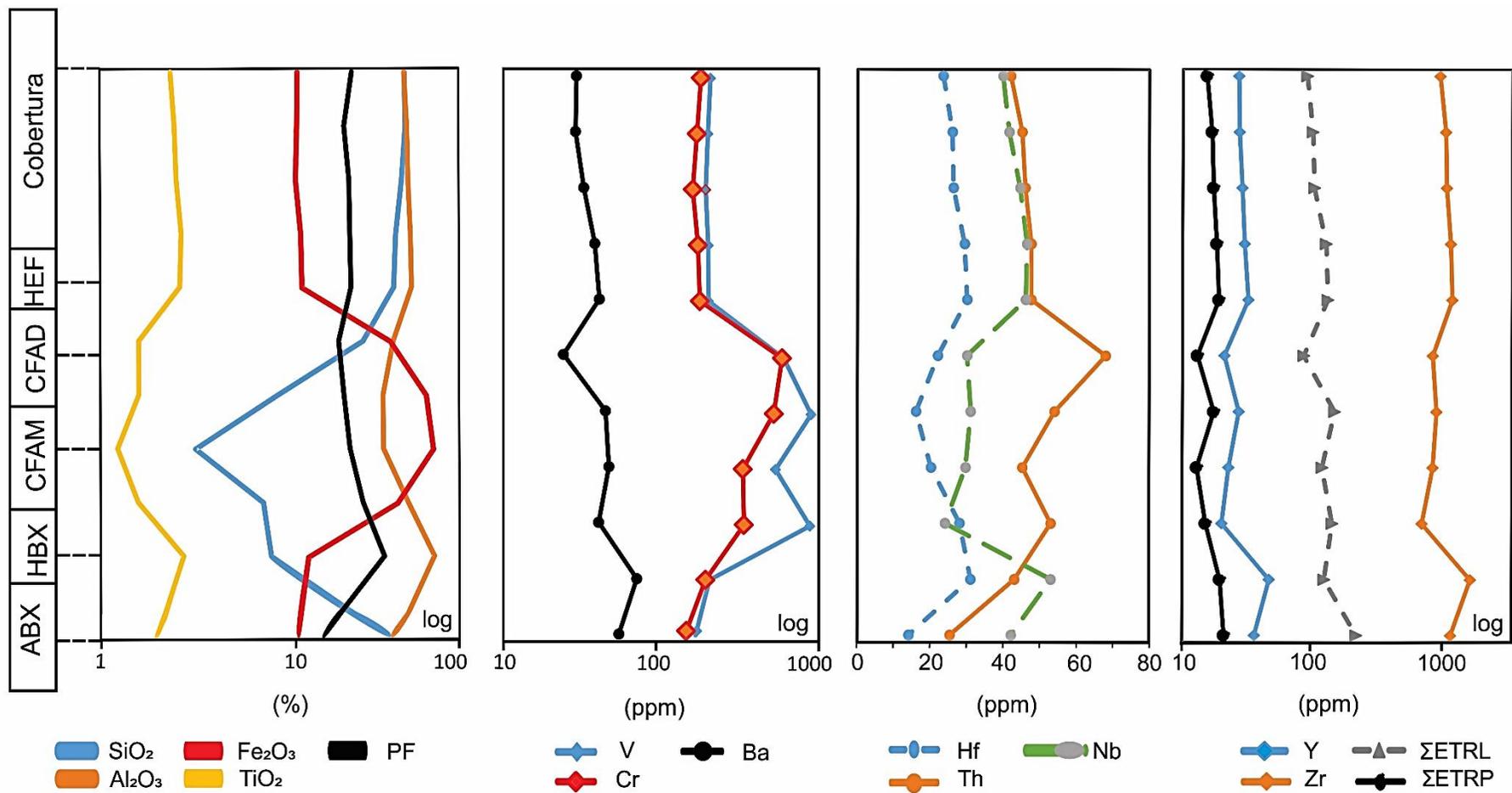
Tabela 2 – Concentrações médias dos elementos maiores, menores e traços de amostras representativas das três unidades estudadas confrontadas com a média da Crosta Continental Superior (CCS) da terra com base em Wedepohl, (1995). Legenda: ABX: Argila Bauxítica; HBX: Hz. Bauxítico; HBXC: Hz. Bauxítico Contato; CFAMB: Crosta Ferro-aluminosa Maciça Base; CFAMT: Crosta Ferro-aluminosa Maciça Topo; CFAD: Crosta Ferro-aluminosa Desmantelada; HEF: Hz. Esferolítico Ferruginoso; SIA: Siltito Argiloso; ARM: Argilito Maciço; ARA: Argilito Arenoso; ARC: Argilito Caulínico.

(continua)

