



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 497

**GEOLOGIA, MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DO PERFIL
LATERITO-BAUXÍTICO DA LAVRA PILOTO DÉCIO
(RONDON DO PARÁ)**

Dissertação apresentada por:

PABLO HENRIQUE COSTA DOS SANTOS

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

BELÉM
2017

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

Santos, Pablllo Henrique Costa dos, 1991-
Geologia, mineralogia e geoquímica do perfil laterito-
bauxítico da lavra piloto Décio (Rondon do Pará) / Pablllo
Henrique Costa dos Santos. – 2017.

viii, 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, 2017.

1. Bauxita - Rondon do Pará (PA). 2. Intemperismo -
Rondon do Pará (PA). I. Título.

CDD 22. ed. 549.53098115



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

**GEOLOGIA, MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DO PERFIL
LATERITO-BAUXÍTICO DA LAVRA PILOTO DÉCIO
(RONDON DO PARÁ)**

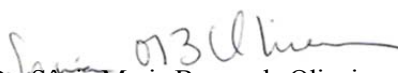
DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR
PABLO HENRIQUE COSTA DOS SANTOS

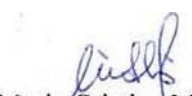
**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA.**

Data de Aprovação: 24/ 03 / 2017

Banca Examinadora:


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


Prof. Dr. Sônia Maria Barros de Oliveira
(Membro-USP)


Prof. Dr. Maria Cristina Motta de Tolledo
(Membro-USP)

À Deus,

Por ter me dado saúde e equilíbrio para enfrentar os momentos de dificuldade;

Aos meus pais, Vera Lúcia da Costa e José Raimundo dos Santos,

Por terem me preparado para os desafios da vida;

Por terem me proporcionado o acesso à educação;

Pelas palavras de incentivo;

Pelo amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Dr. Marcondes Lima da Costa, pela proposição do tema e por acreditar em meu potencial para desenvolvê-lo, assim como pelo esforço em proporcionar as ferramentas analíticas, os recursos financeiros e o conhecimento teórico, necessários ao desenvolvimento deste trabalho;

Ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pela da infraestrutura laboratorial e pelos recursos financeiros;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo provimento de bolsa de mestrado durante o primeiro ano do curso e pelo financiamento do Projeto Argila de Belterra (proc. 477.411/2012-6) e Grant do Orientador (proc. 304.519/2009-0).

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geociências na Amazônia (INCT-GEOCIAM) pelos recursos financeiros;

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

À Votorantin Metais por permitir o acesso à área do Projeto Alumina Rondon e pelo apoio durante as atividades de campo, em especial por parte dos geólogos Hécio Prazeres e Tereza Lee;

Aos integrantes do Grupo de Mineralogia e Geoquímica Aplicada (GMGA), em especial ao Prof. Marcondes Costa, Fernanda Sobrinho, Leonardo negrão, Daiveson Abreu, Prof.^a Rosemary Nascimento, Heliana Pantoja, Prof.^a Socorro Progene, Alessandro Leite, Glayce Jholy, Suyanne Flávia, Priscila Gozzi, Laís Aguiar, Aline Silva, Igor Barreto e Prof.^a Roseane Norat pelo auxílio e companheirismo nas atividades cotidianas.

RESUMO

Durante o Eoceno-Oligoceno, formaram-se na Amazônia extensas coberturas lateríticas. Nesse contexto, seqüências sedimentares das Bacias do Parnaíba e do Amazonas foram lateritizadas e geraram quatro depósitos de bauxita de classe mundial: Juruti, Trombetas, Paragominas e Rondon do Pará. Este último é a nova fronteira de exploração de bauxita da Amazônia e nela foi desenvolvida a lavra-piloto Décio, que expõe um perfil laterito-bauxítico de 3 m de espessura, o qual se estende lateralmente por vastos platôs com cerca de 350 m de altitude. Este trabalho buscou aprofundar o estudo das bauxitas e suas relações com a paisagem laterítica na região amazônica. Em campo, foram descritos cinco perfis litológicos expostos na lavra-piloto Décio. Em seguida, 42 amostras foram coletadas para análises laboratoriais que envolveram caracterização mineralógica (Difratometria de Raios X); textural (Microscopia Óptica e Eletrônica de Varredura); e química (Espectrometria de Massa e de Emissão Óptica, com Plasma Indutivamente Acoplado). As rochas precursoras mais prováveis são as fácies argilosas da Formação Itaipucu. Estas teriam evoluído para um horizonte argiloso bauxítico e em seguida para bauxita maciça microcristalina e microporosa, de cor vermelha. A bauxita, por sua vez, converge para crosta ferroaluminosa esferolítica, rica em óxi-hidróxido de ferro e parcialmente desmantelada. Este conjunto é recoberto por um horizonte de esferólitos ferroaluminosos e outro bauxítico nodular. Todo o conjunto é capeado por argila inconsolidada amarela a vermelha, equivalente à Argila de Belterra. Os minerais que resistiram ao intemperismo laterítico foram zircão, turmalina, rutilo, cianita e quartzo. Os neoformados foram hematita, goethita, gibbsita, parte da caulinita, além do anatásio. Os constituintes químicos principais são Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 e TiO_2 , que juntos compõem mais de 99,5 % do perfil. Sua distribuição sugere que a evolução laterítica desenvolvida *in situ* se deu até a formação do horizonte esferolítico. Os teores de TiO_2 são muito mais elevados no horizonte argiloso bauxítico que nos horizontes sobrejacentes, o que não é comum em uma evolução laterítica a partir de um protólito rochoso único e homogêneo. Além disso, Zr e ETR diminuem em direção ao topo do perfil, o que também não seria esperado. Portanto, embora as rochas precursoras de todo o perfil tenham sido sedimentares, havia um contraste composicional entre aquelas que geraram o HAB e as que geraram os demais horizontes. Além disso, o padrão de distribuição dos elementos-traço demonstra que mesmo partindo de protólitos ligeiramente diferenciados quase todo o perfil seguiu um padrão similar de evolução, com exceção do horizonte bauxítico nodular que se comporta como uma unidade a parte. Estas características diferenciam o perfil laterítico da lavra piloto Décio de outro perfil localizado na já estudada lavra piloto Ciríaco, também localizada em Rondon do Pará, pois este último foi formado a partir de protólito mais homogêneo que o primeiro.

Palavras-chave: Intemperismo; Bauxita; Depósito de classe mundial.

ABSTRACT

During the Eocene-Oligocene, extensive lateritic coverings were formed in the Amazon. In this context, the sedimentary sequences of the Parnaíba and the Amazon Basins were lateritized and generated four world-class bauxite deposits: Juruti, Trombetas, Paragominas and Rondon do Pará. The latter is the new bauxite exploration frontier of the Amazon and the Décio pilot mine was developed in it, which presents a 3 m thick laterite-bauxite profile, which extends laterally through vast plateaus with about 350 m of altitude. This work sought to deepen the study of bauxite and its relationships with lateritic landscape in the Amazon region. In the field, five lithological profiles were described in the Décio pilot mine. Then, 42 samples were collected for laboratory analysis involving mineralogical characterization (X-ray diffraction); textural (Optical Microscopy and Scanning Electronics); and chemical (Optical Emission Spectrometry and Mass Spectrometry with Inductively Coupled Plasma). The most probable precursor rocks are the clay facies of the Itapecuru Formation. These would have evolved to a bauxitic clay horizon and then to massive microcrystalline and microporous red bauxite. Bauxite, on the other hand, converges to spherolytic iron-rich crust, rich in iron oxide and partially dismantled. This set is covered by a horizon of ferroaluminous spherolites and a nodular bauxite horizon. The whole set is covered by unconsolidated yellow to red clay, equivalent to the Belterra Clay. The minerals that resisted laterite weathering were zircon, tourmaline, rutile, kyanite and quartz. The neoformed were hematite, goethite, gibbsite, part of the kaolinite, besides the anatase. The main chemical constituents are Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 and TiO_2 , which together make up more than 99.5% of the profile. Its distribution suggests that the lateritic evolution developed in situ occurred until the formation of the spherolithic horizon. The TiO_2 content is much higher in the bauxitic clay horizon than in the other overlying horizons, which is not common in a lateritic evolution from a single, homogeneous parent rock. In addition, Zr and ETR decrease towards the top of the profile, which would also not be expected. Therefore, although the precursor rocks of the entire profile were sedimentary, there was a compositional contrast between those that generated the bauxitic clay horizon and those that generated the other horizons. In addition, the pattern distribution of trace elements shows that even starting from slightly differentiated parent rocks, almost the entire profile followed a similar pattern of evolution, with the exception of the nodular bauxite horizon that behaves as separate unit. These characteristics differ the lateritic profile of the Décio and Ciríaco pilot mine, located in the same bauxite region, but formed from more homogeneous parent rocks.

Keywords: Weathering; Bauxite; World-class deposit.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.	Mapa geológico simplificado da Amazônia Oriental modificado de Bizzi et al, (2003) com a distribuição areal dos principais depósitos laterito-bauxíticos da região.....	6
Figura 2.	Geologia da Região Bauxitífera de Rondon do Pará, modificada de Vasconcelos et al. (2004a, 2004b), Bahia et al. (2004) e Faraco et al. (2004) com destaque para a localização da lavra piloto Décio.....	9
Figura 3.	A) Modelo Digital de Elevação da Região de Rondon do Pará, onde se verifica a distribuição dos principais platôs, delineados por amplos vales de drenagem dendrítica, e ainda a localização da lavra piloto Décio, no topo do Platô Rondon Sul. B) Paisagem típica da Região de Rondon do Pará, com a presença de um vale colinoso que tem ao fundo a encosta de um platô.....	11
Figura 4.	A) Localização das principais regiões que compõem a Província Bauxitífera Amazônica. B) Região Bauxitífera de Rondon do Pará, com indicação dos principais alvos de exploração e lavra da Votorantim Metais e localização da lavra piloto Décio. C) Imagem de satélite tendo em destaque a lavra piloto Décio, obtida através do Google Earth, acessado em 14 de outubro de 2016.....	12
Figura 5.	A) Localização dos perfis selecionados para amostragem na lavra piloto Décio. B) Detalhe do furo a trado manual para complementação do perfil quatro, com a amostragem do material que ocorre logo abaixo do limite inferior da lavra piloto, visando alcançar o horizonte argiloso subjacente.....	13
Figura 6.	A) Vista do interior da lavra piloto Décio, com indicação dos locais onde foram descritos os cinco perfis da figura aqui apresentados, que não incluem a cobertura. B) Sequência de horizontes identificada nos perfis laterito-bauxítico estudados na lavra piloto Décio.....	18
Figura 7.	A) Exposição do HAB em furo desenvolvido a partir do piso da lavra piloto Décio, entre 16,6 e 17,6 m de profundidade. B) Amostra do HAB coletada a 17,6 m de profundidade. C) Nódulo gibbsítico-caulinítico. D) Nódulo gibbsítico-caulinítico com manchas de oxi-hidróxidos de Fe. E) Fragmento da matriz argilosa do HAB, no qual se observa porções esbranquiçadas onde dominam gibbsita e caulinita, e áreas avermelhada onde, além destes minerais, também ocorre a hematita. F) Aspecto textural de fragmento do HAB em que se delinea denso empacotamento de cristalitos de contorno pseudo-hexagonal, provavelmente de caulinita e gibbsita, segundo imagens de MEV.....	20
Figura 8.	Constituição mineralógica do HAB obtida por DRX. A) Massa argilosa, dominada por caulinita, além de gibbsita, hematita e anatásio. B) Nódulos gibbsíticos com caulinita acessória. C) Nódulos porcelanados de igual composição mineral. D) Mineralogia das pontuações esbranquiçadas contidas na matriz argilosa, contendo apenas gibbsita e caulinita.....	31

- Figura 9. A) Exposição do HBX na rampa de acesso à lavra piloto Décio. Imagens do HBX obtidas via estereomicroscópio: B) Bauxita maciça composta por plasma de oxi-hidróxido de ferro associado à gibbsita mesocristalina e porcelanada; C) Nódulos hematíticos cimentados por hematita (cripto) + gibbsita (mesocristalina); D) Goethita aluminosa envolvendo esferólito de núcleo hematítico; E) Esferólito Al-goethítico envolvido por hematita (cripto) + gibbsita (mesocristalina). F) Composição mineralógica do HBX, obtida por DRX..... 23
- Figura 10. A) Esferólito bauxítico com zoneamento na distribuição dos oxi-hidróxidos de ferro. B e C) Cristais de gibbsita preenchendo cavidades em meio ao plasma de oxi-hidróxido de ferro que compõe os esferólitos. D) Cimentação no entorno dos esferólitos, composta por plasma ferruginoso entremeado por vênulas e bolsões gibbsíticos. E) Agregados de cristalitos tabulares de gibbsita. F) Goethita com hábito botrioidal revestindo cavidades do plasma que envolve os esferólitos. A e D – nicóis paralelos; B e C – nicóis cruzados..... 25
- Figura 11. A) Exposição da CFA na lavra piloto Décio. B) Amostra da CFA exibindo esferólitos com películas de goethita aluminosa e ainda cimentação microcristalina. C) Esferólito ferroaluminoso em que um núcleo de hematita e gibbsita é bordejado por goethita aluminosa. D) Esferólito em que o núcleo hematítico foi substituído quase integralmente por Al-goethita, e finalmente envolto por córtex de plasma hematítico. E) Composição mineralógica a CFA, obtida por DRX..... 27
- Figura 12. A) Cristais de gibbsita preenchendo cavidades internas aos esferólitos da CFA (nicóis cruzados). B) Cimentação que envolve os esferólitos, composta por mesocristais de gibbsita entremeados ao plasma de oxi-hidróxido de ferro (nicóis cruzados). C) Imagem de MEV dos mesocristais de gibbsita que junto com os oxi-hidróxidos de ferro cimentam os esferólitos da CFA. D) Análise de EDS, confirmando a composição química dos cristais de gibbsita no ponto indicado na imagem C..... 27
- Figura 13. A) Amostra típica da CFAD onde se observa blocos equivalentes à CFA invadida por Al-goethita, em matriz argilosa restrita, aparentemente em substituição a matriz gibbsítica. B) Detalhe da CFAD fragmentada coberta por material argiloso. C) Perfuração tubular promovida por raiz e preenchida por material fragmentado, resultante do dismantelamento da CFA, e agora representando a CFAD. D) Detalhe observado em lâmina delgada polida sob microscópio ótico (nicóis cruzados) de um a crosta ferroaluminosa dismantelada, em que se observa o domínio de plasma de oxi-hidróxido de ferro com inúmeras cavidades, em parte preenchidas com gibbsita. E) Composição mineralógica de um desses fragmentos de crosta da CFAD, obtida por DRX, em que predomina gibbsita, hematita, goethita, caulinita e ainda anatásio..... 29
- Figura 14. A) Imagem mostrando os contatos em campo entre CFAD e HEFA, HEFA e HBN, além deste com Argila de Belterra. B) Esferólitos ferroaluminosos isolados em que se observa as diferentes morfologias e a película argila envolvente. C) Aspecto microscópico da massa que constitui o interior do esferólito, em que plasma ferroaluminoso, com microcavidades, formado por gibbsita, além de hematita e caulinita. Nessas cavidades normalmente se encontram cristais de gibbsita. D) Mesocristais de gibbsita dessas cavidades. E) Composição mineralógica dos esferólitos do HEFA, obtida por DRX, mostrando o domínio de gibbsita, tendo hematita e caulinita restritos..... 31

Figura 15.	A) Contato do HBN com o HEFA e ABT. B) Amostra do HBN, composta por um agregado de nódulos bauxíticos, em que é possível observar o aspecto porcelanado, autocimentados e ainda parcialmente envoltos por matriz argilosa. C) Plasma gibbsítico no interior dos nódulos, vendo-se o aspecto porcelanado, ou maciço (nicóis paralelos). D) Vênulas e bolsões de gibbsita mesocristalina seccionando o plasma de gibbsita crisptocristalina (nicóis cruzados). E) Composição mineralógica de nódulos bauxíticos, obtida por DRX, em que se identifica gibbsita como preponderante, com caulinita e hematita restritos.....	33
Figura 16.	A) Cobertura argilosa com 12 m de espessura e seu contato ondulado com a sequência laterítica. B) Contato do HEFA com o HBN e deste com a ABT. C) Composição mineralógica da ABT a 10 m de profundidade obtida por DRX. D) Composição mineralógica da ABT a 4,5 m de profundidade obtida por DRX. E) Composição mineralógica da ABT a 0,8 m de profundidade obtida por DRX.....	35
Figura 17.	Distribuição mineral obtida por estequiometria para os perfis 3 (A) e 4 (B), expostos na lavra piloto Décio.....	36
Figura 18.	A) Distribuição dos teores dos elementos químicos principais (em óxidos) do perfil 3. B) Distribuição dos teores dos elementos químicos principais (em óxidos) do perfil 4. Apenas no perfil 4 foi amostrado e analisado o HAB.....	40
Figura 19.	Distribuição das concentrações dos elementos-traço normalizados pela média da crosta superior da Terra (A) e pelo HAB (B).....	41
Figura 20.	Diagramas de dispersão mostrando a afinidade do ferro com alguns elementos traço e correlação negativa com o alumínio: A) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{V}$; B) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{Mo}$; C) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{As}$; D) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{Pb}$; E) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{Hg}$; F) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{Sb}$; G) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{Zn}$; H) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{Al}_2\text{O}_3$	42
Figura 21.	Figura 21. Diagramas de dispersão mostrando a afinidade do zircônio com alguns elementos traço e com o titânio: A) $\text{Zr} \times \text{Hf}$; B) $\text{Zr} \times \text{Nb}$; C) $\text{Zr} \times \text{Ta}$; D) $\text{Zr} \times \text{Y}$; E) $\text{Zr} \times \sum \text{ETR}$; F) $\text{Zr} \times \text{TiO}_2$	44
Figura 22.	Padrão de distribuição dos ETR por horizonte do perfil laterítico da lavra piloto Décio: A) normalizado pelos condritos analisados por Evensen <i>et al.</i> (1978). B) Normalizados pela média crustal de Wedepohl (1995). C) Normalizados pelo HAB.....	46
Figura 23.	Morfologias de zircão, turmalina, rutilo e cianita identificadas no perfil laterito-bauxítico da lavra piloto Décio (nicóis paralelos) e na cobertura, Argila de Belterra.....	48
Figura 24.	Distribuição da frequência dos minerais pesados não opacos no perfil laterito-bauxítico da lavra piloto Décio e sua cobertura.....	49
Figura 25.	Imagens de MEV (elétrons secundários) dos zircões arredondados, os mais abundantes no perfil laterito-bauxítico da lavra piloto Décio. A e B) zircões do horizonte argiloso bauxítico. C e D) Zircões do horizonte bauxítico. E e F) Zircões da crosta ferroaluminosa. G e H) Zircões da crosta ferroaluminosa desmantelada. I e J) Zircões do horizonte esferolítico ferroaluminoso (matriz argilosa). K) Zircões do horizonte bauxítico nodular (matriz argilosa). L) Zircões da Argila de Belterra. 1 – Fratura conchoidal. 2 – Superfície de abrasão.	50

Figura 26.	Imagens de MEV (elétrons secundários) dos zircões angulosos a subangulosos, respectiva possível morfologia dos cristais originais e sua equivalência a classificação de Pupin (1980). A e B) Zircões do horizonte argiloso bauxítico. C e D) Zircões do horizonte bauxítico. E e F) Zircões da crosta ferroaluminosa. G) Zircões da crosta ferroaluminosa desmantelada. H) Zircões do horizonte esferolítico ferroaluminoso (matriz argilosa). I, J e K) Zircões do horizonte bauxítico nodular (matriz argilosa). L e M) Zircões da Argila de Belterra. 1 – Fratura conchoidal. 2 – Arestas abauladas.....	51
Figura 27.	Imagens de MEV (elétrons secundários) das principais variedades de turmalina, rutilo e cianita. A e B) Turmalinas do HAB. C e D) Turmalinas do HBX. E e F) Turmalinas da CFA. G e H) Turmalinas do HEFA (matriz argilosa). I e J) Turmalinas do HBN. K e L) Turmalinas da ABT. M e N) Rutilos do HEFA (matriz argilosa). O e P) Cianitas do HBN (matriz argilosa). 1 – Fratura conchoidal. 2 – cavidades. 3 – Fraturas. 4 – Estrias. 5 – Clivagem.....	53
Figura 28.	A) Intensidade da lateritização em cada horizonte, de acordo com Schellmann (1983). B) Classificação dos horizontes do perfil laterítico da lavra piloto Décio baseada nos teores de Fe_2O_3 , SiO_2 e Al_2O_3 segundo Bardossy (1982).....	54
Figura 29.	Análise de grupamento dos elementos que compõem o perfil laterito-bauxítico da lavra piloto Décio.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Limites mínimos e máximos de detecção dos métodos empregados para determinação da composição química total (Acme Analytical Laboratories). Os elementos Ba, Co, Cu, Nb, Ni, Sc, Sr, Y, Zn, Zr quando não detectados por ICP-OES, foram analisados por ICP-MS.....	16
Tabela 2.	Tabela 2. Composição química total do perfil laterítico bauxítico da lavra piloto Décio. Os teores de CaO e Na ₂ O (< 0,01%); de Ni (< 20 ppm); de Cd e Tl (< 0,1 ppm), estão abaixo do limite de detecção; (1) Composição média da Crosta Terrestre segundo Wedepohl (1995).....	38
Tabela 3.	Aspectos geológicos, mineralógicos e químicos do perfil laterito-bauxítico da lavra piloto Décio confrontados com outros depósitos da Região Bauxitífera de Rondon do Pará (Ciríaco e Branco) e da Província Bauxitífera Amazônica (Paragominas e Juruti); as informações destacadas em itálico e negrito são aquelas que diferem do depósito Décio; os teores de Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , PF, SiO ₂ e TiO ₂ referem-se exclusivamente aos horizontes bauxíticos (HB); o símbolo (-) designa informações não disponíveis.....	58

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 JUSTIFICATIVA	1
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 Objetivos gerais	2
1.3.2 Objetivos específicos	3
2 ASPECTOS GEOLÓGICOS E FISIOGRÁFICOS	4
2.1 A PROVÍNCIA BAUXITÍFERA AMAZÔNICA	4
2.2 REGIÃO BAUXITÍFERA DE RONDON DO PARÁ	7
2.2.1 Litoestratigrafia	7
2.2.1.1 Bacia do Grajaú	7
2.2.1.1.1 Formação Itapecuru.....	7
2.2.1.1.2 Formação Ipixuna.....	8
2.2.1.2. Cobertura Laterítica	8
2.2.2 Argila de Belterra	10
2.2.3 Relevo	10
2.2.4 Clima e vegetação	11
2.2.5 Localização da lavra piloto Décio	12
3 MATERIAIS E MÉTODOS	13
3.1 AMOSTRAGEM	13
3.2 ANÁLISES MESOSCÓPICAS, MINERALÓGICAS E QUÍMICAS.....	13
4 RESULTADOS.....	17
4.1 A SUCESSÃO LATERITO-BAUXITICA E SUA COBERTURA	17

4.1.1 Horizonte Argiloso Bauxítico (HAB)	19
4.1.2 Horizonte Bauxítico (HBX)	22
4.1.3 Crosta Ferroaluminosa (CFA)	26
4.1.4 Crosta Ferroaluminosa Desmantelada (CFAD)	28
4.1.5 Horizonte Esferolítico Ferroaluminoso (HEFA)	30
4.1.6 Horizonte Bauxítico Nodular (HBN)	32
4.1.7 Cobertura Argilosa ou Argila de Belterra (ABT)	34
4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA, MINERALOGIA ESTEQUIOMÉTRICA E SUA DISTRIBUIÇÃO NO PERFIL LATERITO-BAUXÍTICO	36
4.2.1 Elementos Maiores	36
4.2.2 Elementos-traço	40
4.2.3 Elementos Terras Raras	44
4.3 OS MINERAIS PESADOS DO PERFIL LATERÍTICO E DA COBERTURA ABT	47
5 DISCUSSÕES	54
6 CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS	60
ANEXOS	65
ANEXO A. AMOSTRAS DO HORIZONTE BAUXÍTICO	66
ANEXO B. AMOSTRAS DA CROSTA FERROALUMINOSA	67
ANEXO C. MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE ELEMENTOS MAIORES E TRAÇO DO PERFIL LATERÍTICO DA LAVRA PILOTO DÉCIO	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O Brasil produziu em 2015 cerca de 35.000 Mt de bauxita e atualmente suas reservas são da ordem de 2.600.000 Mt (USGS 2016). Os principais depósitos brasileiros deste bem mineral estão concentrados no Pará. São eles: Trombetas, Paragominas, Juruti e Rondon do Pará os quais compõem parte da chamada Província Bauxitífera Amazônica, mundialmente conhecida por suas grandes reservas e produção.