| Elemento<br>(%)                | Grupo Itapecuru |        |        |        | Perfil laterito - bauxítico |         |         |        |        |        |        | Cobertura argilosa |         |         |         |         |        | CCS |
|--------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|-----------------------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------------------|---------|---------|---------|---------|--------|-----|
|                                | SIA             | ARM    | ARA    | ARC    | ABX                         | HBX     | HBXC    | CFAMB  | CFAMT  | CFAD   | HEF    | (0,5m)             | (4,5m)  | (8,5m)  | (12m)   | (13,5m) |        |     |
| SiO <sub>2</sub>               | 54,36           | 61,36  | 57,29  | 54,75  | 31,49                       | 7,10    | 7,97    | 6,51   | 3,05   | 7,67   | 19,99  | 32,02              | 32,34   | 31,00   | 29,00   | 28,22   | 61,50  |     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 26,96           | 21,73  | 22,82  | 27,06  | 37,50                       | 49,98   | 44,66   | 36,82  | 27,60  | 27,47  | 31,10  | 35,37              | 36,54   | 36,99   | 38,03   | 38,48   | 15,20  |     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7,23            | 6,76   | 9,60   | 6,42   | 11,93                       | 12,90   | 18,53   | 33,78  | 49,79  | 46,14  | 31,30  | 11,56              | 11,48   | 11,33   | 11,94   | 12,12   | 6,28   |     |
| TiO <sub>2</sub>               | 1,02            | 0,90   | 1,28   | 1,01   | 2,17                        | 2,66    | 3,95    | 1,56   | 1,23   | 1,58   | 1,58   | 2,30               | 2,41    | 2,46    | 2,61    | 2,56    | 0,68   |     |
| K <sub>2</sub> O               | 0,08            | 0,04   | 0,05   | 0,10   | 0,01                        | 0,01    | 0,01    | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,02               | 0,01    | 0,01    | 0,01    | 0,01    | 2,40   |     |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,01            | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01                        | 0,01    | 0,01    | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,02               | 0,01    | 0,02    | 0,01    | 0,01    | 3,30   |     |
| CaO                            | 0,01            | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01                        | 0,01    | 0,01    | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,02               | 0,02    | 0,02    | 0,02    | 0,02    | 5,50   |     |
| MgO                            | 0,02            | 0,02   | 0,02   | 0,04   | 0,02                        | 0,01    | 0,02    | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01               | 0,01    | 0,01    | 0,01    | 0,01    | 3,70   |     |
| MnO                            | 0,02            | 0,04   | 0,06   | 0,04   | 0,04                        | 0,02    | 0,05    | 0,01   | 0,02   | 0,01   | 0,01   | 0,01               | 0,01    | 0,01    | 0,01    | 0,01    | 0,01   |     |
| PF                             | 10,20           | 9,10   | 8,70   | 10,40  | 16,50                       | 26,93   | 24,20   | 20,95  | 18,00  | 16,75  | 15,75  | 18,50              | 16,90   | 17,90   | 18,10   | 18,30   | -      |     |
| Total                          | 99,95           | 99,99  | 99,87  | 99,87  | 99,68                       | 99,63   | 99,41   | 99,67  | 99,73  | 99,66  | 99,73  | 99,80              | 99,73   | 99,75   | 99,74   | 99,74   | -      |     |
| Sc                             | 8,00            | 7,00   | 9,00   | 10,00  | 15,00                       | 18,00   | 26,00   | 24,00  | 20,00  | 24,00  | 18,00  | 17,00              | 17,00   | 17,00   | 17,00   | 17,00   | 16,00  |     |
| V                              | 143,00          | 127,00 | 208,00 | 121,00 | 175,00                      | 210,00  | 286,00  | 865,00 | 522,00 | 856,00 | 571,00 | 188,00             | 184,00  | 181,00  | 190,00  | 193,00  | 98,00  |     |
| Cr                             | 157,40          | 47,90  | 41,10  | 34,20  | 150,50                      | 198,40  | 253,20  | 338,68 | 328,40 | 502,90 | 557,60 | 164,20             | 157,40  | 150,50  | 164,20  | 171,10  | 126,00 |     |
| Co                             | 1,40            | 0,90   | 1,00   | 1,40   | 2,20                        | 1,00    | 1,00    | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,60               | 1,30    | 1,30    | 0,90    | 1,10    | 24,00  |     |
| Ni                             | 1,20            | 1,30   | 0,80   | 1,20   | 1,50                        | 1,00    | 1,70    | 2,00   | 1,20   | 1,00   | 1,00   | 1,70               | 1,20    | 1,30    | 1,00    | 1,40    | 56,00  |     |
| Cu                             | 5,50            | 5,70   | 4,60   | 5,40   | 4,10                        | 4,00    | 6,40    | 16,00  | 10,50  | 13,00  | 5,00   | 1,50               | 1,50    | 1,10    | 1,20    | 2,10    | 14,30  |     |
| Zn                             | 2,00            | 2,00   | 1,00   | 2,00   | 3,00                        | 2,00    | 3,00    | 7,00   | 9,00   | 10,00  | 3,00   | 4,00               | 3,00    | 2,00    | 1,00    | 2,00    | 52,00  |     |
| Ga                             | 34,50           | 25,00  | 30,70  | 28,20  | 42,20                       | 50,00   | 56,10   | 62,00  | 66,00  | 72,00  | 88,00  | 47,30              | 46,60   | 49,00   | 52,00   | 53,50   | 14,00  |     |
| As                             | 0,50            | 0,70   | 1,60   | 1,00   | 1,30                        | 2,00    | 2,30    | 9,00   | 5,40   | 9,00   | 13,00  | 0,90               | 0,50    | 0,50    | 0,60    | 0,60    | 2,00   |     |
| Se                             | <0,5            | <0,5   | <0,5   | <0,5   | 0,50                        | 1,00    | 1,00    | 1,00   | 0,50   | 1,00   | 1,00   | 0,50               | 0,50    | 0,50    | 0,50    | 0,50    | -      |     |
| Rb                             | 3,10            | 1,90   | 2,00   | 4,40   | 0,70                        | <0,01   | 0,20    | <0,01  | <0,01  | <0,01  | <0,01  | <0,01              | <0,01   | <0,01   | <0,01   | <0,01   | 26,00  |     |
| Sr                             | 18,50           | 5,30   | 10,40  | 16,10  | 59,40                       | 72,00   | 112,90  | 27,00  | 34,40  | 33,00  | 21,00  | 26,20              | 27,40   | 28,90   | 34,30   | 39,00   | 316,00 |     |
| Y                              | 14,00           | 11,30  | 15,70  | 18,80  | 35,60                       | 46,00   | 75,50   | 20,00  | 22,60  | 27,00  | 21,00  | 26,90              | 27,20   | 28,60   | 29,80   | 31,90   | 20,70  |     |
| Zr                             | 382,10          | 399,50 | 552,80 | 650,80 | 1105,70                     | 1564,00 | 2513,30 | 666,80 | 807,20 | 864,20 | 807,00 | 914,40             | 1010,50 | 1026,70 | 1104,10 | 1135,50 | 237,00 |     |
| Nb                             | 16,90           | 14,80  | 20,90  | 18,70  | 43,10                       | 54,00   | 80,40   | 25,00  | 30,60  | 32,00  | 31,00  | 40,80              | 42,50   | 45,50   | 47,40   | 47,10   | 26,00  |     |
| Mo                             | 0,20            | 0,20   | 0,20   | 0,20   | 0,70                        | 1,00    | 1,30    | 3,00   | 2,30   | 4,00   | 4,00   | 0,60               | 0,50    | 0,20    | 0,20    | 0,20    | 1,10   |     |
| Sn                             | 3,00            | 2,00   | 3,00   | 2,00   | 7,00                        | 8,00    | 12,00   | 6,00   | 5,00   | 6,00   | 5,00   | 6,00               | 7,00    | 7,00    | 7,00    | 8,00    | 2,50   |     |
| Ba                             | 47,00           | 20,00  | 31,00  | 47,00  | 59,00                       | 75,00   | 110,00  | 43,00  | 49,00  | 46,00  | 25,00  | 28,00              | 28,00   | 32,00   | 38,00   | 41,00   | 584,00 |     |
| Hf                             | 10,40           | 10,20  | 14,20  | 16,60  | 15,00                       | 32,00   | 28,30   | 29,00  | 21,10  | 17,00  | 23,00  | 24,40              | 26,90   | 27,20   | 30,30   | 31,00   | 5,80   |     |
| Ta                             | 1,10            | 1,00   | 1,40   | 1,40   | 1,70                        | 3,00    | 3,20    | 3,00   | 2,30   | 2,00   | 2,00   | 2,90               | 3,30    | 3,30    | 3,60    | 3,50    | 1,50   |     |
| W                              | 1,70            | 1,30   | 1,60   | 1,50   | 3,70                        | 4,00    | 7,10    | 3,00   | 3,30   | 4,00   | 4,00   | 3,10               | 3,10    | 3,10    | 3,60    | 3,70    | 1,40   |     |
| Hg                             | 0,01            | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01                        | 0,03    | 0,03    | 0,16   | 0,14   | 0,14   | 0,33   | 0,03               | 0,02    | 0,07    | 0,08    | 0,23    | 0,06   |     |
| Th                             | 16,60           | 16,40  | 22,90  | 23,20  | 26,30                       | 44,00   | 44,90   | 54,00  | 46,20  | 55,00  | 69,00  | 42,90              | 46,10   | 46,90   | 48,60   | 48,60   | 10,30  |     |
| Pb                             | 7,60            | 7,00   | 5,00   | 7,00   | 9,60                        | 6,00    | 15,90   | 16,00  | 19,70  | 29,00  | 13,00  | 2,90               | 3,30    | 3,30    | 3,60    | 3,50    | 14,80  |     |
| U                              | 1,80            | 1,40   | 2,00   | 2,40   |                             | 4,00    | 4,30    | 4,00   | 3,70   | 4,00   | 5,00   | 3,80               | 3,80    | 4,30    | 4,50    | 4,40    | 2,50   |     |

(conclusão)

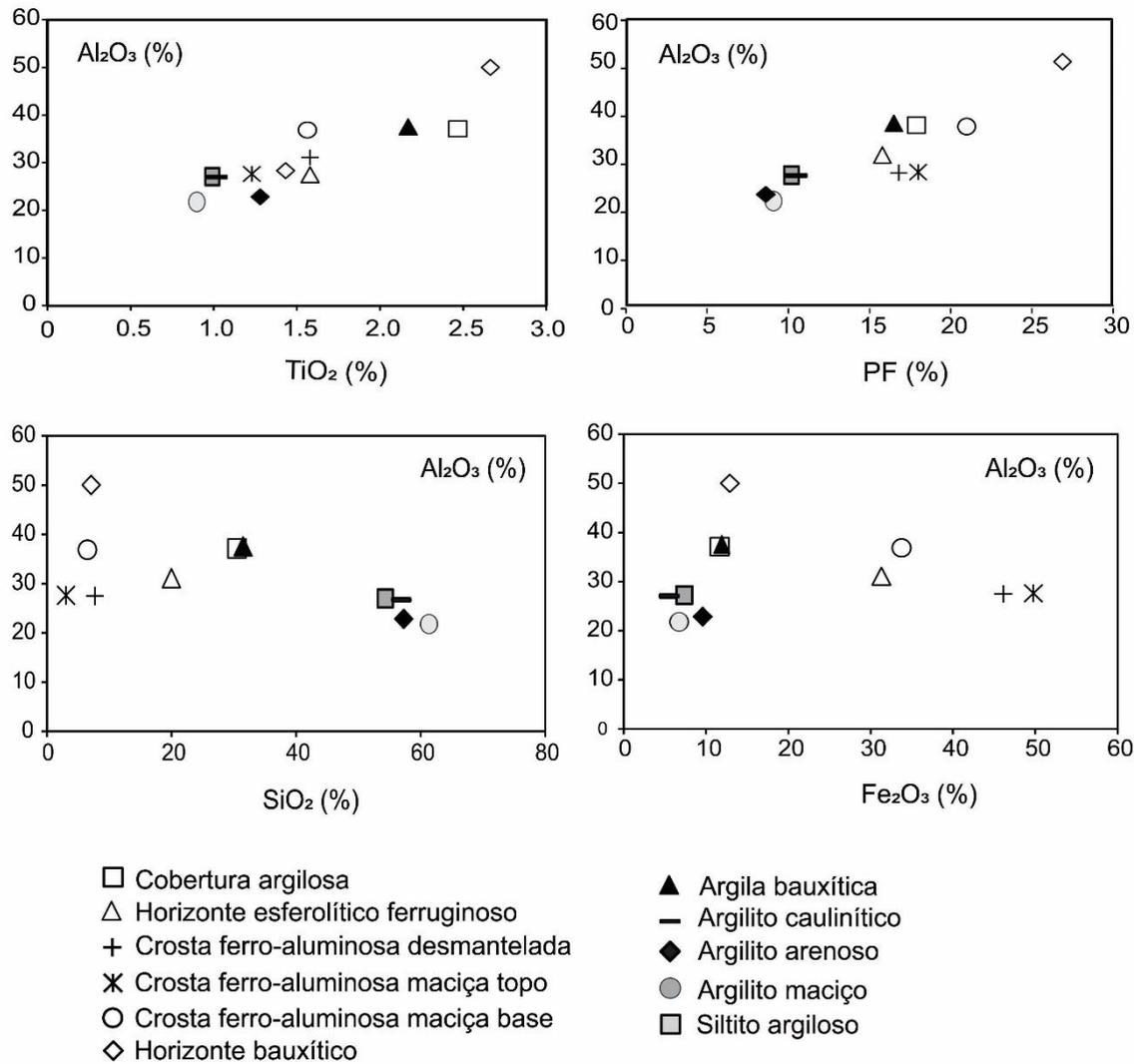
| Elemento<br>(ppm)                | Grupo Itapecuru |       |        |       | Perfil Laterito - Bauxítico |        |        |        |        |        |       | Cobertura argilosa |        |        |         | CCS   |
|----------------------------------|-----------------|-------|--------|-------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------------------|--------|--------|---------|-------|
|                                  | SIA             | ARM   | ARA    | ARC   | ABX                         | HBX    | HBXC   | CFAMB  | CFAMT  | CFAD   | HEF   | (0,5m)             | (4,5m) | (12m)  | (13,5m) |       |
| La                               | 31,30           | 10,20 | 15,30  | 23,40 | 81,50                       | 127,33 | 207,40 | 47,00  | 40,35  | 51,10  | 25,35 | 26,6               | 29,2   | 40,4   | 42,1    | 32,30 |
| Ce                               | 41,50           | 37,8  | 67,40  | 46,80 | 103,70                      | 152,00 | 240,50 | 70,85  | 54,90  | 68,65  | 44,45 | 47,3               | 53,0   | 64,0   | 64,7    | 64,00 |
| Nd                               | 10,70           | 3,70  | 6,00   | 7,70  | 23,50                       | 30,90  | 47,60  | 18,10  | 17,80  | 21,00  | 12,20 | 12,8               | 13,5   | 17,0   | 18,4    | 26,00 |
| Sm                               | 1,56            | 0,79  | 1,23   | 1,50  | 3,52                        | 4,30   | 6,54   | 3,10   | 3,20   | 3,90   | 2,30  | 2,38               | 2,46   | 2,94   | 3,07    | 4,70  |
| Eu                               | 0,41            | 0,19  | 0,30   | 0,41  | 0,76                        | 1,00   | 1,50   | 0,70   | 0,60   | 0,90   | 0,50  | 0,52               | 0,53   | 0,62   | 0,68    | 0,88  |
| Gd                               | 1,65            | 1,08  | 1,64   | 1,87  | 4,09                        | 5,10   | 8,13   | 3,10   | 2,90   | 3,90   | 2,50  | 2,64               | 2,73   | 3,30   | 3,54    | 2,80  |
| Dy                               | 2,25            | 1,74  | 2,46   | 2,75  | 5,79                        | 7,40   | 11,83  | 4,10   | 3,60   | 4,80   | 3,50  | 3,89               | 4,31   | 4,84   | 4,87    | 3,50  |
| Ho                               | 0,49            | 0,41  | 0,58   | 0,64  | 1,26                        | 1,70   | 2,69   | 0,90   | 0,70   | 1,00   | 0,80  | 0,98               | 1,09   | 1,14   | 1,19    | 0,80  |
| Er                               | 1,65            | 1,25  | 2,04   | 2,13  | 4,08                        | 5,50   | 8,97   | 2,90   | 2,40   | 3,20   | 2,50  | 3,17               | 3,58   | 3,60   | 3,86    | 2,30  |
| Yb                               | 2,08            | 1,83  | 2,68   | 2,66  | 4,95                        | 6,90   | 10,93  | 2,80   | 3,60   | 3,90   | 3,20  | 4,09               | 4,38   | 4,67   | 4,84    | 1,50  |
| Lu                               | 0,33            | 0,29  | 0,43   | 0,44  | 0,80                        | 1,10   | 1,76   | 0,60   | 0,50   | 0,60   | 0,50  | 0,64               | 0,72   | 0,79   | 0,77    | 0,30  |
| ΣETR                             | 93,92           | 59,28 | 100,06 | 90,30 | 233,95                      | 343,23 | 547,85 | 151,05 | 130,55 | 162,95 | 97,80 | 105,01             | 115,50 | 143,30 | 148,02  | 139,1 |
| ΣETRL                            | 85,06           | 52,49 | 89,93  | 79,40 | 212,22                      | 314,53 | 502,04 | 135,95 | 116,25 | 144,65 | 84,30 | 89,08              | 98,16  | 124,34 | 128,27  | 124,5 |
| ΣETRP                            | 8,45            | 6,60  | 9,83   | 10,49 | 20,97                       | 27,70  | 44,31  | 14,40  | 13,70  | 17,40  | 13,00 | 15,41              | 16,81  | 18,34  | 19,07   | 12,90 |
| Zr/Hf                            | 36,74           | 39,16 | 38,92  | 39,20 | 73,71                       | 48,88  | 88,81  | 22,99  | 38,25  | 50,83  | 35,08 | 37,47              | 37,56  | 36,44  | 36,62   | 40,86 |
| La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub> | 10,15           | 3,76  | 3,85   | 5,93  | 11,11                       | 12,45  | 12,80  | 11,33  | 7,56   | 8,84   | 5,34  | 4,38               | 4,49   | 5,83   | 5,87    | 14,53 |
| La <sub>N</sub> /Lu <sub>N</sub> | 9,93            | 3,68  | 3,72   | 5,56  | 10,57                       | 12,01  | 12,20  | 8,13   | 8,38   | 8,84   | 5,26  | 4,31               | 4,21   | 5,30   | 5,67    | 11,17 |
| La <sub>N</sub> /Sm <sub>N</sub> | 12,63           | 8,12  | 7,83   | 9,20  | 14,60                       | 18,60  | 20     | 9,50   | 7,90   | 8,20   | 6,90  | 7,00               | 7,50   | 8,70   | 8,60    | 4,32  |
| Gd <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub> | 0,64            | 0,47  | 0,49   | 0,56  | 0,67                        | 0,60   | 0,60   | 0,89   | 0,65   | 0,80   | 0,63  | 0,52               | 0,50   | 0,57   | 0,59    | 1,50  |
| CIA                              | 99,60           | 99,70 | 99,60  | 99,50 | 99,92                       | 99,94  | 99,93  | 99,91  | 99,89  | 99,89  | 99,90 | 99,83              | 99,89  | 99,89  | 99,90   | -     |



**Figura 33** – Distribuição das concentrações médias dos elementos maiores, menores e traços no perfil laterito-bauxítico e cobertura da lavra piloto Ciríaco.