Segundo Costa *et al.* (2014), os principais depósitos da Província Bauxitífera Amazônica se formaram a partir da lateritização de sequências sedimentares cretáceas da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas (Trombetas e Juruti), assim como das Formações Itapecuru e Ipixua, Bacia do Grajaú (Paragominas). Este evento laterítico teria ocorrido ao longo do Paleoceno-Eoceno e seus produtos, retrabalhados durante o Mioceno.

Ocorrências de bauxitas na região amazônica são relatadas desde 1903 por Katzer. Porém, as pesquisas acadêmicas se iniciaram apenas na década de 1970, acompanhando o início dos trabalhos de exploração mineral, particularmente intensivos nesse período. Merecem destaque Kotschoubey & Truckenbrodt (1981) e Kotschoubey *et al.* (1987), que propuseram a natureza polifásica dos depósitos da região de Paragominas-Açailândia; e Truckenbrodt & Kotschoubey (1981) que investigaram natureza ainda controversa das coberturas terciárias das bauxitas da Amazônia (Argila de Belterra). Por sua vez, Costa (1991) descreveu a estruturação dos perfis lateríticos da Amazônia, classificando-os como maduros (terciários) e imaturos (quaternários); e Horbe (2005) identificou a afinidade geoquímica entre as crostas lateríticas e solos amazônicos.

Ao longo desse período, depósitos de bauxita entraram em lavra nas regiões de Trombetas, Paragominas e Juruti, o que incentivou e viabilizou novas pesquisas visando principalmente caracterizar os depósitos e comparar sua estruturação e modo de ocorrência com as de outras áreas da Província Amazônica. Nesse sentido, Boulangé & Carvalho (1997) estudaram os depósitos de Trombetas; Kotschoubey *et al.* (1997), Kotschoubey *et al.* (2005) e Cruz (2011) investigaram os jazimentos de Paragominas; e Lucas (1997) e Costa *et al.* (2014) estudaram os perfis lateríticos de Juruti.

Na região de Rondon do Pará, os primeiros trabalhos exploratórios ocorreram entre 1974 e 1980, pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA). Porém, desde este período até metade dos anos 2000, as pesquisas ficaram paralisadas. Em 2005 a prospecção mineral foi retomada pela Votorantim Metais, que hoje detém 13 títulos minerários distribuídos em dois platôs: Rondon Norte e Rondon Sul, que juntos ocupam aproximadamente 100.000 ha (Prazeres Filho *et al.* 2016).

O avanço da prospecção mineral em Rondon do Pará viabilizou os primeiros trabalhos acadêmicos voltados especificamente aos perfis laterito-bauxíticos desta região. Pantoja (2015) demonstrou a afinidade do perfil bauxítico da lavra piloto Ciríaco com as sequências sedimentares da Formação Itapecuru e Argila de Belterra, sua cobertura. Já Oliveira *et al.* (2016) caracterizaram os depósitos como a nova fronteira de exploração de bauxita na Amazônia. Ambos os trabalhos enfatizaram a necessidade de novos estudos para complementar modelo genético laterítico proposto. Além de Ciríaco, ainda há outras duas lavras piloto em Rondon do Pará, denominadas Décio e Branco, que constituem excelentes oportunidades para estudo da geologia e geoquímica dos perfis lateríticos nelas aflorantes.

1.2 JUSTIFICATIVA

A Região Bauxitífera de Rondon do Pará possui grande extensão, mas poucas exposições. Isto tem dificultado em parte a realização de estudos acadêmicos dedicados a estes depósitos. O conjunto de trabalhos já desenvolvidos ainda não foi suficientemente abrangente para a definição de um modelo genético regional. Logo, existe a necessidade de mais pesquisas, a fim de verificar as características geológicas, mineralógicas e geoquímicas de zonas ainda não estudadas da Província. Isto tem sido viabilizado recentemente por parcerias das universidades com empresas de exploração mineral, que tem permitido o acesso à suas lavras piloto para fins acadêmicos, como é o caso da lavra piloto Décio.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos gerais

Este trabalho busca expandir o conhecimento sobre a Província Bauxitífera de Rondon do Pará, através do estudo da nova exposição proporcionada pela lavra piloto Décio e verificar a afinidade deste depósito com outros já estudados na região de Rondon do Pará e na Amazônia. Com isso, espera-se tornar mais abrangente o

conhecimento sobre esta ampla região bauxitífera e seu zoneamento faciológico, e principalmente a sua filiação com as rochas sedimentares da Formação Itapecuru e relação com a cobertura Argila de Belterra.

1.3.2 Objetivos específicos

Entender os processos que levaram à individualização dos horizontes e a relação genética e temporal entre os mesmos; propor a origem dos distintos aspectos texturais e variações faciológicas característicos de cada horizonte; estabelecer a compartimentação química do perfil e sua relação com a distribuição dos minerais neoformados e resistatos; identificar ou interpretar as rochas precursoras.

2 ASPECTOS GEOLÓGICOS E FISIOGRÁFICOS

2.1 A PROVÍNCIA BAUXITÍFERA AMAZÔNICA

A região amazônica abriga os principais depósitos de bauxita do Brasil, localizados em Trombetas (Boulangé & Carvalho 1997); Paragominas (Kotschoubey *et al.* 1997, Cruz 2011, Kotschoubey *et al.* 2005); Juruti (Lucas 1997, Costa *et al.* 2014); e Rondon do Pará (Pantoja 2015, Oliveira *et al.* 2016). Estes abrigam as três principais minas, que representam 85 % da produção nacional. Há ainda perspectiva, embora no momento, tenha ficado mais remota, de que entre em operação uma nova mina, no recém-avaliado depósito de Rondon do Pará de propriedade da Votorantim Metais S/A. A produção atual de bauxita na Amazônia alimenta as principais refinarias de alumina e alumínio do País, situadas em Barcarena-PA e São Luiz-MA e, em parte, é exportada *in natura*.

Outros importantes depósitos dessa região são Pitinga, ao norte do Estado do Amazonas; Carajás, no sul do Pará; um conjunto de pequenos platôs, morros e ilhas, distribuídos pela região costeira do Pará; além de depósitos menos conhecidos nas regiões de Faro, Terra Santa, Curuá e Almerim (Figura 1).

A Formação Alter do Chão da Bacia do Amazonas é o substrato geológico dos depósitos de Trombetas (Boulangé & Carvalho 1997) e de Juruti (Lucas 1997; Costa *et al.* 2014). Já a Formação Itapecuru da Bacia do Grajaú representa o embasamento dos depósitos de Paragominas (Cruz 2011) e de Rondon do Pará (Pantoja 2015). As bauxitas do Pitinga derivaram de rochas graníticas (Horbe & Anand 2011). Em Carajás as mesmas se originaram a partir de basaltos e sequências sedimentares proterozóicas (Negrão & Costa 2012). Já os depósitos litorâneos do nordeste do Pará são derivados de rochas metamórficas aluminossilicatadas (Costa 1980, Oliveira & Costa 1984, Costa 1990, Leite 2014, Santos *et al.* 2016).

Os perfis laterito-bauxíticos da Província Amazônica, notadamente os dos depósitos de classe mundial de Paragominas, Juruti e Trombetas, são primordialmente constituídas de gibbsita, o principal mineral de alumínio, sendo boehmita acessória ou rara. Ocorrem ainda hematita; goethita; caulinita; quartzo; e anatásio, onipresente, sempre abaixo de 4 % (Costa 2016). São em geral bauxitas ricas em alumina

aproveitável, com baixo teor de sílica reativa, mas com teores de Fe_2O_3 variáveis, algumas muito ricas em ferro (Costa *et al.* 2014).

As bauxitas destas três regiões se assemelham quanto ao modo de ocorrência (em platôs) e pela similar sucessão de horizontes. A base do corpo mineralizado é normalmente constituída por bauxita maciça microcristalina e microporosa, de cor rosa, creme a vermelha, que tem ao topo bauxita nodular criptocristalina, por vezes porcelanada, de cor rosa creme, em que os nódulos centimétricos são envoltos por material argiloso; ou então em que a bauxita maciça converge para crosta brechóide a nodular, rica em oxi-hidróxido de ferro, e esta por sua vez converge para zona esferolítica ferruginosa e bauxita nodular (Costa 2016). As altitudes variam de 100 a 600 m. Outra semelhança é o capeamento por argila amarela a vermelha inconsolidada, denominada Argila de Belterra (Truckenbrodt & Kotschoubey 1981).

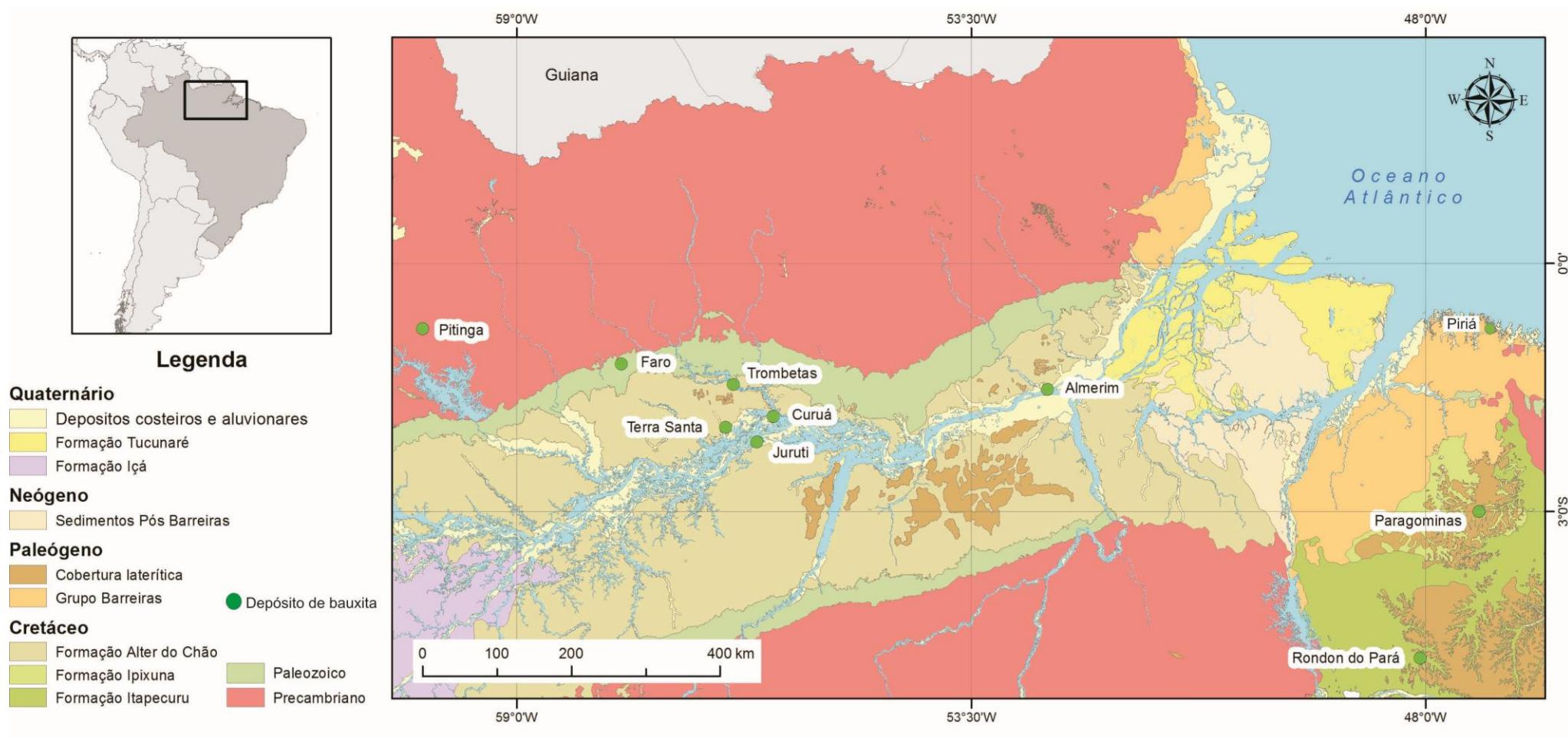


Figura 1. Mapa geológico simplificado da Amazônia Oriental modificado de Bizzi *et al.* (2003) com a distribuição areal dos principais depósitos laterito-bauxíticos da região.

2.2 REGIÃO BAUXITÍFERA DE RONDON DO PARÁ

A área de trabalho está inserida no contexto geológico da Região Bauxitífera de Rondon do Pará, na porção leste do Estado do Pará e oeste do Maranhão, Amazônia Oriental, e ocupa a porção noroeste da Bacia do Grajaú e a parte meridional da Plataforma Bragantina.

As pesquisas minerais desenvolvidas na região de Rondon do Pará se iniciaram uma década depois daquelas realizadas em Paragominas. Os primeiros trabalhos exploratórios ocorreram entre 1974 e 1980, pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA). As pesquisas, no entanto, somente foram retomadas em 2005, através da Votorantim Metais S/A, que hoje detém 13 títulos minerários distribuídos nos platôs Rondon Norte e Rondon Sul. Os teores de Al_2O_3 aproveitável variam de 52,4% no horizonte bauxítico a 39,9% na crosta ferroaluminosa, os teores de Fe_2O_3 variam de 14,8% no bauxítico a 35,1% na ferroaluminosa e a sílica reativa de 4,33% no horizonte bauxítico a 3,1% na crosta ferroaluminosa (Oliveira *et al.* 2016).

2.2.1 Litoestratigrafia

A estratigrafia da Região de Rondon do Pará tem em sua base as sequências sedimentares da Formação Itapecuru, que afloram nos vales entre os platôs. Sobre esta unidade, ocorrem perfis laterito-bauxíticos com no mínimo 4 m de espessura, parcialmente expostos nas lavras piloto Ciríaco e Branco (Platô Rondon Norte); e Décio (Platô Rondon Sul). No topo desta sucessão ocorre um pacote argiloso inconsolidado com aproximadamente 12 m de espessura.

2.2.1.1 Bacia do Grajaú

Os depósitos de bauxitas tanto de Paragominas como de Rondon do Pará se distribuem sobre área de domínio da Formação Itapecuru e/ou Ipixuna, daí porque a geologia regional se concentrará principalmente sobre estas unidades e as sucessoras (Figura 2).

2.2.1.1.1 Formação Itapecuru

É constituída por arenitos em camadas de espessura métrica ou em corpos lenticulares, bem como camadas de pelitos (folhelhos), depositados em condições deltaicas, sob influência de marés e tempestades (Rossetti 2001). Essa sequência mostra natureza transgressiva, indicada por estratificações cruzadas *swaley*, *hummocky*,

acanalada, tabular, *mud couplets* e escorregamento de massa (Vaz *et al.* 2007). Esses autores atribuem idade mesoalbiana-neocretácea à Formação Itapecuru.

2.2.1.1.2 Formação Ipixuna

A Formação Ipixuna é composta por arenitos caulínicos com estratificação cruzada, intercalados com argilitos vermelhos a esbranquiçados (Kotschoubey *et al.* 1996), depositados sobre a Formação Itapecuru. Santos Jr. & Rossetti (2003) atribuem ambiente estuarino com influência de tempestade, de idade cretácea a terciária a esta Unidade. Costa *et al.* (2009) demonstraram a origem laterítica dos caulins e arenitos caulinizados pertencentes à Formação Ipixuna.

2.2.1.2 Cobertura Laterítica

A cobertura laterítica na região de estudo, como já mencionado, mostra forte relação com as formações sedimentares citadas anteriormente. Segundo Góes (1995), durante o Paleógeno, a região meridional da Bacia do Grajaú permaneceu livre de sedimentação. Nesse cenário, formou-se ampla cobertura laterítica ferruginosa e bauxítica sobre as sequências sedimentares de ambiente continental das Formações Itapecuru e Ipixuna, das quais as atuais ocorrências de perfis lateríticos seriam testemunhos reliquiais. Esta cobertura possui expressão regional e é sustentada pelas Formações Itapecuru e Ipixuna na região de Paragominas segundo Kotschoubey *et al.* (2005).

Pantoja (2015), Prazeres Filho *et al.* (2016) e Oliveira *et al.* (2016) demonstraram que a Cobertura Laterítica, até então registrada apenas na região de Paragominas, também está presente, mais a sul, no domínio do município Rondon do Pará (Figura 2). Neste local, os mesmos autores descrevem uma sucessão de baixo para cima composta por horizonte argiloso bauxítico, bauxita maciça, crosta ferroaluminosa, crosta ferroaluminosa dismantelada, horizonte esferolítico e horizonte bauxítico nodular. Todo o conjunto é capeado por 12 a 15 m de argila ocre, correspondente a Argila de Belterra.

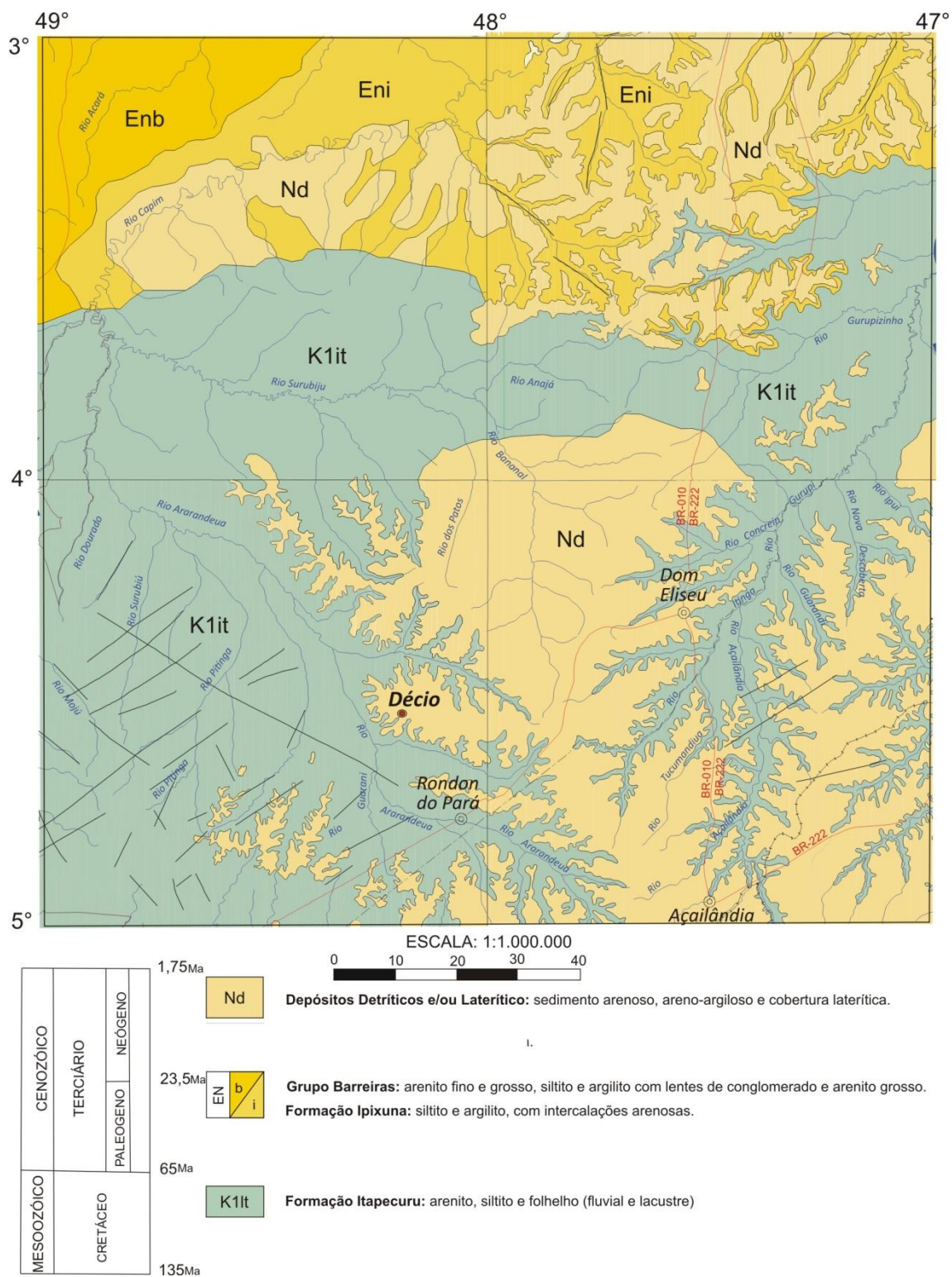


Figura 2. Geologia da Região Bauxitífera de Rondon do Pará, modificada de Vasconcelos *et al.* (2004a, 2004b), Bahia *et al.* (2004) e Faraco *et al.* (2004) com destaque para a localização da lavra piloto Décio.