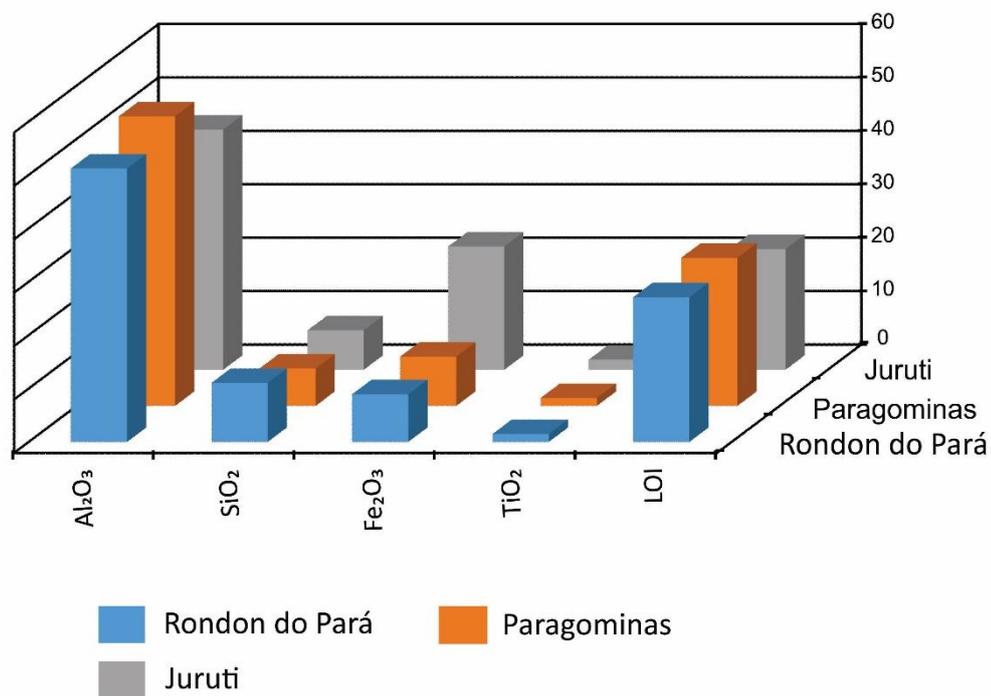
Os teores de  $\text{TiO}_2$  ao contrário do Grupo Itapecuru, se mostram com distribuição irregular entre 1,23 e 3,95 %, enquanto na cobertura argilosa mantém-se constante em torno de 2,5 %. Os teores de  $\text{SiO}_2$ , assim como no Grupo Itapecuru constituem caulinita e quartzo no horizonte argiloso bauxítico, embora aqui o quartzo seja já muito restrito, bem como as caulinitas dos demais horizontes, mas na cobertura esse mineral é muito abundante. Quando se compara os teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  do perfil laterito-bauxítico com os das rochas do Grupo Itapecuru, o siltito argiloso e o argilito caulínico se mostram elevados, em torno de 27 %, o que os torna muito favoráveis a formar bauxitas. O argilito maciço e argilito arenoso com aproximadamente 22 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , também se destacam com grande potencial. A composição mineralógica se aproxima a do perfil laterítico, diverge pela ausência de gibbsita e Al-goethita.

Os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no perfil laterito-bauxítico como já mencionado formam hematita e goethita, além de Al-goethita. Esses minerais como vistos, são muito abundantes nas crostas ferro-aluminosas e seus produtos de desmantelamento, em que a goethita, além de ocorrer nas crostas é frequente na cobertura argilosa. Os valores de  $\text{TiO}_2$  comportam tanto anatásio como rutilo, embora este não tenha sido detectado na DRX ele ocorre conforme descrito nos minerais pesados, ambos ocorrem como acessórios nas rochas do Grupo Itapecuru, ao longo de todo o perfil laterito-bauxítico e cobertura argilosa. Os valores de PF nas rochas do Grupo Itapecuru em média 10 % retratam a caulinita, enquanto no perfil laterito-bauxítico os teores mais elevados de PF (> 18 %) espelham fielmente a presença de gibbsita, principalmente no horizonte bauxítico (26,9 % de PF). Além disso, é perceptível sua forte correlação positiva com  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $r = 0,94$ ). Um fato típico de perfil laterítico, reforçado ainda pela correlação significativa e positiva  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$  (Figura 34). Nas rochas do Grupo Itapecuru também se observa este comportamento do  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , com forte linearidade com PF e  $\text{TiO}_2$  (Figura 34).



**Figura 34** – Diagramas de dispersão para  $Al_2O_3$  versus ( $TiO_2$ , PF,  $SiO_2$  e  $Fe_2O_3$ ) que retratam o comportamento desses pares no perfil laterito-bauxítico, cobertura argilosa e rochas intemperizadas do Grupo Itapecuru.

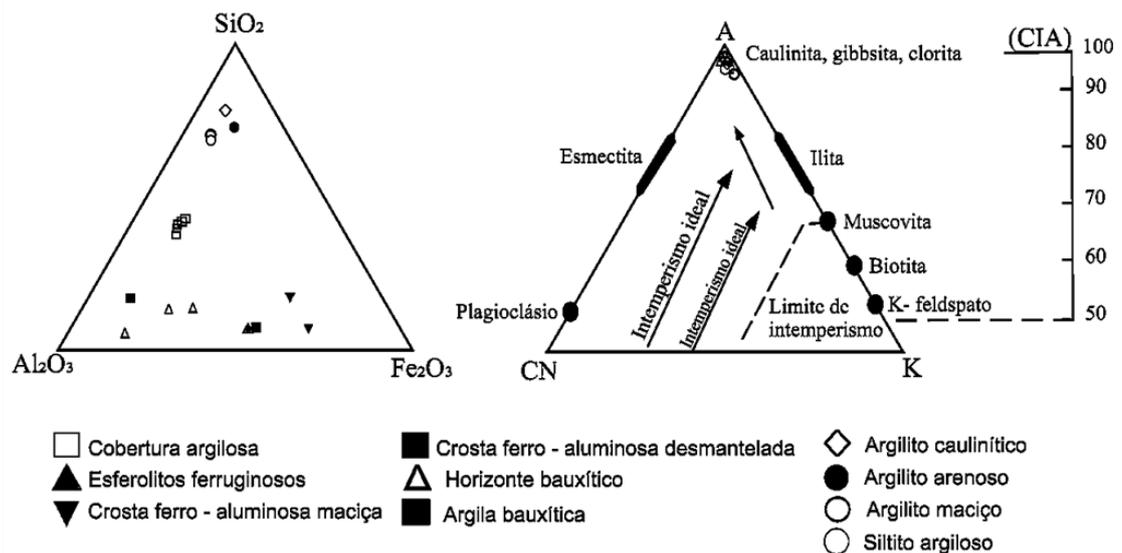
O padrão de distribuição dos elementos químicos maiores, bem como os seus teores tanto do perfil laterito-bauxítico como da cobertura argilosa são compatíveis com aquele descrito por Kotschoubey et al. (2005) para Paragominas e Costa et al. (2014) para o depósito de Juruti, (Figura 35). As diferenças entre os depósitos se manifestam tão somente nos teores absolutos dos elementos. Neste contexto a cobertura argilosa constitui de fato um corpo a parte de constituição textural, mineralógica e química muito homogênea e peculiar comparativamente.



**Figura 35** – Concentração de elementos maiores do horizonte bauxítico confrontados aos teores das bauxitas de Paragominas e Juruti (Kotschoubey et al., 2005) e (Costa et al., 2014) respectivamente.

Os demais elementos como K, Na, Ca e Mg se encontram em concentrações muito baixas, tanto nas rochas do Grupo Itapecuru como no perfil laterito-bauxítico e cobertura, sendo estas abaixo da média crustal. Os teores dos metais alcalinos e alcalinos terrosos igualmente apresentam baixa concentração, bem como de Mn e P, que em geral são menores do que 0,05 %.