2.2.2 Argila de Belterra

O termo Argila de Belterra foi empregado por Sombroek (1966) para descrever um pacote argiloso de cobertura, com até 20 m de espessura, tipo latossolo amarelo, bem drenado e profundamente lixiviado, que ocorre nas proximidades da região homônima. Hoje se sabe que esta Unidade se estende amplamente por diversas regiões da Amazônia.

Vários autores propuseram diferentes interpretações para a gênese da Argila de Belterra. O próprio Sombroek (1966) a interpretou como um depósito lacustre formado a partir de sedimentos andinos. Mais tarde, Klammer (1971) interpretou-a como sendo a parte superior do Grupo Barreiras. Por sua vez, Wolf & Silva (1973) propuseram que a Argila de Belterra representa o produto de um processo pedogenético a partir da própria sequência bauxítica; e Grubb (1979) destaca evidências de transporte e deposição da argila, além de forte relação com os perfis laterito-bauxíticos que estão em sua base.

Truckenbrodt & Kotschoubey (1981) e Horbe & Costa (1999, 2005) sugeriram que a Argila de Belterra seja resultante da decomposição química de crostas lateríticas subjacentes, uma vez que a mesma é sempre a cobertura dos grandes depósitos laterito-bauxíticos da Amazônia, com os quais guarda forte relação mineralógica e química. Esta hipótese foi apresentada novamente por Truckenbrodt *et al.* (1991), que também defendeu duas outras possibilidades como prováveis: retrabalhamento *in situ* do substrato a partir da ação de térmitas e deposição de sedimentos argilosos, com posterior intemperização, formando espesso latossolo. Esta última ideia foi defendida também por Truckenbrodt *et al.* (1995).

2.2.3 Relevo

No município de Rondon do Pará ocorrem os Baixos Platôs da Bacia do Parnaíba (Dantas & Teixeira 2013). Esta unidade de relevo consiste em superfícies tabulares bruscamente delimitadas em rebordos erosivos por amplos vales de fundo chato, com desnivelamentos locais entre 50 e 100 m. Tais superfícies são sustentadas por espessos perfis lateríticos maduros, ferroaluminosos, sendo que as couraças ferruginosas retardam o processo de erosão. Os extensos platôs apresentam altitude média de 350 m e desnivelamento local de 50 a 150 m (Figura 3A). Essas formas de relevo são delimitadas erosivamente por drenagem dendrítica que origina amplos vales colinosos (Figura 3B).

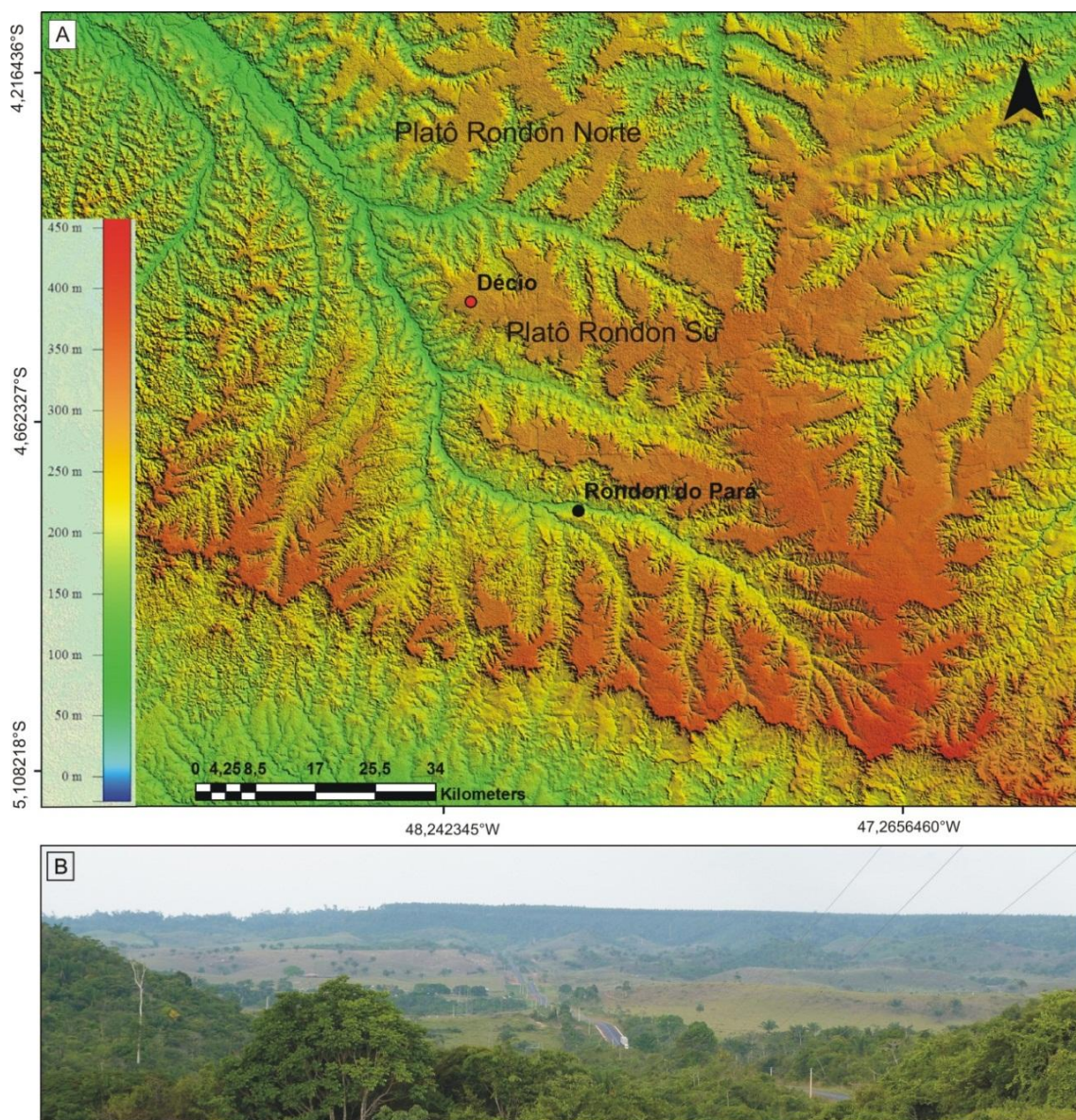


Figura 3. A) Modelo Digital de Elevação da Região de Rondon do Pará, onde se verifica a distribuição dos principais platôs, delineados por amplos vales de drenagem dendrítica, e ainda a localização da lavra piloto Décio, no topo do Platô Rondon Sul. B) Paisagem típica da Região de Rondon do Pará, com a presença de um vale colinoso que tem ao fundo a encosta de um platô.

2.2.4 Clima e vegetação

As condições climáticas reinantes na região de domínio do município de Rondon do Pará são tropicais (quente e úmido) com dois períodos bem distintos de precipitação pluviométrica. Um chuvoso, que se estende de janeiro a maio, com precipitação em torno de 2050 a 2450 mm, e outro, de junho a dezembro, com chuvas ocasionais, e temperatura anual que oscila entre 23,5°C e 26,9°C (INMET 2016).

No município de Rondon do Pará extensas áreas de florestas densas foram desmatadas visando a formação de pastos para criação de gado, de forma intensiva. Essa cobertura ainda se encontra em áreas isoladas e é representada por Floresta Equatorial

Subperenifolia (EMBRAPA 1988). As áreas desmatadas e não ocupadas por pastos ou campos agrícolas são gradativamente substituídas por capoeira latifoliada, enquanto nas várzeas, situadas ao longo das drenagens, ocorre floresta equatorial higrófila, composta por espécies de porte mediano, com madeiras moles, sem valor comercial (EMBRAPA 2003).

2.2.5 Localização da lavra piloto Décio

A parte central da lavra piloto Décio está localizada pelas coordenadas $4^{\circ} 30' 28,362''$ de latitude sul e $48^{\circ} 12' 28,832''$ de longitude oeste, no município de Rondon do Pará. A sede do município de Rondon dista 570 km da capital, Belém, com a qual é interligada por rodovias federais pavimentadas (BR-316, BR-010 e BR-222). Já a lavra piloto estudada está a 33 km dessa sede, nas proximidades da Vila Santa Lúcia. (Figura 4C).

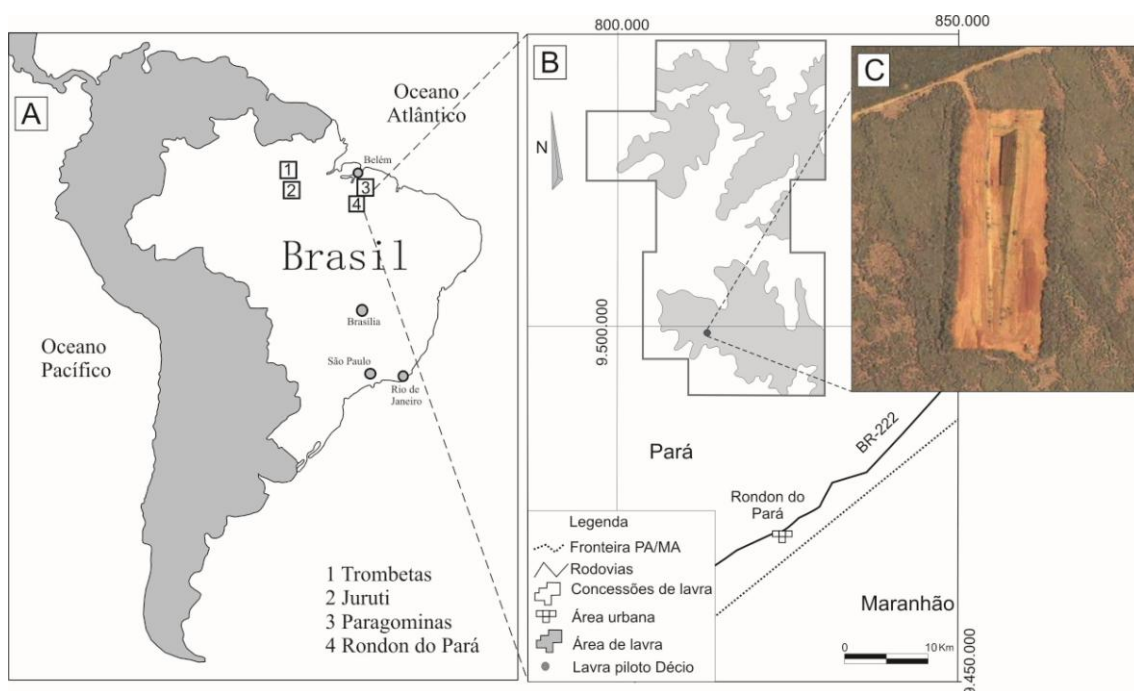


Figura 4. A) Localização das principais regiões que compõem a Província Bauxitífera Amazônica. B) Região Bauxitífera de Rondon do Pará, com indicação dos principais alvos de exploração e lavra da Votorantim Metais e localização da lavra piloto Décio. C) Imagem de satélite tendo em destaque a lavra piloto Décio, obtida através do Google Earth, acessado em 14 de outubro de 2016.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 AMOSTRAGEM

A lavra piloto Décio tem 50 m de comprimento, 10 m de largura e atinge até 16,6 m de profundidade. As bancadas são de 1m de altura e 1 m de largura. Os trabalhos de campo foram dedicados à descrição de três seções geológicas referentes às paredes laterais e frontal da bancada inferior da lavra piloto. Posteriormente, foram selecionados cinco perfis de amostragem (Figura 5A), nos quais se coletaram 48 amostras. Com trado manual se estendeu em profundidade o perfil quatro, com quatro amostras coletadas (Figura 5B).

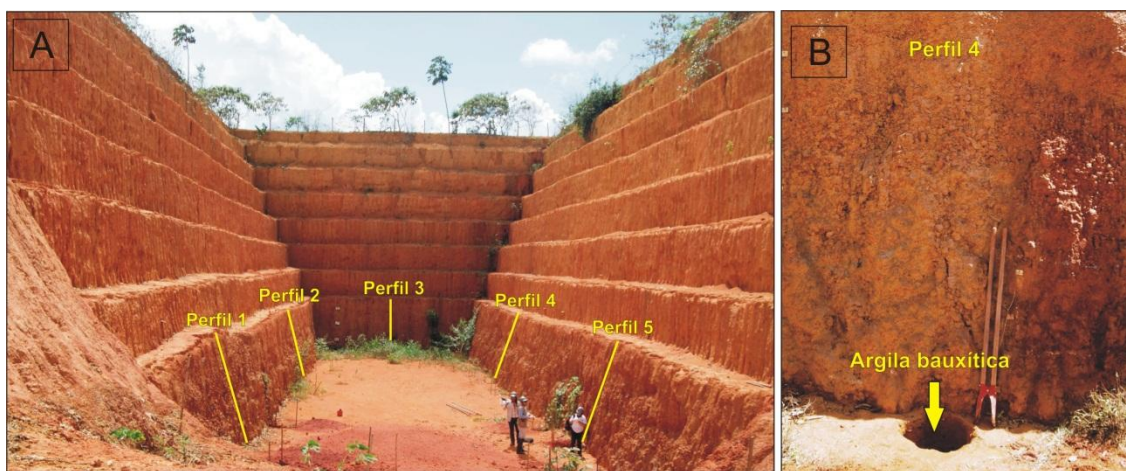


Figura 5. A) Localização dos perfis selecionados para amostragem na lavra piloto Décio. B) Detalhe do furo a trado manual para complementação do perfil quatro, com a amostragem do material que ocorre logo abaixo do limite inferior da lavra piloto, visando alcançar o horizonte argiloso subjacente.

3.2 ANÁLISES MESOSCÓPICAS, MINERALÓGICAS E QUÍMICAS

Para a descrição macroscópica da amostragem empregou-se a carta de Munsell Soil Color Charts 2000, Revised Washable Edition. Em seguida foram selecionados vinte fragmentos de material laterítico para confecção de lâminas polidas (Laboratório de Laminação – Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – IG/UFPA). A porção restante foi cominuída, via britador de mandíbulas e *shatter box* e quarteada (Oficina de Preparação de Amostras – IG/UFPA). Em seguida, uma alíquota de 20 g dessa massa cominuída foi pulverizada em gral de ágata para as análises mineralógicas e químicas.

Para o estudo dos minerais pesados, realizou-se a cominuição de 150 g de amostras de cada horizonte através de britador de mandíbulas e *shatterbox* durante 2 segundos (Oficina de Preparação de Amostras – IG/UFPA). O material triturado foi posteriormente peneirado para seleção das frações areia fina e muito fina, que são de

maior interesse para o estudo de minerais pesados. Para isso, utilizaram-se peneiras com aberturas 250 μm , 125 μm , 63 μm . Em função da elevada quantidade de argila, o peneiramento ocorreu em parte via úmido, com a utilização de cuba de ultrassom paradispersão do material.

As frações areia fina e muito fina passaram por concentração de minerais pesados através de líquido denso (bromofórmio) no Laboratório de Sedimentologia (IG/UFPA). O concentrado de minerais pesados passou por separação magnética (com o uso de um ímã manual), para concentração dos minerais não magnéticos, que normalmente correspondem aos minerais pesados transparentes.

Após o processo de concentração, os minerais pesados transparentes foram encaminhados para a confecção de lâminas delgadas que permitiram sua identificação e quantificação em microscópio ótico. Uma pequena alíquota deste concentrado foi selecionada através do estereomicroscópio e condicionada em porta-amstras que seguiram para as análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Os aspectos micromorfológicos foram observados inicialmente através de estereomicroscópio Leica EZ4 D com câmera CMOS 3.0 megapixel incorporada. Em seguida, se utilizou microscópio petrográfico LEICA DM 2700 P com câmera LEICA MC 170 HD acoplada (Laboratório de Gemologia - IG/UFPA) para a investigação em lâminas polidas.

A morfologia dos cristais foi observada via MEV Zeiss modelo SIGMA-VP, por imagens de Elétrons Secundários, auxiliada por Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS) IXRF modelo Sedona-SD. As condições de operação foram: corrente do feixe de elétrons = 80 μA , voltagem de aceleração constante = 20 kv, distância de trabalho = 8,5 mm, tempo de contagem para análise dos elementos = 30 s. Para a obtenção de imagens por MEV e análises químicas por EDS, as amostras foram montadas em fita dupla face colada em lâmina de vidro e metalizadas com ouro durante 1,5 minutos, em um sistema automático de metalização, modelo Emitech K550X, a fim de torná-las eletricamente condutivas. As análises foram realizadas no Laboratório de Microanálises (IG-UFPA/Instituto Tecnológico Vale).

A determinação mineralógica foi também auxiliada por Difração de Raios X (DRX), método do pó, em equipamento *Bruker D2 PHAZER*, com ânodo de Cu (Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações – IG/UFPA). As condições de

análise foram faixa angular de 5 a 74,98 °C, passo 0,02°, tempo/passo 38,4 s, tempo total 720 s, fenda 0,2 °C e potência 300 W.

As análises químicas de amostras totais envolveram a determinação dos os elementos maiores por Espectrômetro de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). Para tal as amostras foram fundidas com metaborato/ tetraborato de lítio e digestão em ácido nítrico diluído. Os elementos maiores foram analisados por Espectrômetro de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES); após fusão utilizando metaborato/ tetraborato de lítio e digestão em ácido nítrico diluído. A perda ao fogo foi determinada por calcinação a 1000°C. Os elementos-traço e terras-raras foram determinados no Espectrômetro de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS), após fusão utilizando metaborato/tetraborado de lítio e digestão em ácido nítrico. No caso dos metais preciosos e base (Au, Ag, As, Bi, Cd, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, Zn) a digestão foi por água régia. As análises foram realizadas pela Acme Analytical Laboratories (Tabela 1).

Tabela 1. Limites mínimos e máximos de detecção dos métodos empregados para determinação da composição química total (Acme Analytical Laboratories). Os elementos Ba, Co, Cu, Nb, Ni, Sc, Sr, Y, Zn, Zr quando não detectados por ICP-OES, foram analisados por ICP-MS.

Elemento	ICP-OES		Elemento	ICP-OES	ICP-MS	
	Lim. mín. (%)	Lim. máx. (%)		Lim. mín. (ppm)	Lim. mín. (ppm)	Lim. máx. (ppm)
SiO ₂	0,01	100	Au	-	0,0005	100
Al ₂ O ₃	0,01	100	Ag	-	0,1	100
Fe ₂ O ₃	0,04	100	As	-	1	10.000
CaO	0,01	100	Ba	5	1	50.000
MgO	0,01	100	Be	-	1	10.000
Na ₂ O	0,01	100	Bi	-	0,1	2.000
K ₂ O	0,01	100	Cd	-	0,1	2.000
MnO	0,01	100	Co	20	0,2	10.000
TiO ₂	0,01	100	Cs	-	0,1	10.000
P ₂ O ₅	0,01	100	Cu	20	0,1	10.000
Cr ₂ O ₃	0,002	100	Ga	-	0,5	10.000
LOI	0,1	100	Hf	-	0,1	10.000
C	0,01	100	Hg	-	0,1	100
S	0,02	100	Mo	-	0,1	2.000
			Nb	5	0,1	50.000
			Ni	20	0,1	10.000
			Pb	-	0,1	10.000
			Rb	-	0,1	10.000
			Sb	-	0,1	2.000
			Sc	1	-	10.000
			Se	-	0,5	100
			Sn	-	1	10.000
			Sr	2	0,5	50.000
			Ta	-	0,1	50.000
			Th	-	0,2	10.000
			Tl	-	0,1	1.000
			U	-	0,1	10.000
			V	-	8	10.000
			W	-	0,5	10.000
			Y	3	0,1	50.000
			Zn	5	1	10.000
			Zr	5	0,1	50.000
			La	-	0,1	50.000
			Ce	-	0,1	50.000
			Pr	-	0,02	10.000
			Nd	-	0,3	10.000
			Sm	-	0,05	10.000
			Eu	-	0,02	10.000
			Gd	-	0,05	10.000
			Tb	-	0,01	10.000
			Dy	-	0,05	10.000
			Ho	-	0,02	10.000
			Er	-	0,03	10.000
			Tm	-	0,01	10.000
			Yb	-	0,05	10.000
			Lu	-	0,01	10.000

4 RESULTADOS

4.1 A SUCESSÃO LATERITO-BAUXÍTICA E SUA COBERTURA

As bancadas e a rampa de acesso expõem uma seção geológica até 16,6 m de profundidade e 110 m de comprimento, representada por uma sucessão laterito-bauxítica recoberta por pacote argiloso inconsolidado (Figura 6A). A sucessão laterito-bauxítica é composta na base exposta por Horizonte Argiloso Bauxítico (HAB), que converge para um Horizonte Bauxítico (HBX) microcristalino e microporoso de cor vermelha. Este horizonte é então sobreposto por uma Crosta Ferroaluminosa (CFA) esferolítica, rica em oxi-hidróxido de ferro, que está desmantelada em seu topo, originando o horizonte denominado Crosta Ferroaluminosa Desmantelada (CFAD), no qual blocos de CFA são envolvidos por uma matriz argilosa. Por sua vez, a CFAD converge para Horizonte Esferolítico Ferroaluminoso (HEFA), o qual é sucedido pelo Horizonte Bauxítico Nodular (HBN) (Figura 6B). O HBX e a CFA, contidos no intervalo entre 15 e 16,5 m de profundidade, foram classificados pela Votorantin Metais S/A como minérios de alumínio, ou seja, bauxita. Essa sucessão em termos gerais se assemelha àquela de Rondon do Pará e dos depósitos laterito-bauxíticos da Amazônia.

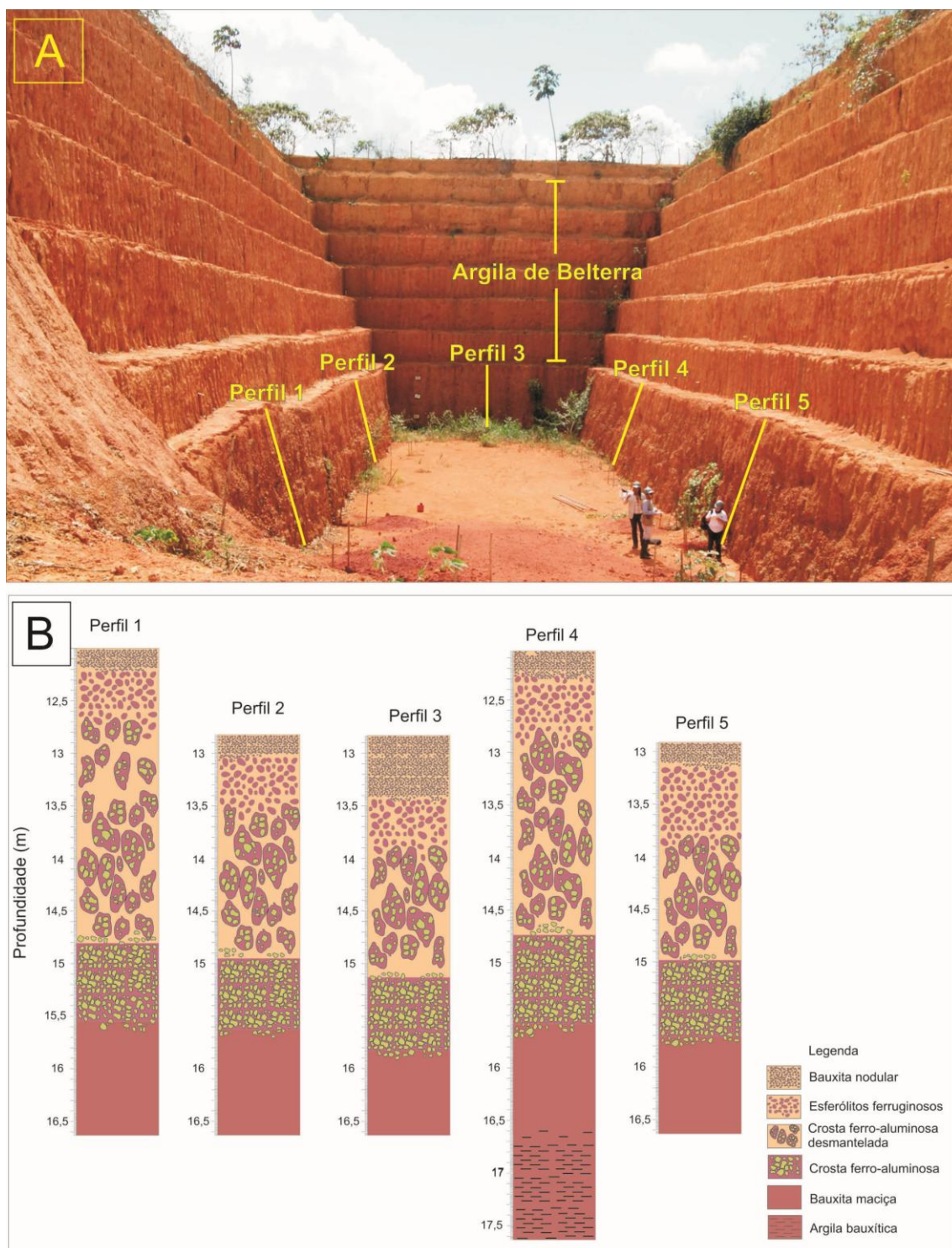


Figura 6. A) Vista do interior da lava piloto Dácio, com indicação dos locais onde foram descritos os cinco perfis da figura aqui apresentados, que não incluem a cobertura. B) Sequência de horizontes identificada nos perfis laterito-bauxítico estudados na lava piloto Dácio.

4.1.1 Horizonte Argiloso Bauxítico (HAB)

O HAB encontra-se na base aflorante da sucessão geológica investigada, se estende a profundidade superior a 17,6 m, portanto as descrições aqui contidas se restringirão à parte superior deste horizonte, entre 16,6 e 17,6 m de profundidade. (Figura 7A). A porção estudada do HAB é avermelhada (10R 5/8 na carta de Munsell), argiloarenosa, essencialmente maciça, por vezes pulverulenta (Figura 7B), constituída principalmente de caulinita, sendo acessórios gibbsita, hematita, goethita e anatásio (Figura 8A), além de quartzo. Este último foi identificado na fração areia fina e muito fina, após peneiramento a úmido de amostras do HAB.

Na massa dominada por caulinita, que tem aspecto ao tato tipo argiloarenoso, se distribuem randomicamente nódulos que juntos equivalem a cerca de 5 % do volume do material do horizonte. Os nódulos são em parte rosados (10R 5/8 na carta de Munsell) e microcavernosos (Figura 7C) e também amarelados (10YR 8/8 na carta de Munsell), compactos e de superfície porcelanada (Figura 7D), ambos essencialmente gibbsíticos com traço de hematita e caulinita (Figura 8B e 8C). Esses nódulos são mais abundantes em direção ao topo e representam a transição do HAB para o horizonte bauxítico, onde feições desse tipo são abundantes.

A cor avermelhada da matriz argilosa é dada pela presença de hematita. No entanto, podem ser observadas milimétricas porções esbranquiçadas (2.5Y 8/1 na carta de Munsell) onde se concentram apenas caulinita e gibbsita (Figura 7E), conforme análises de DRX (Figura 8D). A caulinita se apresenta em agregados de placas pseudohexagonais com até 300 nm de diâmetro (Figura 7F).

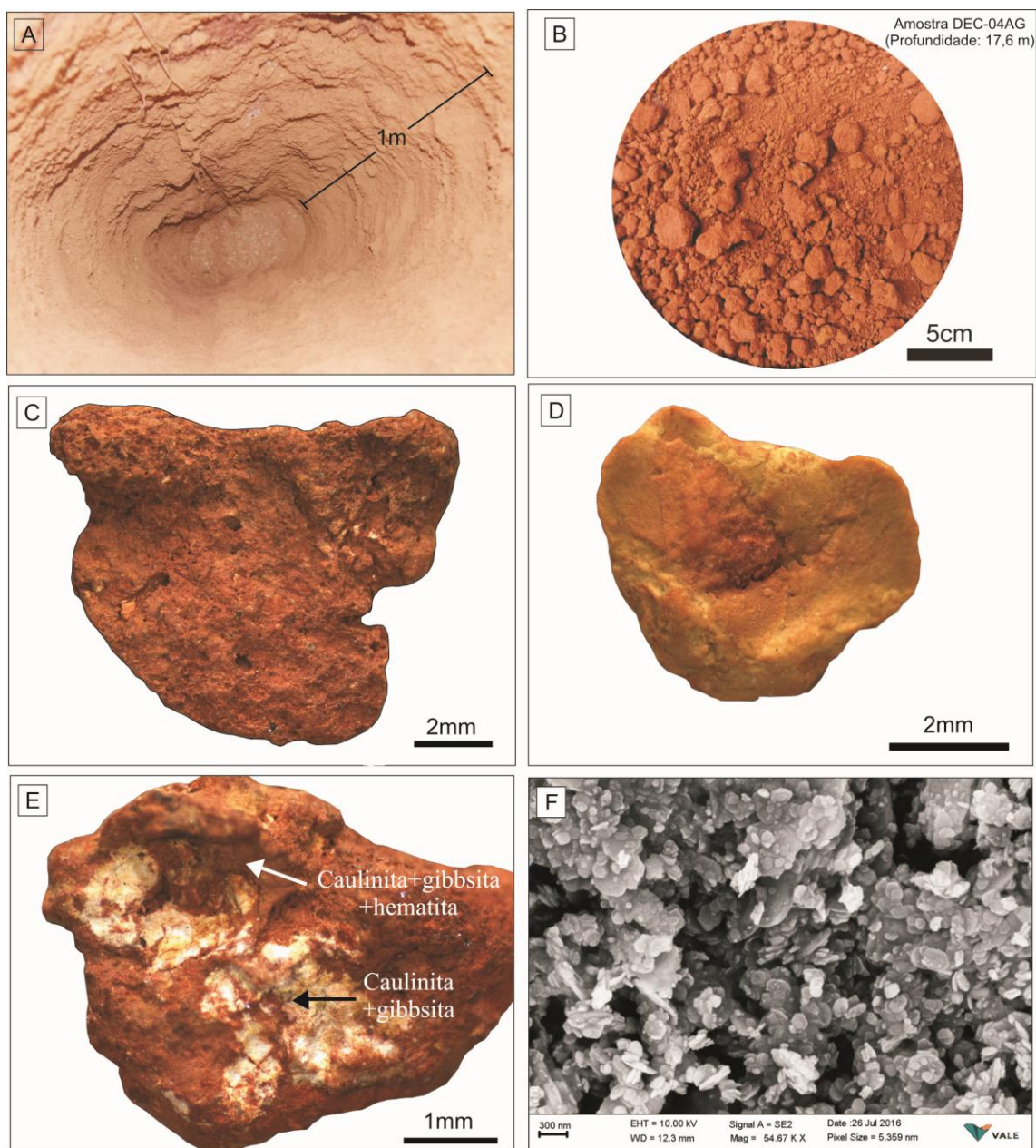


Figura 7. A) Exposição do HAB em furo desenvolvido a partir do piso da lavra piloto Décio, entre 16,6 e 17,6 m de profundidade. B) Amostra do HAB coletada a 17,6 m de profundidade. C) Nódulo gibbsítico-caulinítico. D) Nódulo gibbsítico-caulinítico com manchas de oxi-hidróxidos de Fe. E) Fragmento da matriz argilosa do HAB, no qual se observa porções esbranquiçadas onde dominam gibbsita e caulinita, e áreas avermelhada onde, além destes minerais, também ocorre a hematita. F) Aspecto textural de fragmento do HAB em que se delineia denso empacotamento de cristalitos de contorno pseudohexagonal, provavelmente de caulinita e gibbsita, segundo imagens de MEV.

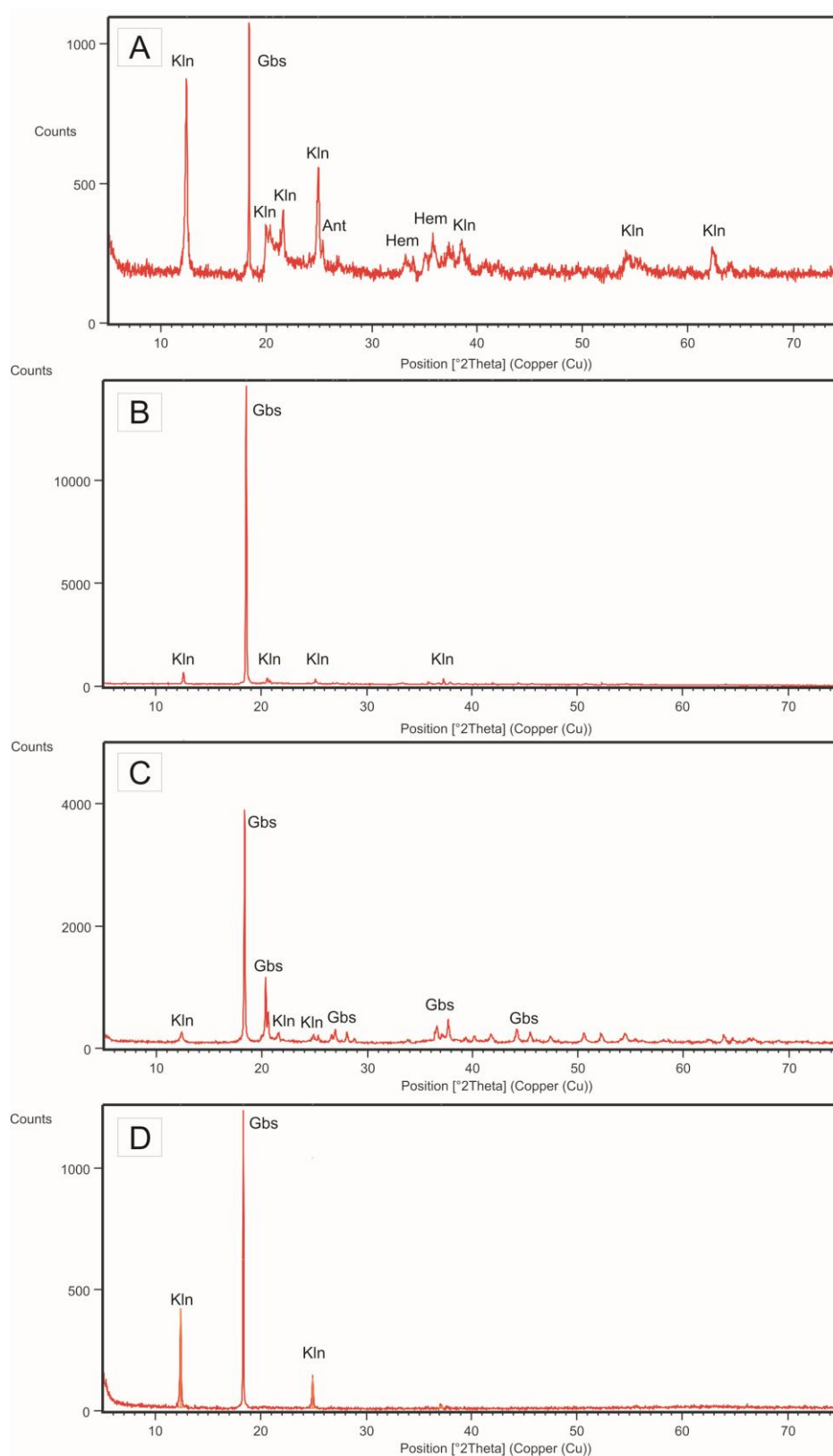


Figura 8. Constituição mineralógica do HAB obtida por DRX. A) Massa argilosa, dominada por caulinita, além de gibbsita, hematita e anatásio. B) Nódulos gibbsíticos com caulinita acessória. C) Nódulos porcelanados de igual composição mineral. D) Mineralogia das pontuações esbranquiçadas contidas na matriz argilosa, contendo apenas gibbsita e caulinita.

4.1.2 Horizonte Bauxítico (HBX)

O HBX varia de 36 a 108 cm de espessura, limitando-se aproximadamente ao intervalo entre 15,6 e 16,6 m de profundidade. Ele se sobrepõe ao HAB em contato gradacional, que é dado pelo aumento na frequência dos nódulos hematíticos e gibbsíticos, que finalmente passa a ser representada por zonas maciças de cor rosa a avermelhada (10R 4/8 na carta de Munssel) e zonas onde este plama envolve esferólitos amarelados (10YR 8/8 na carta de Munssel). Ambas as variações faciológicas são cavernosas e pouco friáveis (Figura 9A). Os minerais dominantes neste horizonte são gibbsita e hematita, enquanto caulinita, goethita e anatásio são acessórios (Figura 9F).

As zonas maciças são constituídas por hematita criptocristalina e gibbsita microcristalina a mesocristalina e localmente como esferólitos amarelados de aspecto porcelanado (Figura 9B). Em meio a esta massa micro a mesocristalina ocorrem ainda nódulos hematíticos milimétricos (Figura 9C).

Na zona esferolítica, os esferólitos são compostos internamente por núcleos de oxi-hidróxido de ferro envolvidos por goethita aluminosa (Figura 9D). No entanto, a substituição de hematita por goethita avança em direção ao centro dos esferólitos, de modo que alguns estão totalmente goethitizados (Figura 9E). O aspecto cavernoso está presente tanto nos esferólitos quanto no plama que os envolve. Vide imagens macroscópicas complementares do HBX no Anexo A.

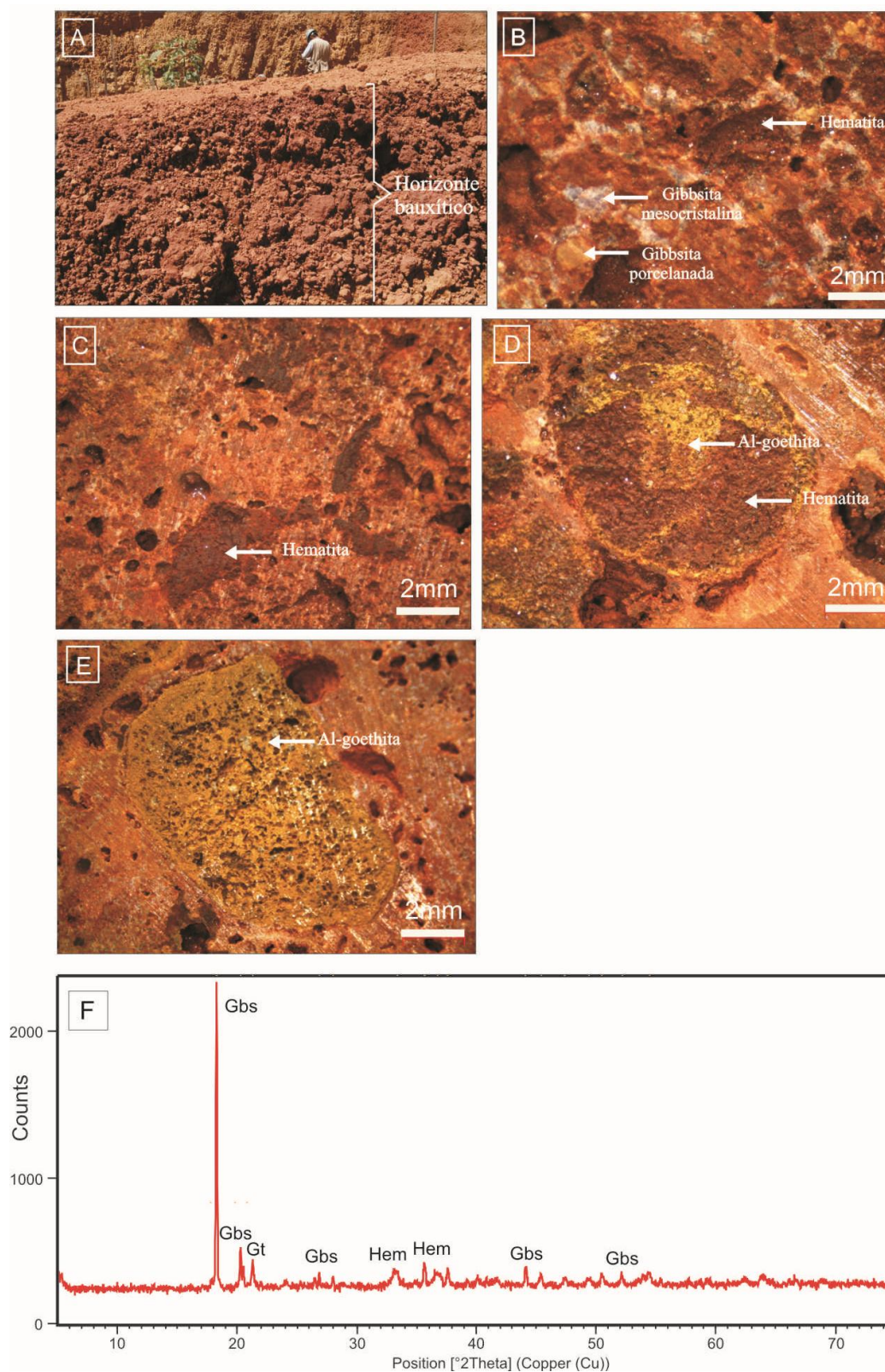


Figura 9. A) Exposição do HBX na rampa de acesso à lavra piloto Décio. Imagens do HBX obtidas via estereomicroscópio: B) Bauxita maciça composta por plasma de oxi-hidróxido de ferro associado à gibbsita mesocrystalina e porcelanada; C) Nódulos hematíticos cimentados por hematita (cripto) + gibbsita (mesocrystalina); D) Goethita aluminosa envolvendo esferólito de núcleo hematítico; E) Esferólito Al-goethítico envolvido por hematita (cripto) + gibbsita (mesocrystalina). F) Composição mineralógica do HBX, obtida por DRX.