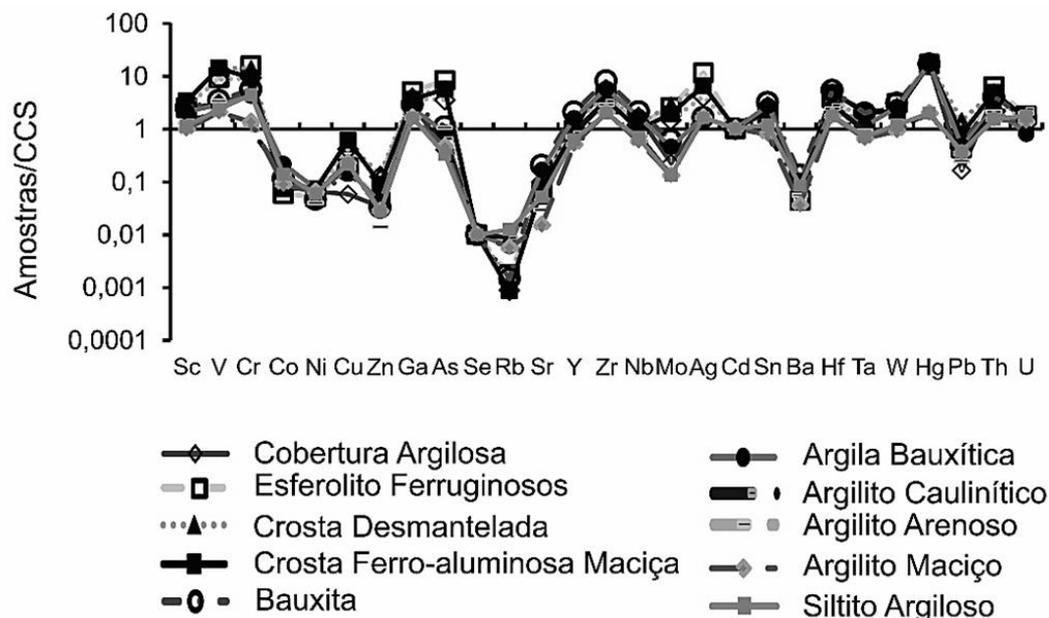
Isto demonstra sua possível lixiviação, portanto já em elevado processo de alteração intempérica, sugerindo intenso e prologado processo de intemperismo da rocha fonte (Nesbitt & Young, 1982), ou pode se tratar de rochas já desprovidas destes elementos. Os sedimentos das três unidades apresentam elevado grau de alteração intempérica (CIA = 99, figura 36). O índice de alteração química ‘CIA’ (*Chemical index of alteration*) =  $[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO)] \times 100$  (Nesbitt & Young, 1982). Demonstrando que o intemperismo sobre os sedimentos das três unidades foi intenso como indicado pela assembleia de minerais pesados, as quais, mostram domínio de minerais ultraestáveis como zircão, turmalina e rutilo.



**Figura 36** – Diagrama ternário SiO<sub>2</sub>, - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mostrando a variação química ao longo do perfil laterito-bauxítico, cobertura argilosa e rochas do Grupo Itapecuru; Diagrama ternário para o índice de intemperismo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A), CaO + Na<sub>2</sub>O (CN) e K<sub>2</sub>O (K), CIA =  $[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO)] \times 100$  conforme proposição de Nesbitt & Young (1982).

As rochas intemperizadas do Grupo Itapecuru se destacam por apresentar concentrações de elementos traços na maioria abaixo da média crustal (Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Y, Nb, Mo, Ba, e Pb) ou próximo desta (Sc, Ag, Cd, Sn, Ta, W). Exceto V, Cr, Ga, e Th que se encontram acima, elementos estes geralmente ligados aos óxi-hidróxidos de ferro (Maclean et al., 1997; Mameli et al., 2007; Haniçli, 2013; Costa et al., 2014). Além de Zr e Hf que também se encontram acima da média crustal.

Este quadro composicional seria altamente favorável a formação do perfil laterito-bauxítico na lavra piloto Ciríaco a partir de rochas equivalentes às do Grupo Itapecuru aflorantes na BR 222 km 130, aqui investigadas. Neste quadro, ao concentrar residualmente minerais resistentes como anatásio e zircão, se promoveria o enriquecimento relativo de elementos como: Sc, Y, Nb, Pb, Sn, Ta, enquanto o enriquecimento absoluto de Fe como óxi-hidróxidos os de As, Ni, V, Cr e U (Maclean et al., 1997; Liu et al., 2010; Braun et al., 2012; Costa et al., 2014), com potencialidade para alcançar valores observados nos horizontes do perfil laterito-bauxítico e cobertura argilosa. Segundo Costa et al. (2014) o fator de enriquecimento para os residuais seria de 2 a 3, enquanto nos absolutos seria de 4 a 7 ou mais. O perfil laterito-bauxítico e sua cobertura se mostram compatíveis com este cenário, com teores de elementos traços acima da média crustal como: As (2,3 a 13 ppm) e Mo (2,3 a 4 ppm) apenas nas crostas e esferolitos, enquanto o V (173 a 887 ppm), Cr (150 a 190 ppm), Sc (10 a 26 ppm), Ga (46 a 88 ppm), Y (21 a 75,5 ppm), Zr (737 a 2513 ppm), Hf (15 a 32 ppm), Nb (31 a 80,4 ppm), Ta (2 a 3 ppm) e U (3,7 a 5 ppm). Além disso, são comparativamente mais elevados (enriquecidos) em todo o perfil laterito-bauxítico e cobertura. Por outro lado, os teores de Co, Ni, Cu, Zn, Ba, Pb, Rb e Sr estão abaixo da média crustal, aparentemente empobrecidos nas três unidades (Figura 37).

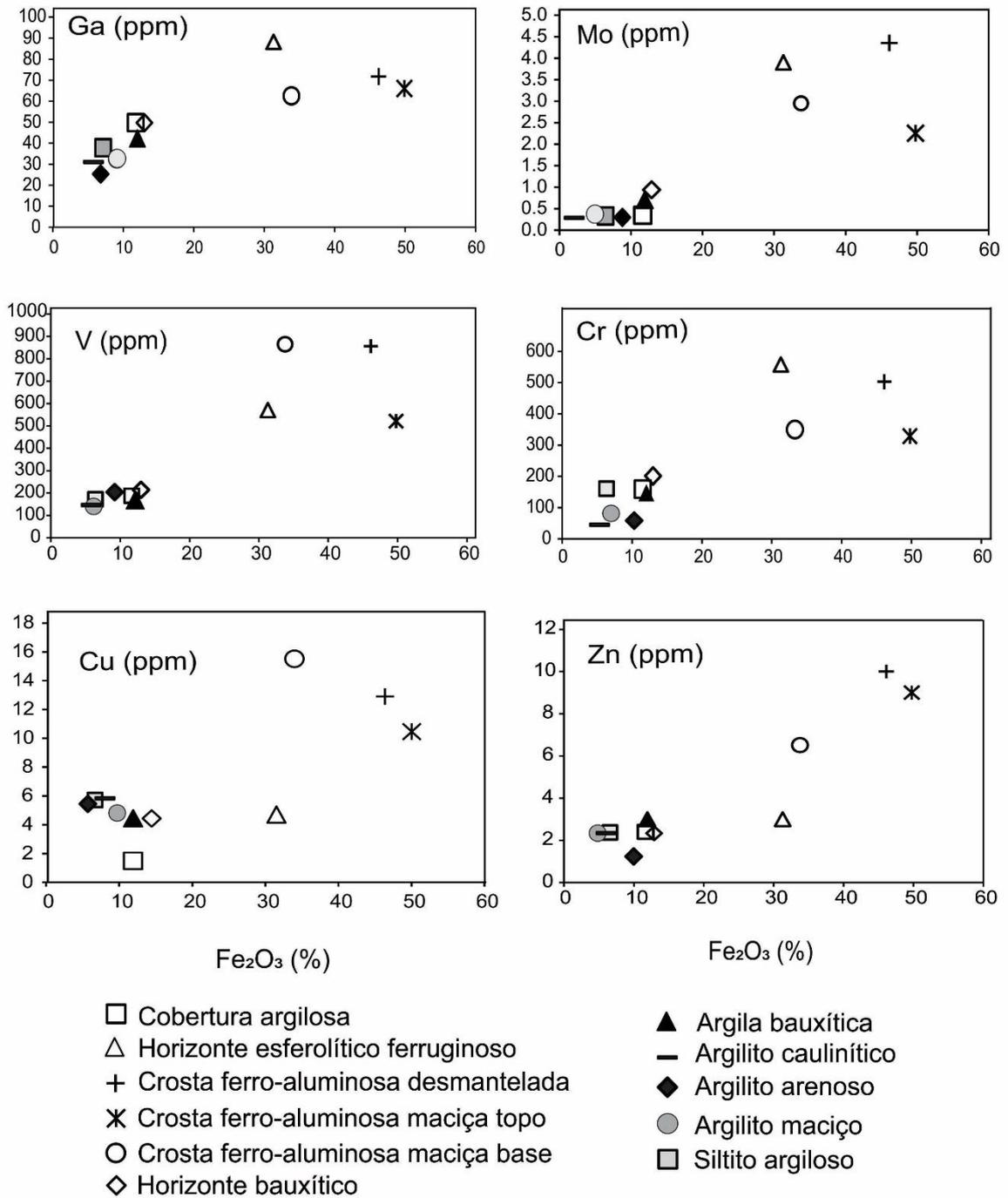


**Figura 37** – Normalização da composição química dos elementos menores e traços das três unidades (rochas do Grupo Itapecuru, perfil laterito-bauxítico e cobertura) confrontadas com a Crosta Continental Superior (CCS).