Os esferólitos da zona esferolítica são compostos por um plasma de núcleo opaco e bordas amarronzadas, demonstrando, também na escala microscópica, o zoneamento na distribuição dos oxi-hidróxidos de ferro, com mais hematita no núcleo e goethita na borda (Figura 10A). Este plasma possui um conjunto de cavidades angulosas a subangulosas (Figura 10B). Em sua maioria, as mesmas estão preenchidas total ou parcialmente por gibbsita mesocristalina, exibindo maclamento tipo albita (Figura 10C). A angulosidade dessas cavidades e dos agregados gibbsíticos que as preenchem sugere a preservação da forma de grãos pré-existent. O material que envolve os esferólitos é composto também por um plasma de oxi-hidróxido de ferro, intrudido por vênulas e bolsões de gibbsita mesocristalina (Figura 10D).

Os principais cristais observáveis ao MEV são os de gibbsita, que se apresentam predominantemente como placas de até 1 μm de diâmetro empilhadas (Figura 10E), embora localmente também ocorram cristais maiores, visíveis mesoscopicamente. O córtex presente nas cavidades do HBX é composto por cristalitos de goethita férrica inferiores 1 μm de comprimento e que quando agregados apresentam hábito botrioidal (Figura 10F).

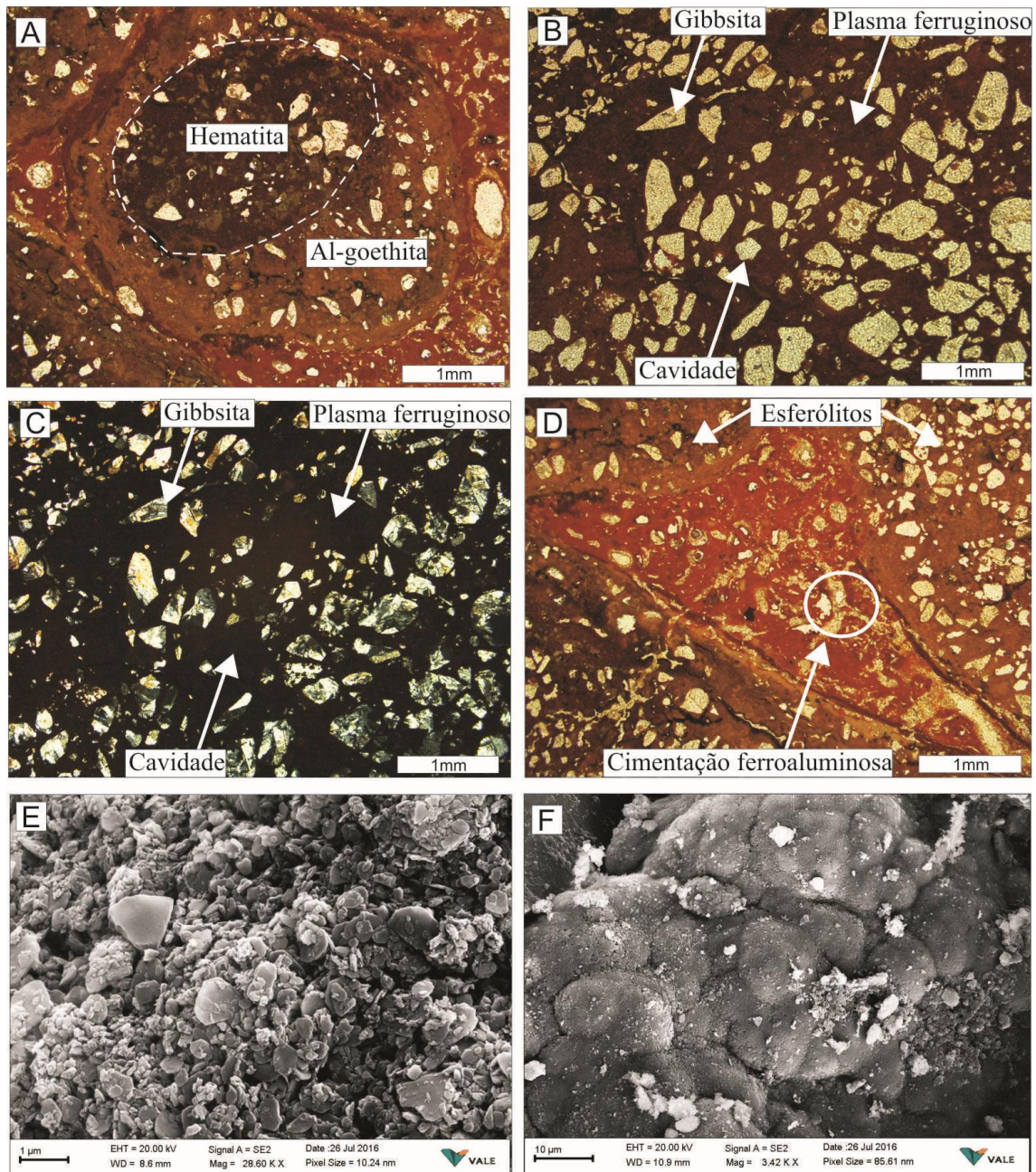


Figura 10. A) Esferólito bauxítico com zoneamento na distribuição dos oxi-hidróxidos de ferro. B e C) Cristais de gibbsita preenchendo cavidades em meio ao plasma de oxi-hidróxido de ferro que compõe os esferólitos. D) Cimentação no entorno dos esferólitos, composta por plasma ferruginoso entremeado por vênulas e bolsões gibbsíticos. E) Agregados de cristalitos tabulares de gibbsita. F) Goethita com hábito botrioidal revestindo cavidades do plasma que envolve os esferólitos. A e D – nicóis paralelos; B e C – nicóis cruzados.

4.1.3 Crosta Ferroaluminosa (CFA)

A CFA se sobrepõe ao HBX em contato gradacional. Sua espessura varia de 40 a 75 cm e se situa aproximadamente no intervalo entre 14,7 e 15,6 m de profundidade. Ela consiste em esferólitos vermelho amorronzados (10R 3/6 na carta de Munssel) cimentados por material microcristalino de aspecto maciço a microcavernoso de tom rosa claro a vermelho claro, 10R 5/6 na carta de Munssel (Figura 11A). Os esferólitos ou mesmo nódulos tem diâmetro variado, no entanto predominam aqueles com até 2 cm, os quais em geral estão envolvidos por películas de goethita aluminosa, 10YR 8/8 na carta de Munssel (Figura 11B). Esses esferólitos correspondem a 10 % do material total e mostram distribuição aleatória no cimento.

Os esferólitos são constituídos principalmente por hematita, com gradual substituição por goethita aluminosa da borda para o centro formando uma película amarela no seu entorno (Figura 11C e D). Por sua vez o cimento é dominado por gibbsita, com hematita e goethita em menor proporção, além de caulinita e anatásio (Figura 11E). Vide imagens macroscópicas complementares da CFA no Anexo B.

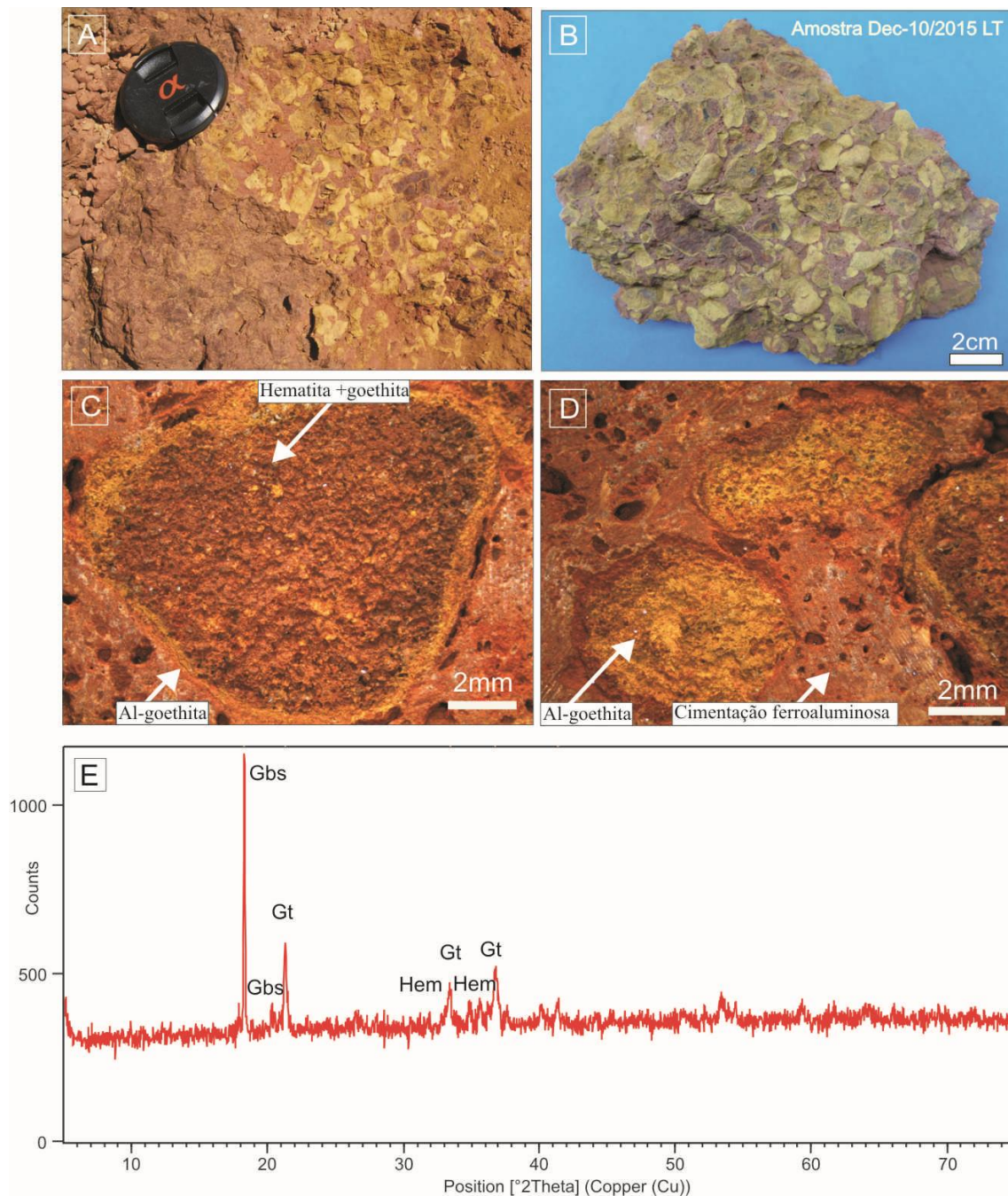


Figura 11. A) Exposição da CFA na lava piloto Décio. B) Amostra da CFA exibindo esferólitos com películas de goethita aluminosa e ainda cimentação microcristalina. C) Esferólito ferroaluminoso em que um núcleo de hematita e gibbsita é bordejado por goethita aluminosa. D) Esferólito em que o núcleo hematítico foi substituído quase integralmente por Al-goethita, e finalmente envolto por córtex de plasma hematítico. E) Composição mineralógica a CFA, obtida por DRX.

Ao microscópio ótico nota-se que o núcleo dos esferólitos é composto por um plasma de oxi-hidróxido de ferro no qual cavidades irregulares submilimétricas são parcialmente revestidas com gibbsita mesocristalina. A Al-goethita forma o córtex típico destes esferólitos (Figura 12A), que de maneira geral são muito semelhantes àqueles presentes no HBX.

A gibbsita se concentra na cimentação que envolve os esferólitos, onde se distribuem em vênulas e bolsões aluminosos que intersectam a matriz hematítica-caulinítica (Figura 12B). Esses cristais de gibbsita em imagens de MEV constituem cristais de até 20 µm de comprimento máximo (Figura 12C e 12D).

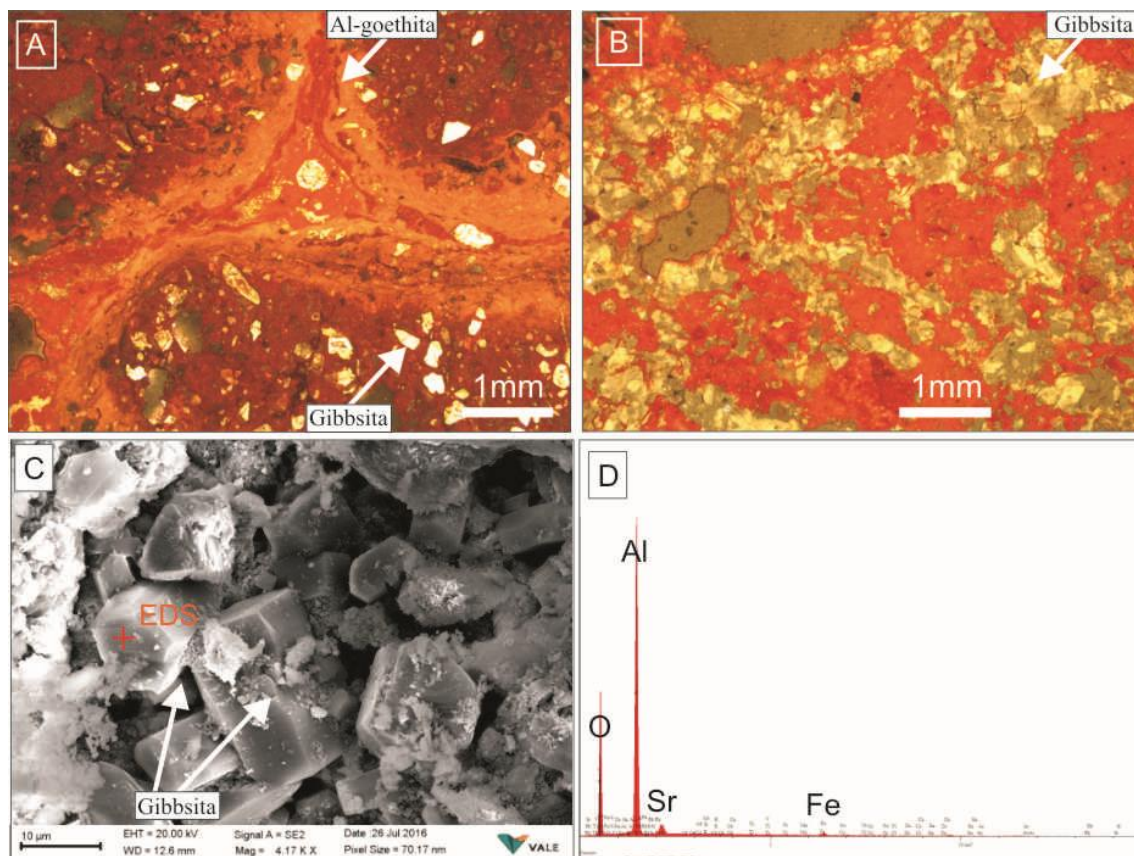


Figura 12. A) Cristais de gibbsita preenchendo cavidades internas aos esferólitos da CFA (nicóis cruzados). B) Cimentação que envolve os esferólitos, composta por mesocristais de gibbsita entremeados ao plasma de oxi-hidróxido de ferro (nicóis cruzados). C) Imagem de MEV dos mesocristais de gibbsita que junto com os oxi-hidróxidos de ferro cimentam os esferólitos da CFA. D) Análise de EDS, confirmando a composição química dos cristais de gibbsita no ponto indicado na imagem C.

4.1.4 Crosta Ferroaluminosa Desmantelada (CFAD)

A CFAD com 76 a 220 cm de espessura, se estendendo aproximadamente de 12,7 a 14,7 m de profundidade, é formada por blocos e fragmentos de material com textura, cor e composição mineralógica similares à CFA (Figura 13D), o que reforça a forte relação entre estes três horizontes (HBX, CFA e CFAD) os quais estão envolvidos por matriz de aspecto argilo-arenosa de cor vermelho claro, 10R 5/8 na carta de Munssel (Figura 13A e 13B). A matriz é restrita e corresponde a cerca de 10% do volume total da CFAD. Este demantelamento é resultado do desenvolvimento de raízes, que em parte tiveram suas formas tubulares preservadas (Figura 13C). A constituição

mineralógica segundo as análises de DRX também se assemelha a CFA, ou seja está representada por hematita, goethita, gibbsita, caulinita e anatásio como acessório (Figura 13E), distinguindo-se no maior teor de caulinita.

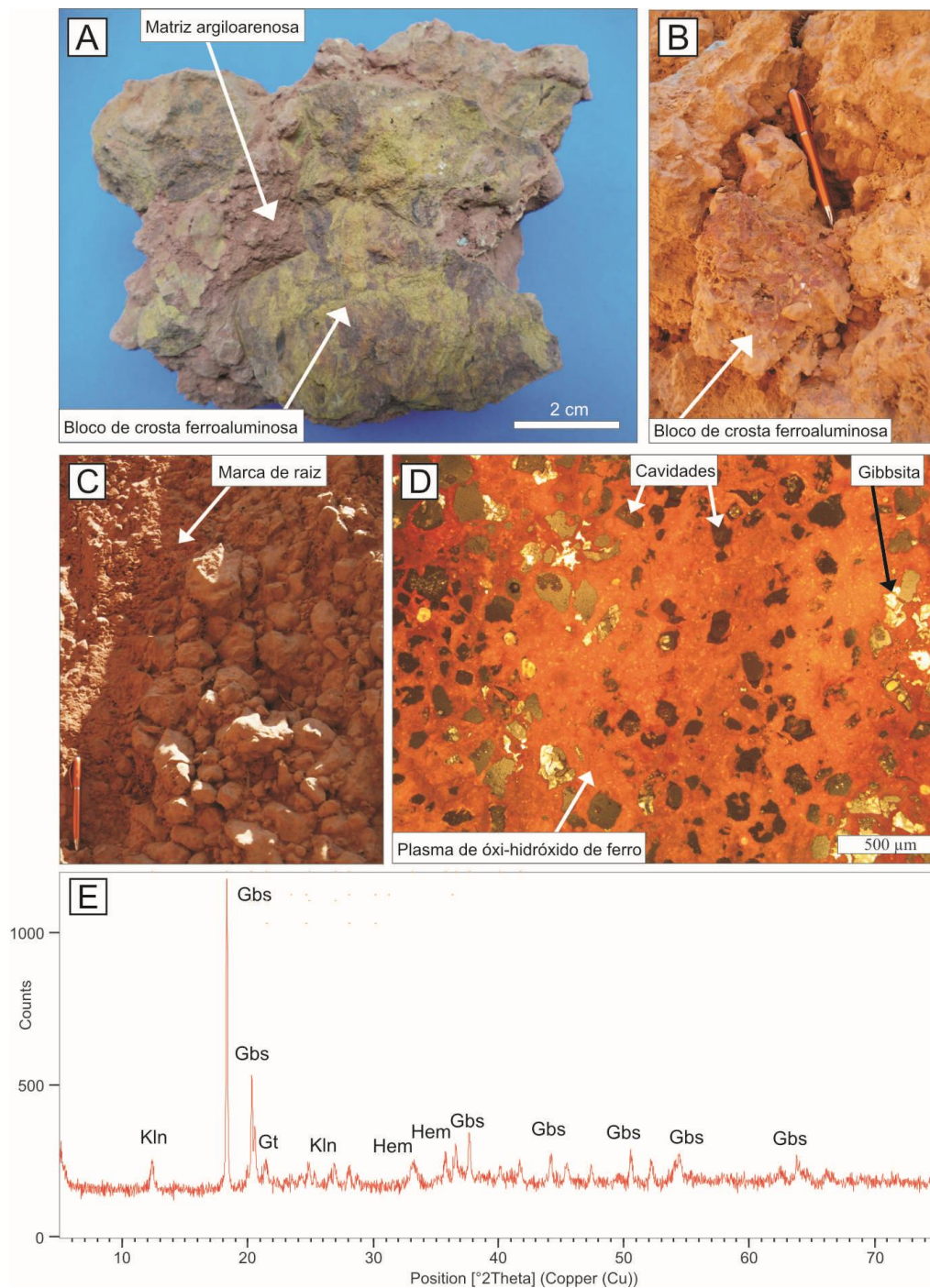


Figura 13. A) Amostra típica da CFAD onde se observa blocos equivalentes à CFA invadida por Al-goethita, em matriz argilosa restrita, aparentemente em substituição a matriz gibbsítica. B) Detalhe da CFAD fragmentada coberta por material argiloso. C) Perfuração tubular promovida por raiz e preenchida por material fragmentado, resultante do dismantelamento da CFA, e agora representando a CFAD. D) Detalhe observado em lâmina delgada polida sob microscópio ótico (nicóis cruzados) de um a crosta ferroaluminosa dismantelada, em que se observa o domínio de plasma de oxi-hidróxido de ferro com inúmeras cavidades, em parte preenchidas com gibbsita. E) Composição mineralógica de um desses fragmentos de crosta da CFAD, obtida por DRX, em que predomina gibbsita, hematita, goethita, caulinita e ainda anatásio.

4.1.5 Horizonte Esferolítico Ferroaluminoso (HEFA)

O HEFA encontra-se em contato abrupto e com superfície ondulada com a CFAD (Figura 145A), em que a espessura varia de 40 a 61 cm, situando-se entre 12,2 e 12,7 m de profundidade. Ele se destaca pelo domínio de esferólitos soltos, de cor vermelho amarronzado (2.5YR 3/6, carta de Munssel), com até 2 cm de diâmetro, alongados a subesféricos (Figura 14B) com matriz argilosa vermelho clara (2.5YR 5/8 na carta de Munssel), restrita a menos de 5 % em volume.

Esses esferólitos soltos são formados internamente por plasma ferroaluminoso, rico em microcavidades irregulares. Nestas cavidades é comum cristais pseudo-hexagonais de gibbsita com até 100 µm de maior comprimento, maclados (Figura 14C e D). A composição mineralógica obtida por DRX confirma a composição essencialmente gibbsítica, associada à hematita e caulinita (Figura 14E).

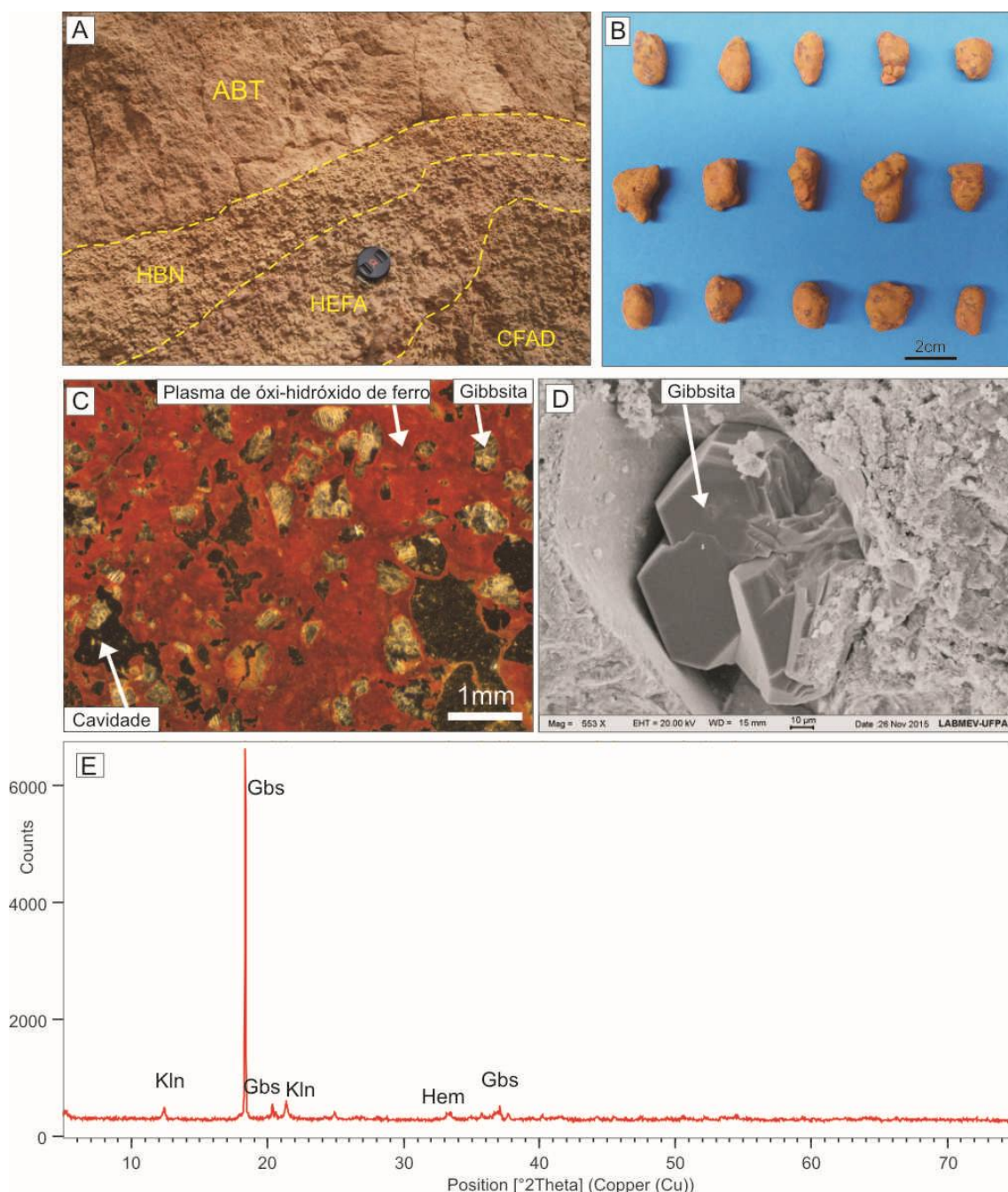


Figura 14. A) Imagem mostrando os contatos em campo entre CFAD e HEFA, HEFA e HBN, além deste com Argila de Belterra. B) Esferólitos ferroaluminosos isolados em que se observa as diferentes morfologias e a película argila envolvente. C) Aspecto microscópico da massa que constitui o interior do esferólito, em que plasma ferroaluminoso, com microcavidades, formado por gibbsita, além de hematita e caulinita. Nessas cavidades normalmente se encontram cristais de gibbsita. D) Mesocristais de gibbsita dessas cavidades. E) Composição mineralógica dos esferólitos do HEFA, obtida por DRX, mostrando o domínio de gibbsita, tendo hematita e caulinita restritos.

4.1.6 Horizonte Bauxítico Nodular (HBN)

Logo acima do HEFA, também em contato abrupto e ondulado, se encontra o horizonte bauxítico nodular (Figura 15A). Sua espessura varia de 23 a 42 cm, situada a aproximadamente entre 12 e 12,2 m de profundidade. O HBN, como o próprio nome diz, é formado por nódulos centimétricos (até 3 cm de comprimento), de contorno irregular, podendo ser alongados a sub-esféricos, mesmo assim com superfície externa rugosa, envolta por material argiloso marrom amarelado (2.5YR 5/8 na carta de Munssel), que corresponde a no máximo 5% do volume da material total. Por sua vez é comum encontrar agregados nodulares formando nódulos maiores (Figura 15B). Internamente os nódulos são de cor rosa claro a creme, microcristalinos, compactos e com aspecto de porcelana. Os nódulos são constituídos basicamente de gibbsita, além de caulinita e hematita como acessório (Figura 15E).

Ao microscópio óptico em lâmina delgada polida esses nódulos mostram claramente o domínio de um plasma gibbsítico amarelado, representando assim a gibbsita criptocristalina (Figura 15C), respondendo pelo aspecto porcelanado. Esse plasma é recortado por uma rede de vênulas de gibbsita mesocristalina, que por vezes se alarga, formando bolsões desse mesmo mineral em cristais ainda maiores (Figura 15D).

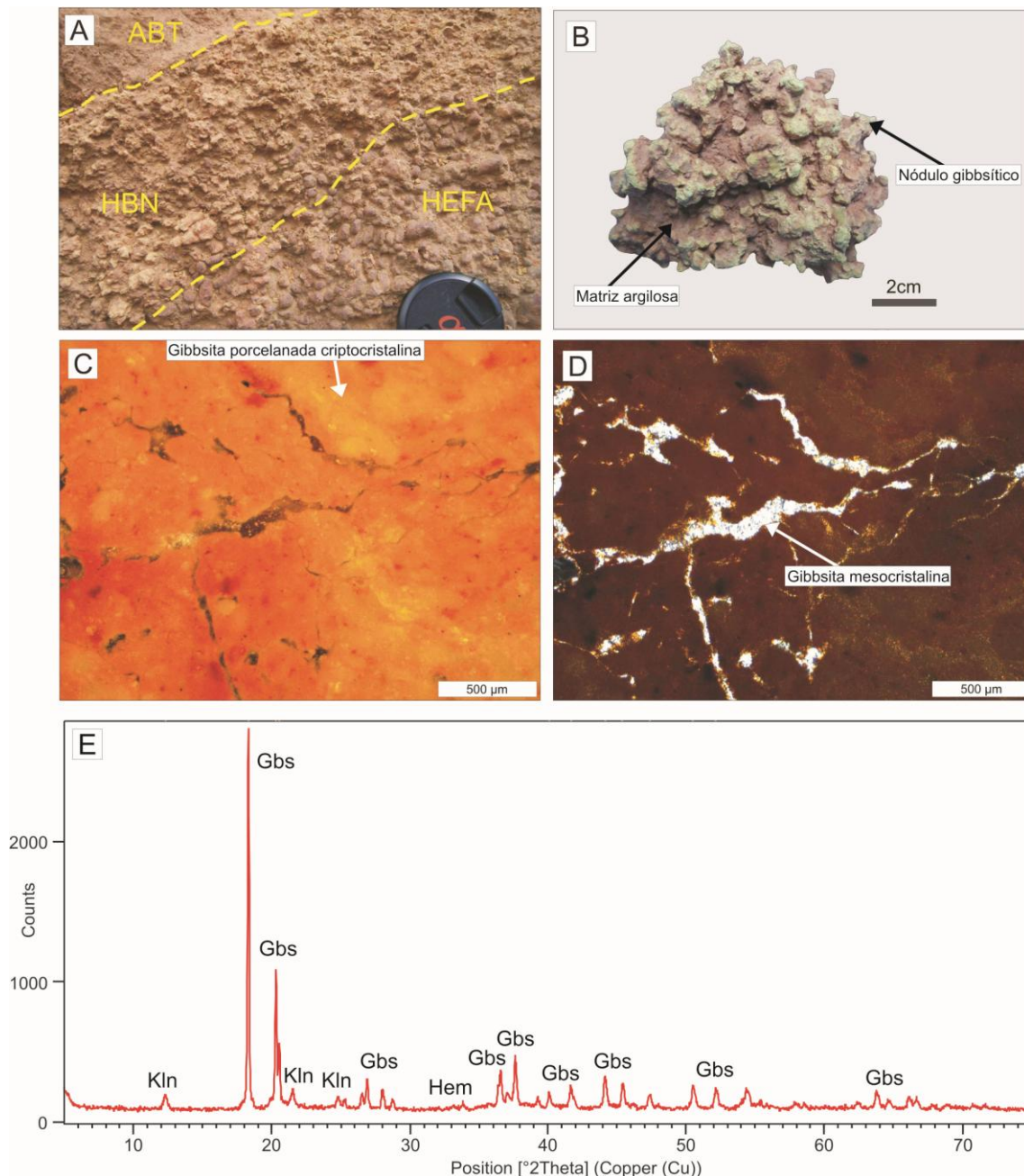


Figura 15. A) Contato do HBN com o HEFA e ABT. B) Amostra do HBN, composta por um agregado de nódulos bauxíticos, em que é possível observar o aspecto porcelanado, autocimentados e ainda parcialmente envoltos por matriz argilosa. C) Plasma gibbsítico no interior dos nódulos, vendo-se o aspecto porcelanado, ou maciço (níveis paralelos). D) Vênulas e bolsões de gibbsita mesocristalina seccionando o plasma de gibbsita criptocristalina (níveis cruzados). E) Composição mineralógica de nódulos bauxíticos, obtida por DRX, em que se identifica gibbsita como preponderante, com caulinita e hematita restritos.

4.1.7 Cobertura Argilosa ou Argila de Belterra (ABT)

Diretamente sobre o HBN (admitiu-se que o HBN seja o topo do perfil laterítico) em contato abrupto e ondulado se encontra em toda a cava piloto um pacote argiloso de cor amarela avermelhada a ocre (10YR4/3 na carta de Munsell) e inconsolidada com espessura quase constante em torno de 12 m (Figura 16A e 16B). É um material homogêneo, em que na porção inferior é amarelo avermelhado e ocre para o para topo. Em sua porção inferior apresenta nódulos bauxíticos com até 20 mm de maior comprimento. Embora contenha esses nódulos bauxíticos, a ABT é formada predominantemente de caulinita estando ainda presente a Al-goethita, que provavelmente lhe confere a cor amarelada conforme Horbe & Costa (1999; 2005), bem como anatásio e gibbsita que é mais abundante na base por conta da presença de nódulos gibbsíticos (Figura 16C-E). A composição mineralógica da Argila de Belterra na lavra piloto Décio difere daquela obtida por Pantoja (2015) em relação à quantidade de gibbsita, pois estes autores identificaram picos mais pronunciados deste mineral.

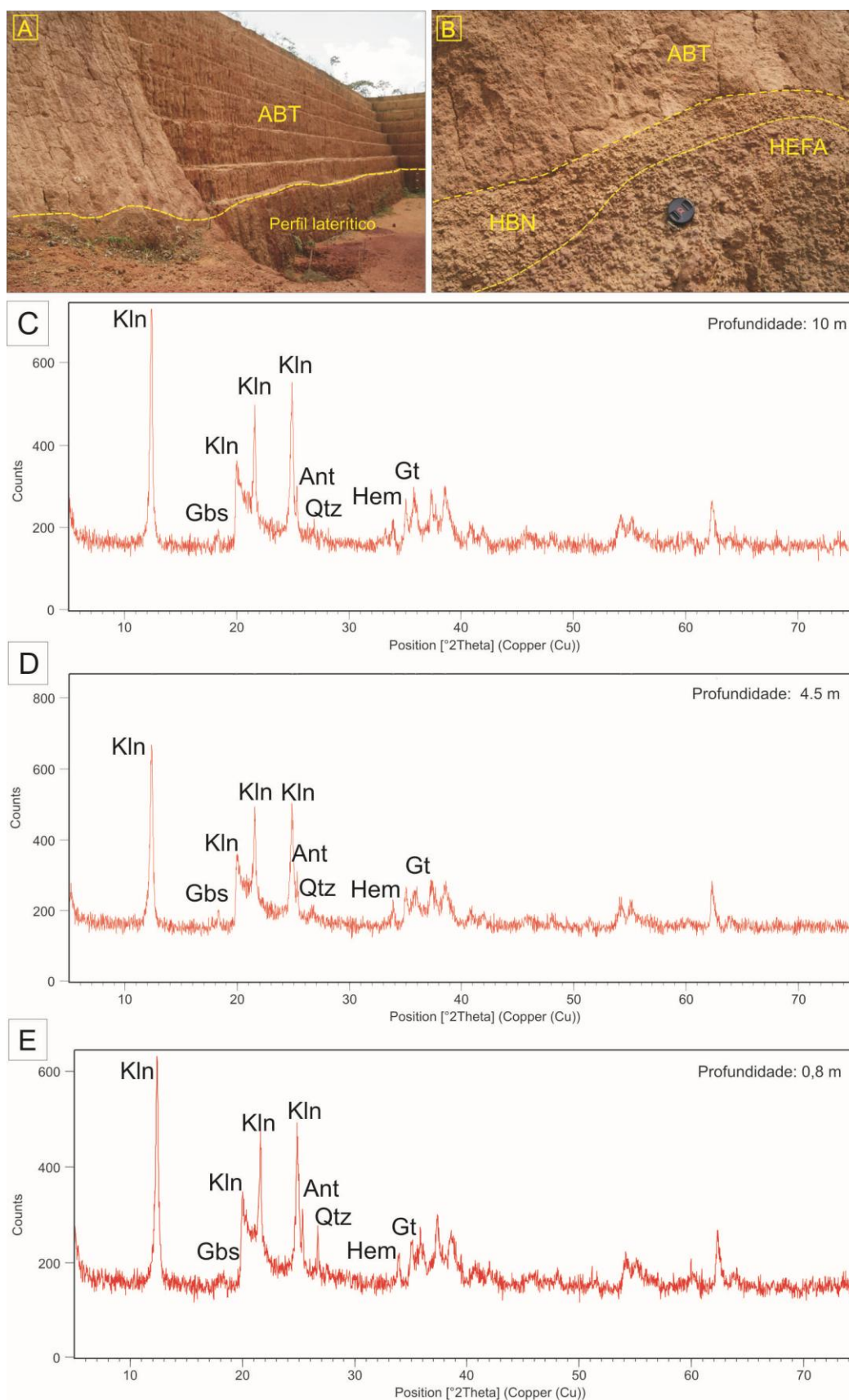


Figura 16. A) Cobertura argilosa com 12 m de espessura e seu contato ondulado com a sequência laterítica. B) Contato do HEFA com o HBN e deste com a ABT. C) Composição mineralógica da ABT a 10 m de profundidade obtida por DRX. D) Composição mineralógica da ABT a 4,5 m de profundidade obtida por DRX. E) Composição mineralógica da ABT a 0,8 m de profundidade obtida por DRX.

4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA, MINERALOGIA ESTEQUIOMÉTRICA E SUA DISTRIBUIÇÃO NO PERFIL LATERITO-BAUXÍTICO

4.2.1 Elementos Maiores

A sequência de horizontes é composta basicamente por Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 e PF, que juntos representam mais de 99,51% da composição química total (Tabela 2). Outros elementos maiores, como MgO , K_2O e MnO , foram registrados localmente no perfil. A presença de MgO e K_2O está restrita ao HAB, onde varia de 0,01 a 0,02%. A ocorrência de MnO (0,01 a 0,03%) se limita ao HAB e HBX. O P_2O_5 (0,01 a 0,05%) ocorre no HAB, no HBX e na CFA.

A distribuição mineralógica ao longo dos perfis 3 e 4, obtida através de estequiometria, retrata claramente os horizontes geológicos identificados. Na base do perfil, o mineral mais abundante é a caulinita (HAB), na porção intermediária tem-se o domínio da gibbsita, seguido por hematita+goethita (HBX). Mais acima, a CFA e CFAD representam a zona de domínio da hematita+goethita, seguidos pela gibbsita. No topo do perfil tem-se novamente a gibbsita como mineral principal, representada pelo HEFA e HBN (Figura 17).

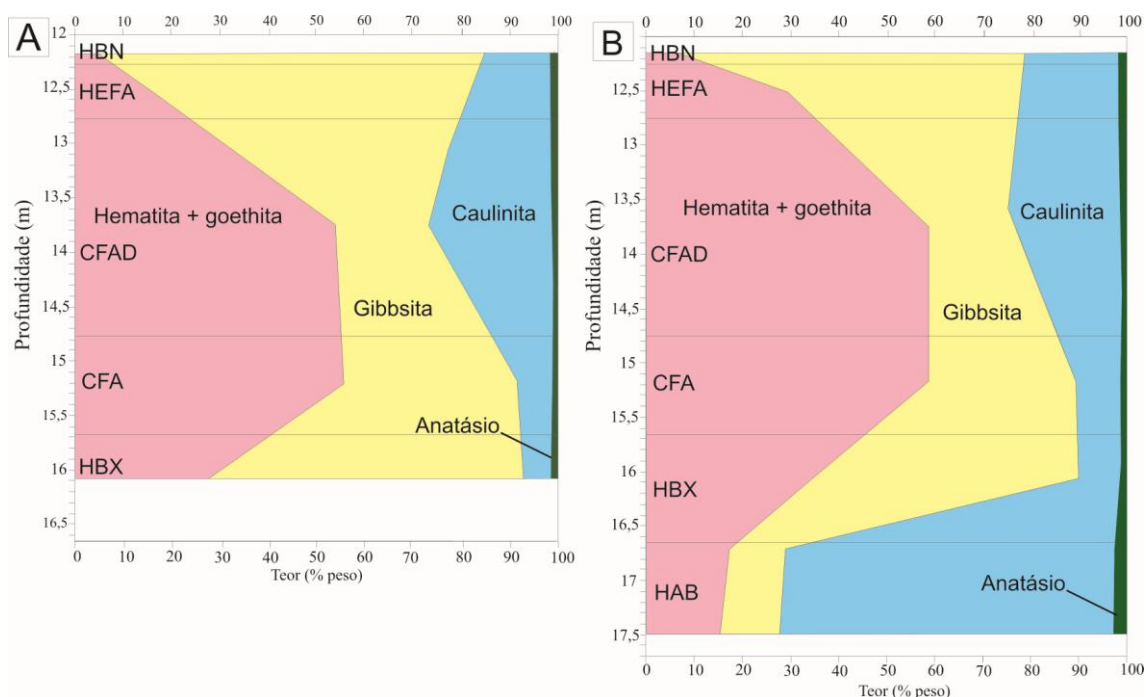


Figura 17. Distribuição mineral obtida por estequiometria para os perfis 3 (A) e 4 (B), expostos na lava piloto Décio.

A composição química, da mesma forma que a constituição mineralógica, distingue cada horizonte (Tabela 2). Assim que o HAB é dominado por Al_2O_3 e SiO_2 e Fe_2O_3 além de Perda ao Fogo em menor proporção, o que reflete a predominância de caulinita, com gibbsita hematita + goethita subdominadas (Figura 6). São notáveis os

teores de TiO_2 , que embora na ordem de 2,3 % neste horizonte, os mesmos são comparativamente muito mais elevados do que aqueles dos demais horizontes subjacentes (0,6 a 1,3 %), o que não é comum em uma evolução laterítica a partir de um protólito rochoso único e homogêneo (Kronberg *et al.* 1979, Costa 2007). Já o HBX distingue-se pelos mais altos conteúdos de Al_2O_3 e baixos de SiO_2 , como era de se esperar, dominado por gibbsita, além de teores expressivos de Fe_2O_3 e altos valores de Perda ao Fogo, correspondentes a presença de hematita + goethita, e claro gibbsita e caulinita. Já a CFA se destaca pelos valores mais altos de Fe_2O_3 , que alcançam 52,15%, também esperados, diante de sua constituição mineralógica dominada por hematita + goethita. Entretanto a mesma ainda apresenta valores expressivos de Al_2O_3 , SiO_2 e TiO_2 , constituindo os minerais subalternos gibbsita, caulinita e anatásio. A CFAD apresenta composição química semelhante à CFA, sendo a distinção maior os teores mais elevados de SiO_2 , que retratam a maior abundância de caulinita, que está na matriz restrita e envolvendo os fragmentos e nódulos deste horizonte. Assim que além dos aspectos de campo, os texturais e mineralógicos, os dados químicos reforçam a conexão deste horizonte com a CFA subjacente. O HEFA apresenta composição química que se aproxima daquela do HBX, portanto com altos teores de Al_2O_3 (37,85 e 47,84%), e Fe_2O_3 (15,75 e 29,91%), e equivalentes de TiO_2 , distinguindo-se no entanto com os valores de SiO_2 , mais elevados. Essa composição é compatível com o domínio de gibbsita e hematita+goethita, e presença maior de caulinita. O HBX se destaca pelos teores mais elevados de Al_2O_3 (em torno de 57 % para duas amostras analisadas) e os mais baixos de Fe_2O_3 (4,85 % nas duas amostras) em todo perfil laterito-bauxítico, sendo que os teores de SiO_2 total (em torno 6,5 %) somente ultrapassam aqueles do HBX. Esta composição química reflete o domínio soberano da gibbsita microcristalina, em que caulinita ainda é um mineral significativo e os oxi-hidróxidos de Fe (Hematita+goethita) não ultrapassam 6%.