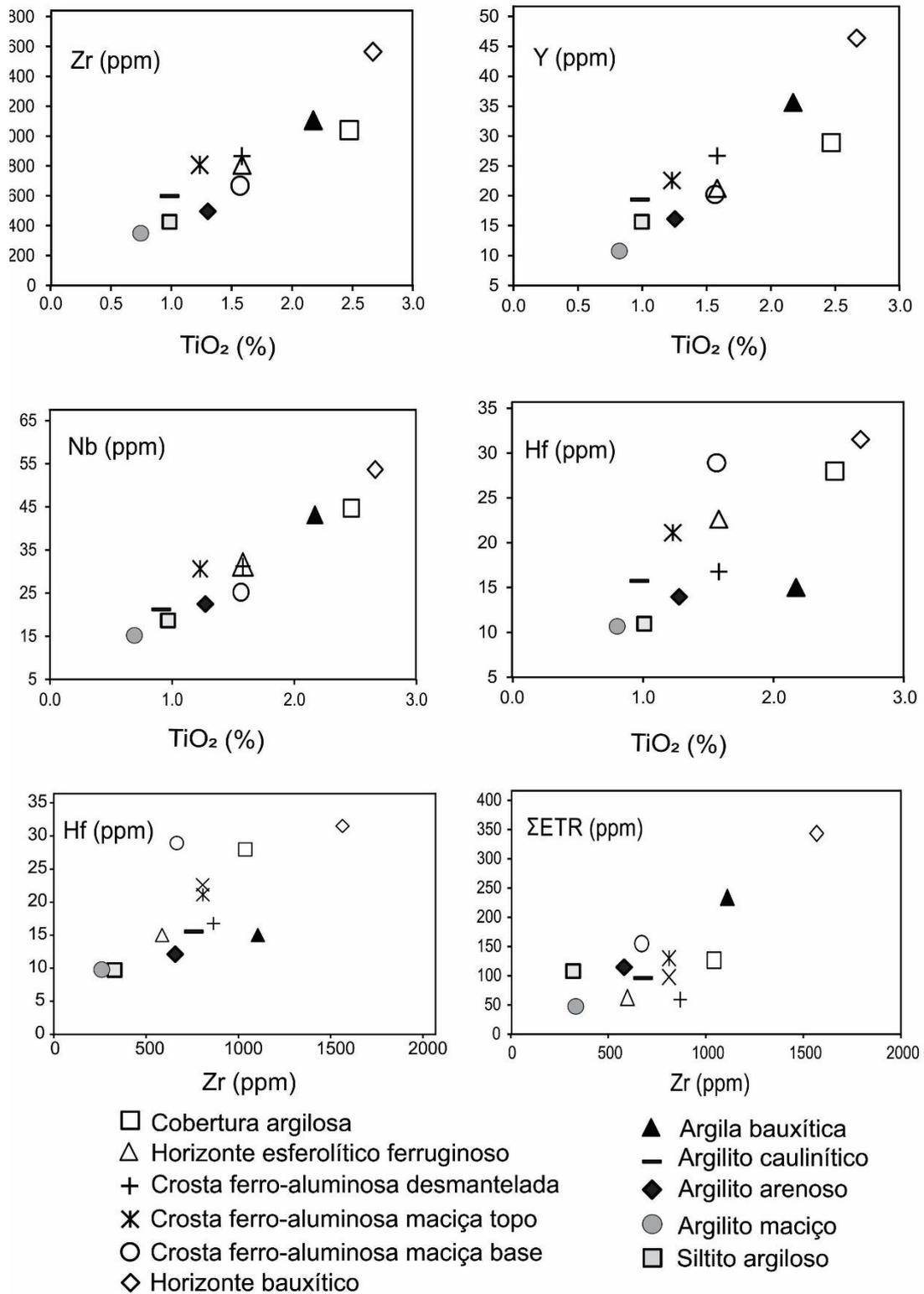
Fontes dos dados da CCS: MacLennan e Taylor (1980).

Os teores de As, Cr, Ga, Hg, Mo, Se, V, Th, e ainda Cu e Zn mostram correlação positiva com os de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nas três unidades, e seus valores se enriquecem fundamentalmente no topo do perfil laterito-bauxítico (Figura 37), ou seja, mostram forte afinidade com os óxi-hidróxidos de ferro, como já observado no perfil laterito-bauxítico de Paragominas (Kotschoubey et al., 2005) e Juruti (Costa et al., 2014).

Por sua vez, Zr, Hf, Nb, Ta, Y e U se enriquecem no horizonte bauxítico, em paralelo aos teores de  $\text{TiO}_2$  como mostram os diagramas de dispersão (Figura 38). Estes elementos são normalmente de natureza residual, na estrutura de minerais estáveis, como zircão ou neoformados e mesmo estáveis como o anatásio (Costa et al., 2014). Surpreende a correlação Zr x Hf, menos significativa (Figura 39) do que nos perfis laterito-bauxíticos de Juruti, (Costa et al., 2014) e mesmo com os de Paragominas, sugerindo que os zircões de fato sejam oriundos de várias fontes genéticas diferentes, com razões Zr/Hf (de 22,9 a 88,8) bem distintas. Por outro lado, a diminuição de Zr para o topo do perfil e o aumento deste na cobertura argilosa é similar ao registrado para outros perfis lateríticos da região Amazônica (Horbe, 1995; Horbe & Costa, 1999 e 2005; Kotschoubey et al., 2005; Costa et al., 2014). A forte correlação entre Zr e  $\text{TiO}_2$  ( $R = 0,95$ , Figura 39) em todo o perfil laterito-bauxítico e se estendendo a cobertura argilosa, demonstra uma distribuição homogênea tanto de zircão como de anatásio, sugerindo relação genética entre os sedimentos do perfil laterítico e sua cobertura.



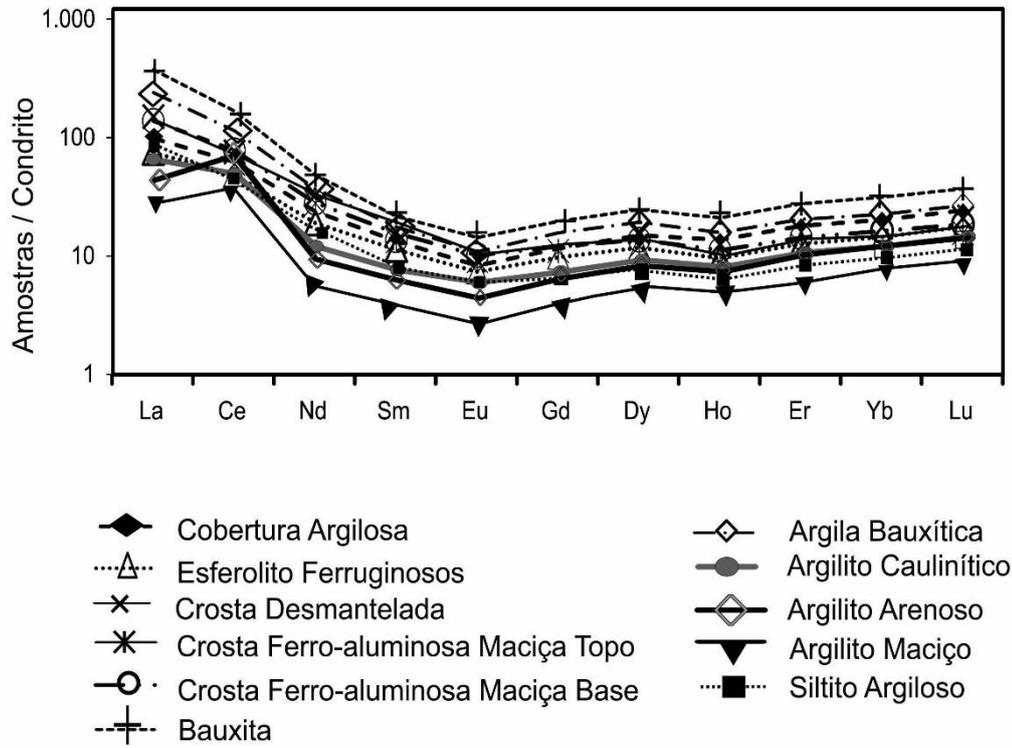
**Figura 38** – Diagramas de dispersão para elementos químicos que indicam afinidade com  $Fe_2O_3$  comportamento típico em evolução de perfil laterítico.



**Figura 39** – Diagramas de dispersão entre elementos químicos imóveis, associados a minerais resistentes nas três unidades estudadas.