Tabela 2. Composição química total do perfil laterítico bauxítico da lavra piloto Décio. Os teores de CaO e Na₂O (< 0,01%); de Ni (< 20 ppm); de Cd e Tl (< 0,1 ppm), estão abaixo do limite de detecção; (1) Composição média da Crosta Terrestre segundo Wedepohl (1995).

Horizonte	HAB		HBX		CFA		CFAD		HEFA		HBN		Média crustal ¹
Perfil	Perfil 4		Perfil 3	Perfil 4	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 3	Perfil 4	
Amostra	DEC-04	DEC-01	DEC-27	DEC-34	DEC-28	DEC-35	DEC-30	DEC-37	DEC-31	DEC-38	DEC-32	DEC-39	
Profund. (m)	17,6	16,7	16,25	16,1	15,5	15,1	14,45	13,7	13,6	12,45	13,1	12,1	
SiO ₂ (%)	31,37	29,56	2,27	3,59	3,19	3,42	11,20	7,21	9,76	10,57	6,39	6,58	61,50
TiO ₂	2,37	2,30	1,31	0,83	0,67	0,83	0,74	0,64	1,18	0,96	1,14	1,15	0,68
Al ₂ O ₃	34,60	35,45	44,38	38,69	24,97	28,23	21,44	20,68	47,84	37,35	57,25	57,44	15,10
Fe ₂ O ₃	14,89	16,12	27,59	34,24	52,15	48,75	50,59	55,58	15,75	29,91	4,85	4,85	6,28
MnO	0,02	0,03	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	0,126
MgO	0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	3,7
K ₂ O	0,02	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	2,4
P ₂ O ₅	0,05	0,05	0,02	<0,01	0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,18
PF	16,4	16,2	24,2	22,4	18,7	18,5	15,6	15,4	25,3	20,9	30,2	29,8	-
Carbono total	0,18	0,17	0,05	0,06	0,09	0,06	0,08	0,07	0,11	0,09	0,10	0,10	-
Total	99,94	99,94	99,85	99,83	99,81	99,84	99,76	99,65	99,98	99,87	99,95	99,94	-
Ba (ppm)	69	91	43	21	17	21	12	12	13	13	11	12	668
Be	<1	1	<1	2	<1	1	<1	1	<1	<1	3	<1	3,1
Co	1,7	1,2	2,9	2,0	2,3	1,0	3,0	2,0	2,4	6,2	3,5	8,3	11,6
Cr	250	270	240	230	310	310	1030	730	350	720	210	210	1260
Cs	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	5,8
Ga	53,4	54,5	51,4	42,5	43,9	41,7	88,4	68,2	49,7	77,1	39,9	40,3	14
Hf	24,8	24,3	16,7	12,1	9,0	10,1	12,9	10,5	16,3	14,2	13,9	13,4	5,8
Nb	46,4	43,1	25,1	15,5	12,8	15,6	15,3	12,7	24,2	20,3	21,5	23,8	26
Rb	0,5	0,5	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	110
Sc	16	16	11	9	18	14	32	24	12	26	8	9	7
Sn	8	7	4	2	2	3	3	2	3	5	4	4	2,5
Sr	57,6	74,3	35,8	20,1	15,4	18,5	10,7	7,9	11,0	13,0	11,2	12,6	316
Ta	3,1	3,2	1,8	1,2	1,0	1,3	1,3	0,9	1,7	1,4	1,7	1,5	1,5
Th	45,2	44,2	34,6	30,0	34,0	31,8	50,2	47,7	35,3	46,4	21,7	22,4	10,3
U	3,8	4,0	2,5	1,9	3,2	3,1	7,9	5,6	2,7	6,5	2,3	2,2	2,5
V	261	284	408	418	908	554	1429	1743	314	663	102	103	53
W	4,2	3,6	5,7	2,6	1,9	2,8	2,0	1,3	3,4	3,2	2,6	2,8	1,4
Y	28,5	27,1	16,4	12,7	8,4	10,0	15,4	10,1	15,0	17,5	12,3	13,0	20,7
Zr	964,4	904,4	638,7	484,0	339,9	384,0	502,6	402,0	671,1	561,1	544,5	553,6	237
Ag	<0,1	<0,1	<0,1	0,2	0,4	0,3	0,7	0,5	0,4	0,3	0,1	<0,1	0,055
As	1,6	1,8	6,2	6,2	11,9	7,3	8,3	8,1	8,4	7,6	1,0	1,1	2
Au	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,6	<0,5	1,5	<0,5	1,1	<0,5	<0,5	0,9	0,0025
Bi	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,7	0,5	0,6	0,7	0,1	0,2	0,123
Cd	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,102
Cu	3,4	6,1	5,0	5,0	13,6	8,7	25,5	15,0	4,7	38,0	0,8	1,0	14,3
Hg	0,04	0,05	0,07	0,10	0,45	0,25	0,43	0,58	0,21	0,31	0,09	0,11	0,056
Mo	0,7	0,9	1,4	1,3	2,1	1,6	4,1	3,3	1,7	2,7	0,2	0,3	1,4
Ni	1,4	2,4	0,6	0,4	0,9	0,7	1,0	1,3	0,5	1,6	0,3	0,4	18,6
Pb	7,8	10,1	10,3	8,2	11,5	10,0	20,9	17,3	6,6	20,3	1,1	1,2	17
Sb	0,2	0,3	0,7	0,6	1,0	0,7	1,7	1,7	1,0	1,3	0,1	0,1	0,31
Se	<0,5	<0,5	<0,5	0,6	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,083
Zn	3	3	2	2	6	4	8	7	1	9	<1	<1	52

Tabela 2 (continuação). Composição química total do perfil laterítico bauxítico da lavra piloto Décio. Os teores de CaO e Na₂O (< 0,01%); de Ni (< 20 ppm); de Cd e Tl (< 0,1 ppm), estão abaixo do limite de detecção; (1) Composição média da Crosta Terrestre segundo Wedepohl (1995).

Horizonte	HAB		HB		CFA		CFAD		HEFA		HBN		Média crustal ¹
Perfil	Perfil 4		Perfil 3	Perfil 4	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 3	Perfil 4	
Amostra	DEC-04	DEC-01	DEC-27	DEC-34	DEC-28	DEC-35	DEC-30	DEC-37	DEC-31	DEC-38	DEC-32	DEC-39	
Profund. (m)	17,6	16,7	16,25	16,1	15,5	15,1	14,45	13,7	13,6	12,45	13,1	12,1	
La	71,2	92,4	56,3	30,6	24,1	29,0	20,4	15,3	14,3	21,2	13,9	14,1	32,3
Ce	102,8	135,5	65,2	35,9	25,6	30,7	30,6	16,3	24,6	47,4	22,3	23,4	65,7
Pr	9,53	12,01	5,74	3,13	2,63	3,07	3,41	2,00	2,10	3,96	1,91	2,01	6,3
Nd	26,4	33,6	15,8	9,2	7,9	8,3	11,5	6,7	6,6	14,8	5,5	6,4	25,9
Sm	3,57	5,03	2,16	1,27	1,28	1,26	2,84	1,30	1,36	3,42	1,01	1,17	4,7
Eu	0,81	1,05	0,46	0,29	0,26	0,27	0,61	0,30	0,36	0,77	0,25	0,27	0,95
ΣETRL	214,31	279,59	147,66	80,39	61,77	72,60	69,36	41,90	49,32	91,55	44,87	47,35	-
Gd	3,98	4,78	2,35	1,50	1,22	1,42	2,66	1,43	1,69	3,42	1,39	1,39	2,8
Tb	0,74	0,79	0,43	0,28	0,23	0,26	0,48	0,27	0,34	0,60	0,29	0,30	0,5
Dy	4,96	4,91	3,00	1,84	1,43	1,94	3,14	1,95	2,70	3,62	2,04	2,25	2,9
Ho	1,08	1,08	0,64	0,48	0,33	0,41	0,66	0,39	0,60	0,79	0,45	0,50	0,62
Er	3,68	3,59	2,05	1,54	1,11	1,36	2,29	1,35	2,07	2,78	1,79	1,74	2,1
Tm	0,61	0,60	0,37	0,28	0,19	0,22	0,32	0,24	0,35	0,41	0,30	0,31	0,3
Yb	4,55	4,30	2,68	1,86	1,49	1,73	2,45	1,77	2,70	2,91	2,26	2,18	1,5
Lu	0,74	0,67	0,43	0,30	0,24	0,25	0,37	0,27	0,37	0,44	0,36	0,37	0,27
ΣETRP	20,34	20,72	11,95	8,08	6,24	7,59	12,37	7,67	10,82	14,97	8,88	9,04	-
ΣETR (Total)	234,65	300,31	159,61	88,47	68,01	80,19	81,73	49,57	60,14	106,52	53,75	56,39	-
Al ₂ O ₃ /TiO ₂ .10	1,46	1,54	3,39	4,66	3,73	3,40	2,90	3,23	4,05	3,89	5,02	4,99	-
(TiO ₂ /Zr).1000	2,46	2,54	2,05	1,71	1,97	2,16	1,47	1,59	1,76	1,71	2,09	2,08	-
Zr/U.100	2,54	2,26	2,55	2,55	1,06	1,24	0,64	0,72	2,49	0,86	2,37	2,52	-
Zr/Y.10	3,38	3,34	3,89	3,81	4,05	3,84	3,26	3,98	4,47	39,80	4,43	32,06	-
Zr/Hf	38,89	37,22	38,25	40,00	37,77	38,02	38,96	38,29	41,17	39,51	39,17	41,31	-
Nb/Ta	14,97	13,47	13,94	12,92	12,80	12,00	11,77	14,11	14,24	14,50	12,65	15,87	-
Th/U	11,89	11,05	13,84	15,79	10,63	10,26	6,35	8,52	13,07	7,14	9,43	10,18	-
Zr/Th	21,34	20,46	18,46	16,13	10,00	12,08	10,01	8,43	19,01	12,09	25,09	24,71	-
ΣETRL/ΣETRP	10,54	13,49	12,36	9,95	9,90	9,57	5,61	5,46	4,56	6,12	5,05	5,24	-
(La/Lu)N	9,82	14,07	13,36	10,41	10,25	11,84	5,63	5,78	3,94	4,92	3,94	3,89	-
EuN/Eu*	0,65	0,65	0,62	0,64	0,63	0,61	0,67	0,67	0,73	0,68	0,64	0,65	-
CeN/Ce*	0,83	0,85	0,71	0,71	0,64	0,64	0,81	0,61	0,96	1,16	0,91	0,93	-

A figura 18 sumariza a distribuição dos teores dos elementos químicos mais abundantes, que constituem a mineralogia do perfil laterito-bauxítico com um todo, permitindo distinguir as diferenças marcantes ou similitudes entre eles, conforme apresentado anteriormente.

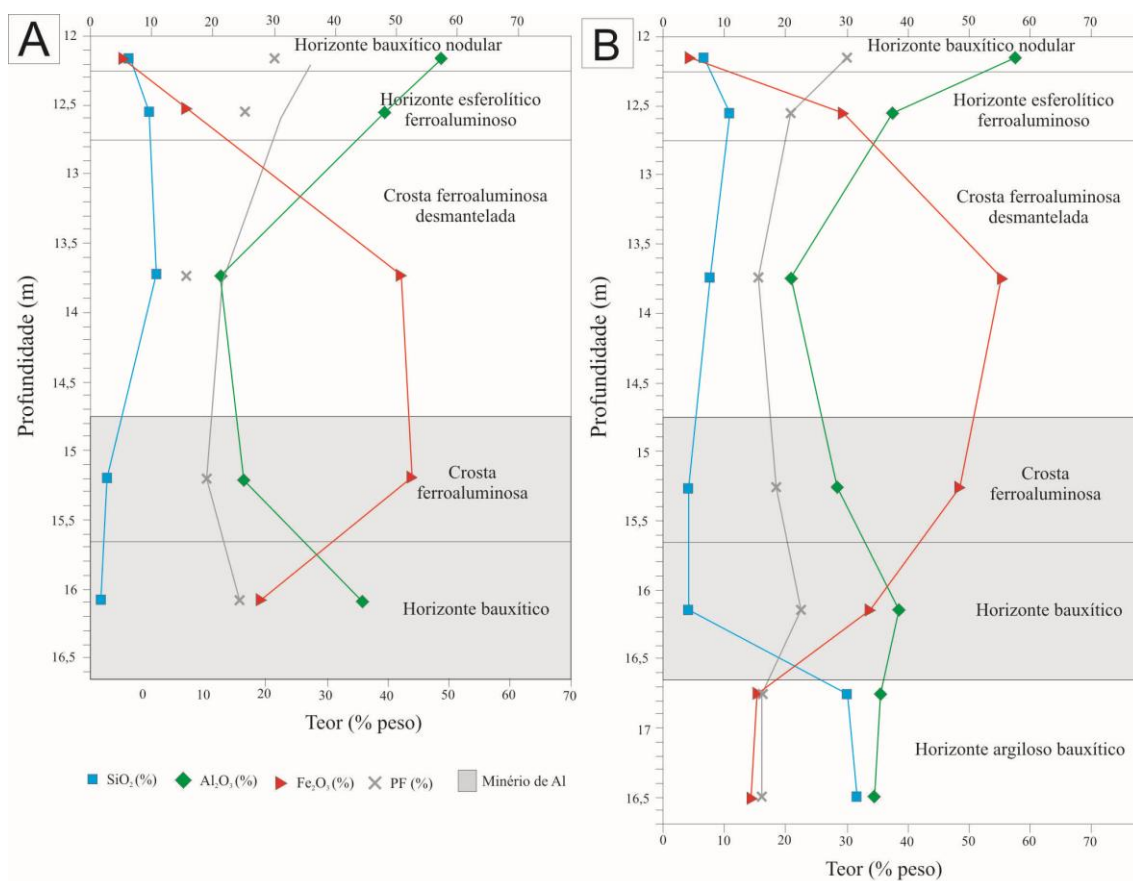


Figura 18. A) Distribuição dos teores dos elementos químicos principais (em óxidos) do perfil 3. B) Distribuição dos teores dos elementos químicos principais (em óxidos) do perfil 4. Apenas no perfil 4 foi amostrado e analisado o HAB.

4.2.2 Elementos-traço

O perfil laterito-bauxítico investigado da mesma forma que para os elementos maiores, apresenta grande variação nas concentrações dos elementos-traço analisados. Quando comparados com os valores médios da crosta superior da Terra, elementos como V, Cr, Ga, Zr, Nb, Sn, Sb, Hf, Ta, W, Hg, Bi, Th e U estão mais concentrados em todos os horizontes (Figura 19A). Por outro lado, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Y, Ba estão em níveis inferiores e Nb, Mo, As, Sn, Sb, Pb e ETR apresentam-se em valores que se estendem de níveis inferiores a superiores a essa média crustal, em que os valores mais baixos são representados, principalmente pelo HBN, ao topo, e os mais elevados pelas crostas ricas em ferro.

As curvas de distribuição dos valores normalizados a média da crosta superior da Terra (Figura 19A) mostra um forte paralelismo entre todos os horizontes, quebrado apenas pelos elementos Nb, Mo, As, Sn, Sb, Pb e ETR. Isso sugere que os horizontes guardem entre si forte afinidade química, indicando que a sua formação também está fortemente conectada. Os teores de Be, Zn, Au e Ag encontram-se abaixo do limite de

detecção em parte do perfil, enquanto Cs, Ni, Rb, Cd, Se e Tl estão abaixo deste limite no seu todo.

Quando as concentrações dos elementos-traço são normalizadas pelos os valores do HAB observa-se que os demais horizontes (HBX, CFA, CFAD e HEFA) apresentam notável paralelismo entre si, com exceção do HBN (Figura 19B). Isto sugere que esses horizontes e o HAB de fato estão fortemente interligados, enquanto o HBN parece se comportar como uma unidade a parte.

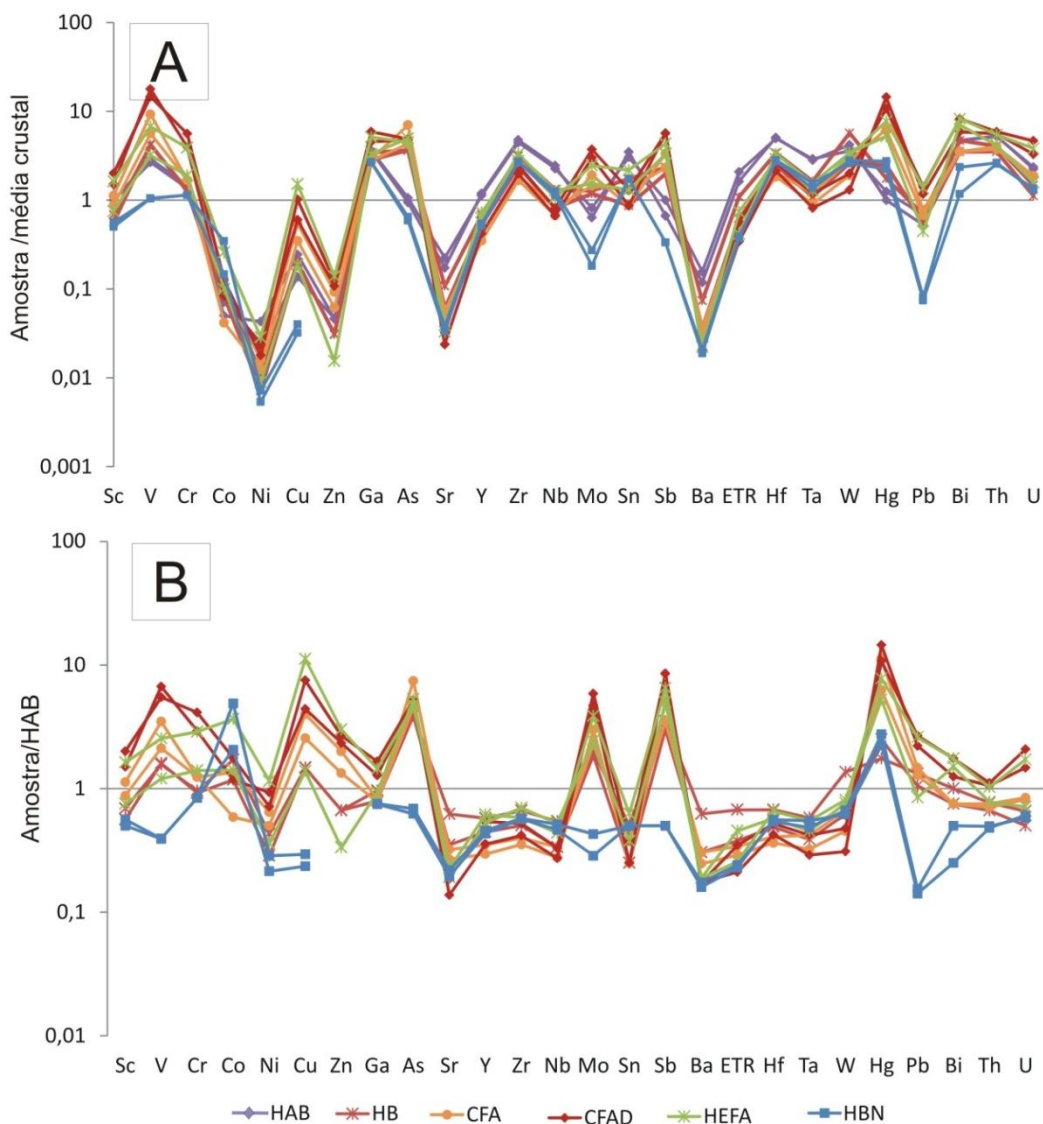


Figura 19. Distribuição das concentrações dos elementos-traço normalizados pela média da crosta superior da Terra (A) e pelo HAB (B).

Os elementos que estão mais enriquecidos no perfil em relação ao HAB são V, Co, Cr, Cu, Mo, As, Hg e Sb, que encontram paralelismo apenas com os teores de ferro. Segundo McLennan *et al.* (1980) esses elementos são geralmente capturados pelos óxidos de ferro. De fato suas maiores concentrações estão nos horizontes ricos em

goethita e hematita (Tabela 2), reforçados pelas fortes correlações positivas entre estes elementos e o Fe_2O_3 (Figura 20).