As concentrações dos ETR nas rochas do Grupo Itapecuru são praticamente constantes e abaixo da média crustal. Em contrapartida no perfil laterito-bauxítico aumentam da base para o topo, mas somente até no horizonte bauxítico. A partir das crostas os teores desses elementos diminuem em direção ao topo, e na cobertura se mantêm os mesmos valores em toda ela, onde se equivalem ou estão apenas ligeiramente acima da média crustal. As razões extremamente variáveis de  $La_N/Lu_N$ ,  $La_N/Sm_N$  e  $Gd_N/Yb_N$  nas três unidades, sugerem fracionamento dos ETR, envolvendo liberação, mobilidade e fixação diferenciada, associada a neoformação mineral (Kotschoubey et al., 2005; Mameli et al., 2007; Costa et al., 2014) com afinidade tanto para os óxi-hidróxidos de Fe, quanto para o anatásio, como já observado por Costa et al., (2014) em Juruti.

As rochas intemperizadas do Grupo Itapecuru quando normalizadas aos condritos apresentam anomalia positiva de Ce, mas a anomalia negativa de európio se faz também presente. Este padrão de distribuição diverge do perfil laterito-bauxítico e sua cobertura que exibem padrões de distribuição semelhantes, com boa dispersão e ligeira anomalia negativa de Eu. Em contrapartida as três unidades se assemelham no enriquecimento dos ETRL e no ligeiro empobrecimento dos ETRM (Figura 40), porém, o campo dos valores se coadunam melhor entre o Grupo Itapecuru e a cobertura argilosa. Também se ressalta o maior enriquecimento ETR no horizonte bauxítico, que por sua vez contém os valores mais elevados de Zr (2513,3 ppm), não compartilhados pelos de Hf, que são mais baixos nas rochas do Grupo Itapecuru, nos materiais ferruginosos do perfil laterito-bauxítico e cobertura. Deixa assim claro que os ETR estão preferencialmente no zircão.



**Figura 40** – Padrões de distribuição ETR das três unidades normalizados em relação aos condritos.

## 10 CONCLUSÕES

As rochas do Grupo Itapecuru aqui investigadas, como prováveis rocha mãe do perfil laterito-bauxítico e respectiva cobertura como produto deste, mostram profunda semelhanças na mineralogia, morfologia dos minerais pesados e na composição química de seus sedimentos. A mineralogia das unidades estudadas são basicamente caulinita, gibbsita, quartzo, hematita, goethita e como acessório anatásio e minerais pesados (zircão, turmalina, rutilo e estauroilita). Entretanto estes divergem em conteúdo, que oscila segundo a litologia, e por ausência de gibbsita e goethita nas rochas do Grupo Itapecuru. A composição química é fundamentalmente composta de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ , que retratam fielmente os principais minerais e assim como estes os seus teores diferem, conforme a litologia e mesmo entre as unidades. As concentrações de elementos traços nas três unidades são particularmente variáveis e somente V, Cr, Ga, Zr, Hf e Th se encontram acima da média crustal, estes se correlacionam bem aos óxi-hidróxidos de ferro. Quando normalizados aos condritos as três unidades divergem pela anomalia positiva de Ce no Grupo Itapecuru, mas são similares na anomalia negativa de Eu, no empobrecimento do ETRL e enriquecimento dos ETRP. A forte correlação entre os elementos químicos dos materiais de cada litologia destas unidades, especialmente os ETR e os valores de “CIA” ( $\sim 99,9$ ), são condizentes com a hipótese de progressiva transformação laterítica das rochas do Grupo Itapecuru e posterior formação do perfil laterito-bauxítico *in situ* ou com pouco transporte. Os resultados indicam que a lateritização foi um processo contínuo, associado ao aumento gradual da lixiviação com forte enriquecimento de Fe, e progressiva remoção de Si e Al em direção ao topo do perfil laterito-bauxítico, um fato típico durante evolução laterítica. O perfil laterito-bauxítico de Rondon do Pará é portanto resultado do processo de lateritização das rochas do Grupo Itapecuru, favorecidos pelas condições climáticas sazonais, ação biológica e provavelmente estabilidade tectônica, que proporcionaram um ambiente geoquímico favorável ao seu desenvolvimento, evolução e transformação em cobertura argilosa. Os dados obtidos mostram que, o perfil laterito-bauxítico de Rondon do Pará e sua respectiva cobertura argilosa são correlacionáveis com os depósitos de Paragominas e Juruti. Fato este, que permite inferir que o perfil laterito-bauxítico de Rondon do Pará experimentou um desenvolvimento e evolução em condições análogas a destes depósitos.

## REFERÊNCIAS

- Amigó, J. M., Bastita, J., Sans, A., Signes, M., Serrano, J. 1994. Crystallinity of Lower Cretaceous kaolinites of Teruel. *Applied Clay science*, v.9, p.51-69.
- Anaisse JR J., Truckenbrodt W., Rossetti D.F. 2001. Fácies de um sistema estuarino lagunar no Grupo Itapecuru, área de Açailândia (MA), Bacia do Grajaú. In.: D.F Rossetti, A.M. Góes & W. Truckenbrodt (Eds.). *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. (Coleção Friedrich Katzer): 119-150.
- Balan, E., Allard, T., Boizot, B., Morin, G. and Muller, J. P. 1999. Structural Fe<sup>3+</sup> in nature Kaolinites: new insights from electron paramagnetic resonance spectra fitting at X and Q-band frequencies. *Clay and clay minerals*, v. 47, p. 605 – 616.
- Balan, E., Fritsch, E., Allard, T., Calas, G. 2007. Inheritance Vs. Neof ormation of Kaolinite during lateritic soil formation: A case study in the middle Amazon Basin. *Clay and clay minerals*, v. 55, No. 3, p. 253 – 259.
- Boulangé, B., Carvalho, A. 1997. The bauxite of Porto Trombetas, In: Carvalho, A., Boulangé, B., Melfi, A.J., Lucas, Y. (Eds.), *Brazilian Bauxites*. 1rd Ed., USP/FAPESP/ORSTOM, São Paulo, p. 55-73.
- Braun, J.J., Marechal, J.C., Riotte, J., Boeglin, J.L., Bedimo, J.P., Ndam Ngoupayou, J.R., Nyeck, B., Robain, H., Sekhar, M., Audry, S., Viers, J. 2012. Elemental weathering fluxes and saprolite production rate in a Central African lateritic terrain (Nsimi, South Cameroon). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 99, 243–270.
- Corfu F., Hanchar J.M., Hoskin P.W.O., Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. In.: Hanchar, J.M., Hoskin P.W.O. (Ed). *Reviews in mineralogy & geochemistry*, 53, Min. Soc. of Am. and Geochemistry. Soc., p 469-500.
- Costa, M.L. 1984. A dinâmica de formação de lateritas: O exemplo do NE do Pará e NW do Maranhão. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia. Rio de Janeiro, *Anais*, p. 4823 – 4837.
- Costa, M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(2): 146 -160.

- Costa, M. L., Fernandez, O. J. C. & Requelme, M. E. R. 2005. O depósito de manganês do Azul, Carajás: Estratigrafia, mineralogia, geoquímica e evolução geológica. *In: Marini, O. J., Queiroz, E. T. & Ramos, B. W. (Eds.): Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia: DNPM-CT/Mineral- ADIMB, Brasília. p. 227-334.*
- Costa, M.L. 2007. Introdução ao intemperismo laterítico e à lateritização. *In: Bandeira et al. (2007) (orgs.) – Prospecção geoquímica. Sociedade Brasileira de Geoquímica – SBGq, Rio de Janeiro. p. 299-344.*
- Costa, M.L., Cruz, G. S., Almeida, H.F., Poellmann, H. 2014. On the geology, mineralogy and geochemistry of the bauxite-bearing regolith in the lower Amazon basin: Evidence of genetic relationships, *Journal of Geochemical Exploration* v. **146**, p. 58-74.
- Cruz, G.S. 2011. *Bauxita, horizonte nodular e cobertura argilosa da região de Paragominas e Juruti, estado do Pará*. Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 114p.
- Dantas, M. E., Teixeira. S.G. 2013. A origem das Paisagens. *In: Autores. Geodiversidade do estado do Pará – programa Geologia do Brasil/Levantamento da Geodiversidade.CPRM. Cap.3. P.25-52.*
- Fritsch, E. Montes – Lauer, C. R., Boulet, R., Melfi, A. J., Balan, E., Magat, P. 2002. Lateritic and redoximorphic features in fractured soils and sediments of the Manaus plateaus, Brazil. *European Journal of Soil Science*, v. **53**, p. 203 – 218.
- Fritsch, E. Morin, G., Bedidi, A., Bonnin, D., Balan, E., Caquineau, S. and Calas, G. 2005. Transformation of hematite and Al-poor goethite to Al-rich goethite and associated yellowing in a ferralitic clay soil profile of the middle Amazon Basin (Manaus, Brazil). *European Journal of Soil Science*, **56**, p. 575 – 588.
- Gaite, J.M., Ermakoff, P., Allard, Th., Muller, J.P. 1997. Paramagnetic Fe<sup>3+</sup>: A sensitive probe for disorder in Kaolinite. *Clays and Clay Minerals*, **45**, p. 496 – 505.
- Góes A.M. 1981. *Estudo sedimentológico dos sedimentos Barreiras, Ipixuna e Itapecuru, no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão*. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 55 p.
- Góes, A.M. 1995. A Formação Poti (Carbonífero inferior) da bacia do Parnaíba. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, USP, 171p.

- Góes, A.M. & Rossetti D.F. 2001. Gênese da Bacia de São Luís-Grajaú, Meio-Norte do Brasil. *In: D.F Rossetti, A.M. Góes & W. Truckenbrodt (Eds.). O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú. Coleção Friedrich Katzer: 15-29.*
- Giral-Kacmarčík, S., Savin, S.M., Nahon, D.B., Girard, J-P., Lucas, Y., Abel, L. 1998. Oxygen isotope geochemistry of kaolinite in laterite-forming processes, Manaus, Amazonas, Brazil, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. **62**, n. 11, p. 1865 – 1879.
- Hanilçı, N. 2013. Geological and geochemical evolution of the Bolkardaği, bauxite deposits, Karaman, Turkey: Transformation from shale to bauxite. *Journal of Geochemical Exploration* v. **146**, p. 58-74.
- Henry, D.J., Guidotti, C.V. 1985. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *Am. Mineral.* **70**, p. 1 – 15.
- Horbe, A.M. 1995. Evolução mineralógica e geoquímica multi-elementar de perfis de solos sobre lateritos e gossans na Amazônia. Tese de doutorado. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 213p.
- Horbe A.M.C., Costa M.L. 1997. Solos gerados a partir do intemperismo de crostas lateríticas sílico-ferruginosas. *Acta Amazônica*. v. **27**, p. 241-256.
- Horbe, A.M.C., Costa, M.L. 1999. Relações genéticas entre latossolos e crostas lateríticas aluminosas e alumino-ferruginosas na região de Paragominas, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, v. **29 (4)**, p. 497-504.
- Horbe, A.M.C., Costa, M.L. 2005. Lateritic crust and related soils in eastern Brazilian Amazônia. *Geoderma* ed. 126, p. 225 – 239.
- Horbe, A.M.C., Anand, R.R. 2011. Bauxite on igneous rocks from Amazonia and Southwestern of Australia: Implication for weathering process. *Journal of Geochemical Exploration* n. **111**, p. 1–12.
- Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. 2013. Acessado em novembro/ 2014. Disponível em: [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br).
- Kotschoubey B., Truckenbrodt, W. 1981. Evolução poligenética das bauxitas do distrito de Paragominas – Açailândia (estados do Pará e Maranhão). *Revista Brasileira de Geociências*, v. **11**, p.193-202.
- Kotschoubey, B. 1984. Bauxitas do Baixo Nhamundá, região do Médio e Baixo Amazonas - natureza e gênese. *In: CONGR. BRÁS. GEOL.*, 33. Rio de Janeiro, 1984. *Anais*. Rio de Janeiro, SBG. v. **8**, p. 3926-3940.

- Kotschoubey, B. 1988. Geologia do Alumínio. In: BRASIL/ MME-DNPM. Principais Depósitos Minerais do Brasil. Brasília DNPM/CVRD. v. **3**, p. 599-619.
- Kotschoubey, B., Trukenbrodt, W., Hieronymus, B. 1997. Bauxite deposits of Paragominas. In: Carvalho, A., Boulangé, B., Melfi, A.J., Lucas, Y. (Eds.), Brazilian Bauxites. 1rd Ed., USP/FAPESP/ORSTOM, São Paulo, p.75-106.
- Kotschoubey, B; Truckenbrodt, W; Calaf J.M.C. 2005. Evolução geológica da porção meridional da Província Bauxitífera de Paragominas durante o Neógeno/Pleistoceno (noroeste da BACIA DO GRAJAÚ, nordeste do Pará e extremo oeste do Maranhão) *Revista Brasileira de Geociências*, v. **35** (2), p. 263-272.
- Kotschoubey, B., Calaf, M.J.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, Noroeste da Bacia do Grajaú, Nordeste do Pará/Oeste do Maranhão. In: O. J. Marini, E. T. Queiroz & B. W. Ramos (eds.) – Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. CT-MINERAL/FINEP, ADIMB. 2005a. Brasília-DF. P: 691-782.
- Kronberg, B., Fyfe, W.S., Mckinnon, B.J., Couston, J.E.C., Stilliandi Filho, B.; Nash, R.A. 1982. *A model for bauxite formation (Paragominas, Brazil)*. *Chem. Geol.* v. **35**, p. 311-320.
- 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*, n. **105**, 137–152.
- Mameli, P., Mongelli, G., Oggiano, G., Dinelli, E. 2007. Geological, geochemical and mineralogical features of some bauxite deposits from Nurra (Western Sardinia, Italy): insights on conditions of formation and parental affinity. *International Journal of Earth Sciences* n. 96, p. 887–902.
- Macleán, W., Bonavia, F., Sanna, G. 1997. Argillite debris converted to bauxite during karst weathering: evidence immobile element geochemistry at the Olmedo Deposit Sardinia. *Mineralium deposita*, v. **32**, p. 607 – 616.
- McLennan, S. M., Nancy, W. B., Taylor, R. 1980. Rare earth element-thorium correlation in sedimentary rock, and the composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **44**:1833-1839.

- Monteiro D.N.C. et al. 2007. A caulinita de perfis intempéricos sobre a Formação Alter do Chão – Estudo de difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de infravermelho e termogravimétrica. *Contribuições à Geologia da Amazônia*. v. **5**. p. 135 – 142.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites: *Nature*. v. **299**. p. 715 - 717.
- Oliveira, F.S., Varajão, A.F.D.C., Varajão, C.A.C., Boulangé, B., Soares, C.C.V. 2013. Mineralogical, micromorphological and geochemical evolution of the facies from the bauxite deposit of Barro Alto, Central Brazil. *Catena* **105**, 29-39.
- Peixoto, S. F., Horbe, A. M. C. 2008. Bauxitas do Nordeste do Amazonas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. **38 (2)**, p. 406-422.
- Pupin J.P. 1980. Zircon and granite petrology. Contribution to mineralogy and petrology, *Berlin/Heidelberg*, **73**. p. 207 - 220.
- Rossetti, D.F., W. Truckenbrodt. 1997. Classificação estratigráfica para o Albiano – Terciário inferior (?) na Bacia de São Luis, MA. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi – Série Ciências da Terra, v. 9, p. 31 - 43.
- Rossetti, D. F.2001. Interesse científico e econômico das rochas cretáceas. In: D.F Rossetti, A.M. Góes & W. Truckenbrodt (Eds.). *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Coleção Friedrich Katzer: p. 11-13.
- Sombroek, W.G. 1966. Amazona Soils. A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region. Wagenigen, Holland, *Centre for Agricultural. Publications. Document.*,292p.
- Tardy Y. 1993. *Pétrologie des latentes et des sois tropicaux*. Masson, Paris. **459** p.
- Tardy, Y., Roquim, C. 1998. Dérive des continents paléoclimats et altérations tropicales. Ed. BRGM, Orléans, France, 469p.
- Truckenbrodt, W., Kotschoubey, B. 1981. Argila de Belterra – Cobertura terciária das bauxitas amazônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. **11**, p. 203 – 208.
- Yu,W., Wang, R., Zhang, Q., Du, Y., Chen, Y., Liang, Y. 2014. Mineralogical and geochemical evolution of the Fusui bauxite deposit in Guangxi, South China:From the original Permian ore body to quarternary Salento-Type deposit. *Journal of Geochemical Exploration*, n.**146**, p.75-88.

# ANEXO

Anexo A – Seção esquemática da lavra piloto Ciriaco.