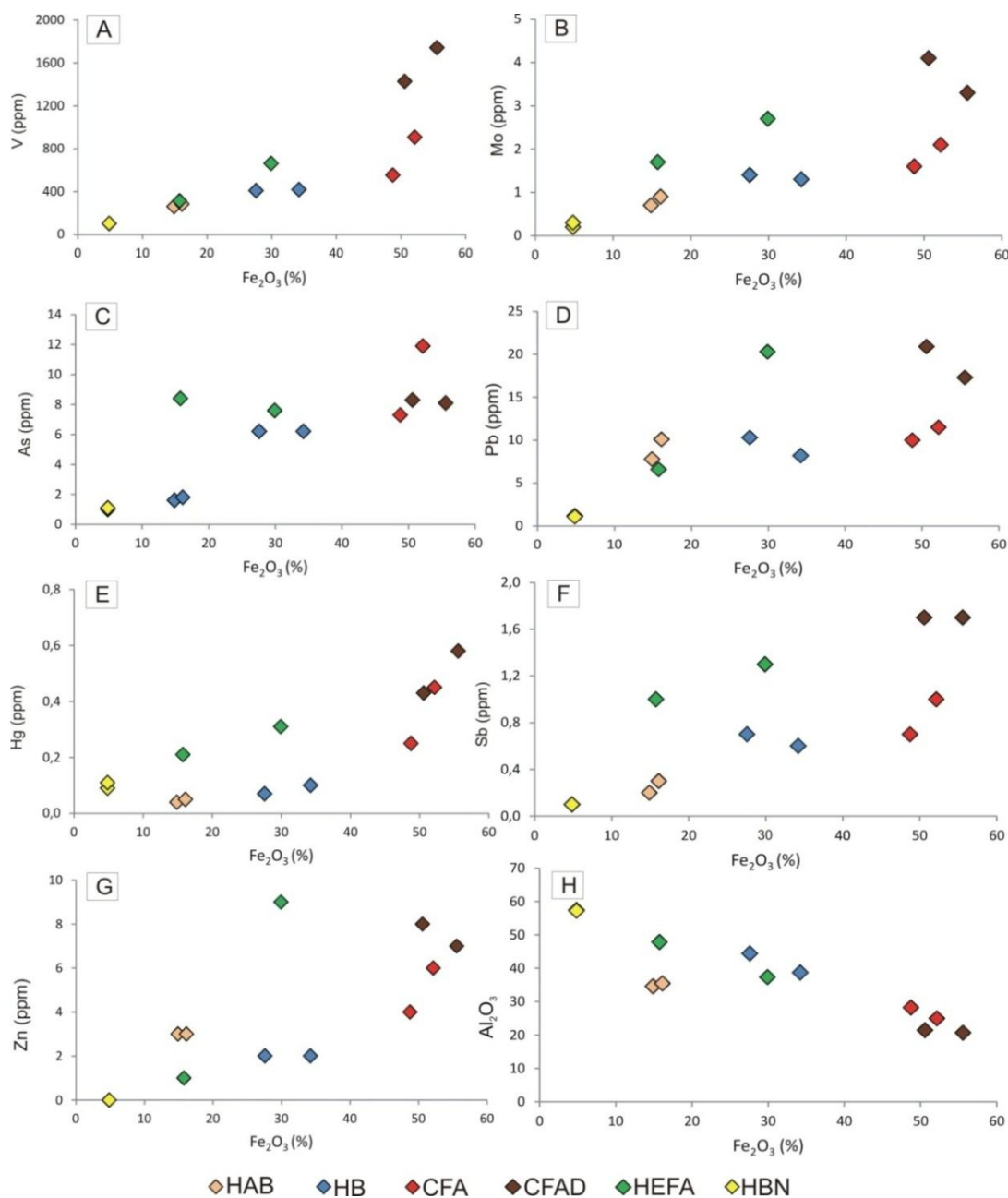


Figura 20. Diagramas de dispersão mostrando a afinidade do ferro com alguns elementos traço e correlação negativa com o alumínio: A) Fe_2O_3 x V; B) Fe_2O_3 x Mo; C) Fe_2O_3 x As; D) Fe_2O_3 x Pb; E) Fe_2O_3 x Hg; F) Fe_2O_3 x Sb; G) Fe_2O_3 x Zn; H) Fe_2O_3 x Al_2O_3 .

Por sua vez, Zr, ETR, Nb, Ta, Y, Hf, Th e U estão mais concentrados no HAB, o que não é normal em uma evolução laterítica, cujos valores tendem a aumentar para o topo do perfil. Como zircônio tende a formar seu próprio mineral, que como será demonstrado adiante, é o mineral pesado mais abundante em todo perfil, principalmente no HAB, admite-se que este mineral seja o principal carreador de ETR, Nb, Ta, Y, Hf, Th e U, reforçado pela forte correlação positiva entre si (Figura 21A-E), e que esse

horizonte tenha sido formado a partir de litologias ligeiramente distintas daquelas que formaram os horizontes superiores. O Anexo C apresenta matriz de correlação que também demonstra a forte afinidade entre os elementos citados.

As razões Nb/Ta, variam de 11,77 a 15,87, com média de 13,60 (Tabela 2), que é normalmente encontrada nos zircões em geral (Barros *et al.* 2005). A correlação linear positiva desses elementos com TiO_2 sugere por outro lado que eles possam ser carreados pelos minerais de TiO_2 , possivelmente o anatásio (Figura 21F).

As razões Zr/Hf no perfil laterito-bauxítico variam de 37,2 a 41,3 - com média de 39,05 (Tabela 2) - que se equivale àquela da média da crosta superior da Terra. Essas razões quase constantes permitem pensar que os zircões presentes devem provir em sua maior parte de protólitos rochosos semelhantes e equivalentes a composição de rochas da crosta superior da Terra, rocha ácidas a intermediárias e/ou suas equivalentes metamórficas e/ou sedimentares. Razões semelhantes a estas na lavra piloto Ciríaco, também localizada no domínio de Rondon do Pará, foram somente encontradas na Cobertura Argilosa, a denominada Argila de Belterra (valor médio Zr/Hf= 37,1), que não foi analisada neste trabalho, e também nas rochas sedimentares intemperizadas da Formação Itapecuru, valor médio Zr/Hf= 38,5 porém distante da lavra Décio, ao longo da BR-222 Km 130, enquanto as razões no perfil laterítico-bauxítico de Ciríaco são muito variáveis, Zr/Hf: 23,0 a 88,8 (Pantoja 2015). No entanto as razões encontradas em Décio são compatíveis com as dos horizontes CFA (Zr/Hf= 35,8) e HEF (Zr/Hf = 35,0), conforme os dados básicos de Pantoja (2015). Por outro lado padrão similar ao do Décio foi observado por Costa *et al.* (2014) nos depósitos de bauxita de Juruti, formados sobre litologias da Formação Alter do Chão, representados por argilitos e siltitos. Portanto o perfil laterito-bauxítico Décio, embora na mesma região, não parece ter sido originado de litologias idênticas as do Ciríaco, ou então as áreas fontes das rochas sedimentares de Ciríaco envolveram zircões de assinaturas distintas.

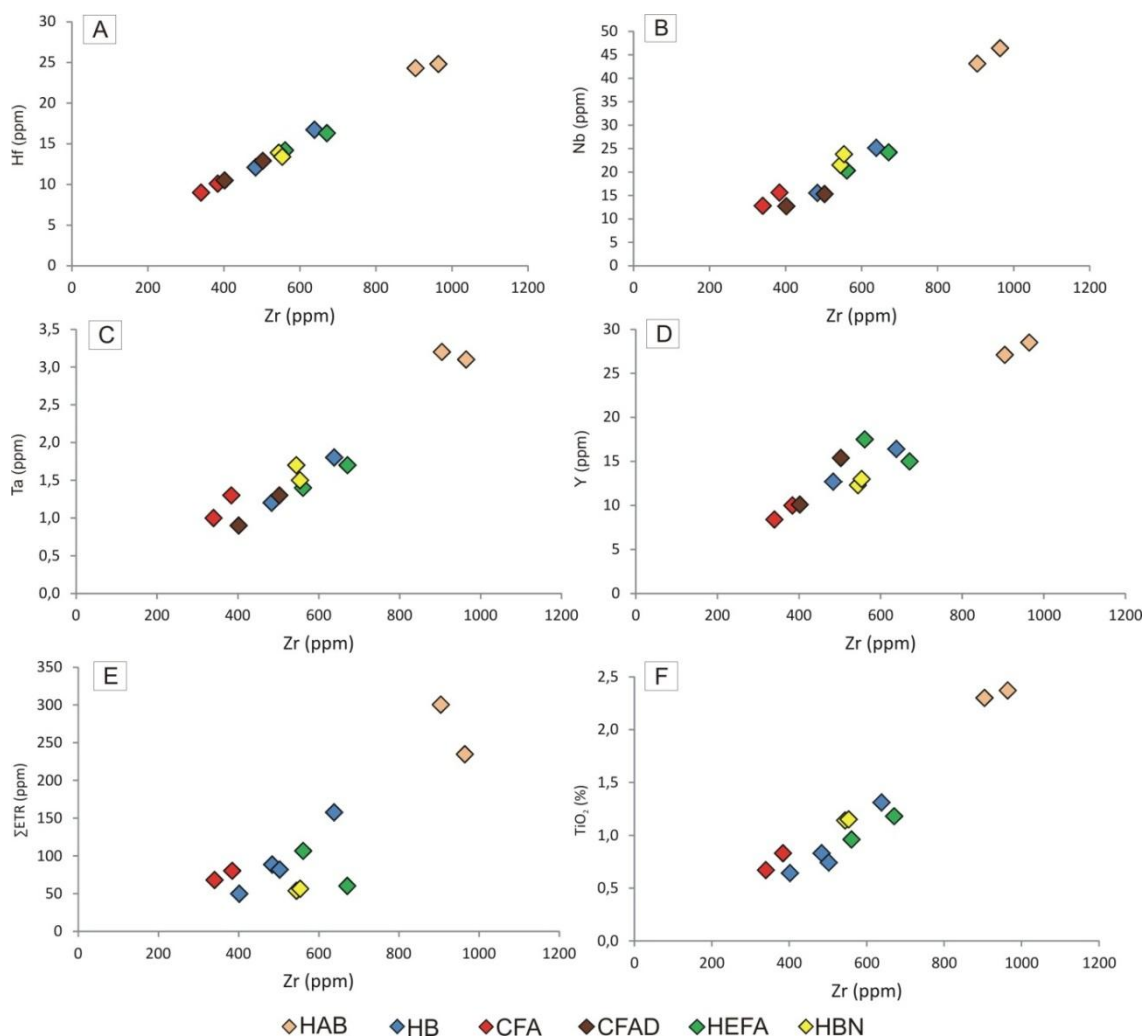


Figura 21. Diagramas de dispersão mostrando a afinidade do zircônio com alguns elementos traço e com o titânio: A) Zr x Hf; B) Zr x Nb; C) Zr x Ta; D) Zr x Y; E) Zr x Σ ETR; F) Zr x TiO₂.

4.2.3 Elementos Terras Raras

O teor dos Σ ETR se encontra em nível da crosta da Terra na base do perfil e diminui drasticamente para o topo, sendo essa diminuição mais drástica para os ETRL, demonstrada pelas razões ETRL/ETRP, La/Lu (Tabela 2), de forma oposta ao que se observa em perfis lateríticos na Amazônia (Kotschoubey *et al.* 2005; Horbe & Anand 2011). Essas características podem sugerir que os horizontes se estabeleceram sobre rochas com minerais de ETR distintos ou ainda com concentrações distintas de zircão, o único mineral de ETR plausível encontrado no perfil. Aliás, é forte a correlação positiva Zr x ETR ao longo do perfil, quando se demonstrou que os teores de Zr também se comportam de forma adversa a dos perfis laterito-bauxíticos derivado de uma mesmo protólito. Quando normalizados aos condritos ou média da Crosta da Terra as curvas de distribuição resultantes sugere similaridades parcial entre os horizontes, mas percebe claramente o relativo e gradual enriquecimento dos ETRP diante dos ETRL (Figura

28A e B). As anomalias de Ce CeN/Ce*, comuns nos perfis lateríticos, também não foram observadas, exceto sutilmente no HEFA (CeN/Ce*=1,16), apenas a negativa de Eu, a qual varia de 0,64 (HBN) a 0,72 (EFA) que pode ser relacionada ao zircão, de origem ígnea, incorporada nas rochas sedimentares.

Se normalizados ao HAB é nítida a diminuição dos valores ao longo do perfil laterítico-bauxítico, mas que se tornam mais elevados nos horizontes superiores, em especial os ETRP; também se destaca a ausência de paralelismo entre os horizontes, como levantado anteriormente (Figura 22).

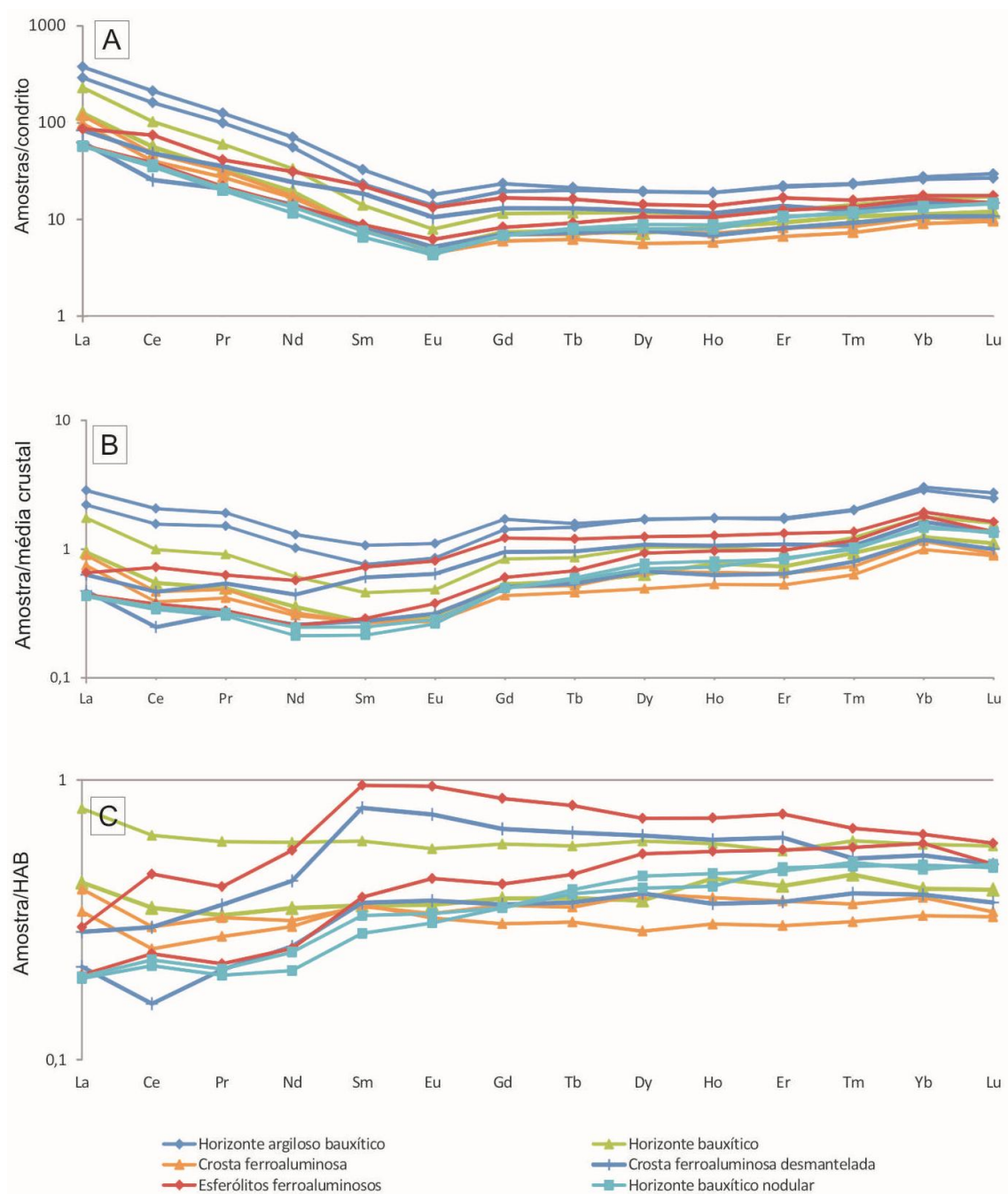


Figura 22. Padrão de distribuição dos ETR por horizonte do perfil laterítico da lavra piloto Décio: A) normalizado pelos condritos analisados por Evensen *et al.* (1978). B) Normalizados pela média crustal de Wedepohl (1995). C) Normalizados pelo HAB.

4.3 OS MINERAIS PESADOS DO PERFIL LATERÍTICO E DA COBERTURA ABT

Os minerais pesados identificados no perfil laterítico e na cobertura argilosa foram em ordem decrescente de abundância zircão, turmalina, rutilo e, localmente a cianita. Os três primeiros se encontram nas frações areia fina e muito fina e o último, na areia média. São eles minerais reconhecidamente ultraestáveis (zircão, turmalina e rutilo = ZTR), que inclusive resistiram às condições do intemperismo laterítico. Se ocorreram minerais menos estáveis ou instáveis, os mesmos foram decompostos ou possivelmente já estavam ausentes na rocha precursora do perfil conforme Costa 2005. Esses minerais ultraestáveis foram identificados em todos os horizontes do perfil lateríticos e inclusive na cobertura, enquanto a cianita foi por enquanto observada apenas no Horizonte Bauxítico Nodular, e como dito, bem menos frequente (Figura 23). Pantoja (2015) identificou no perfil laterito-bauxítico da lavra piloto Ciríaco uma assembleia semelhante de minerais pesados, com o domínio de zircão em todos os horizontes, seguido de turmalina e rutilo. A diferença ficou por conta da ausência de cianita e presença da estauroлита, embora restrita ao horizonte bauxítico, horizonte esferolítico ferroaluminoso e Argila de Belterra.

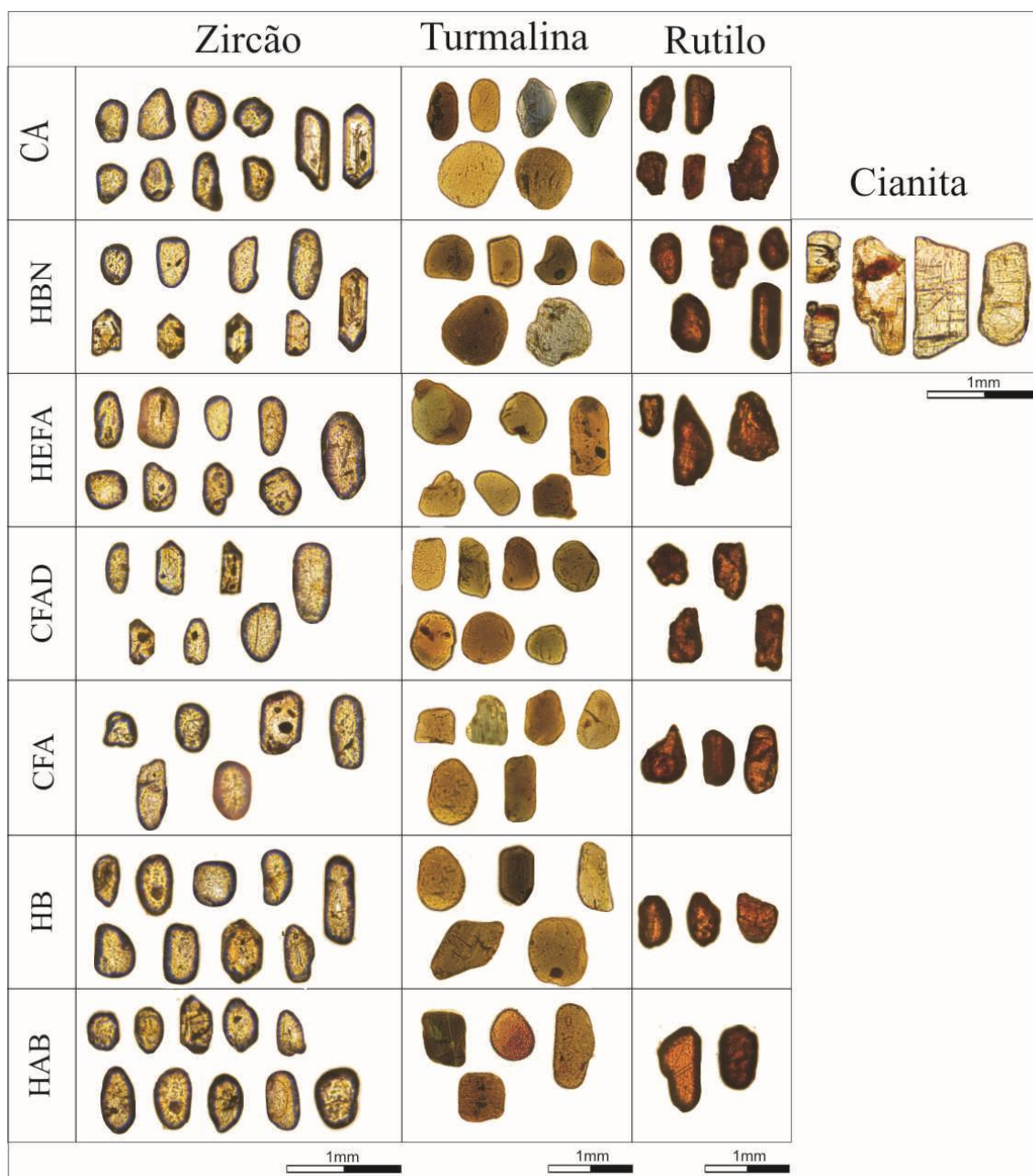


Figura 23. Morfologias de zircão, turmalina, rutilo e cianita identificadas no perfil laterito-bauxítico da lavra piloto Décio (nódulos paralelos) e na cobertura, Argila de Belterra.

O zircão é o mineral mais abundante em todos os horizontes estudados e apresenta distribuição bastante homogênea (91% no HAB, 83% no HBX, 69% na CFA, 79% na CFAD, 83% no HEFA, 85% no HBN e 80% na ABT). A turmalina por sua vez apresenta distribuição mais irregular do seu conteúdo ao longo do perfil (5% no HAB, 15% no HBX, 26% na CFA, 6% na CFAD, 7% no HEFA, 6% no HBN e 18% na ABT). O rutilo, terceiro mineral pesado mais abundante, da mesma forma que a turmalina apresenta distribuição irregular ao longo do perfil (4% no HAB, 2% no HBX, 5% na CFA, 15% na CFAD, 10% no HEFA, 7% no HBN e 2% na ABT). A cianita, com 2%, está restrita ao HBN (Figura 24). A ligeira homogeneidade na distribuição do zircão,

principalmente, sugere que os horizontes do perfil laterito-bauxítico derivaram de rochas de igual composição ou procedência.

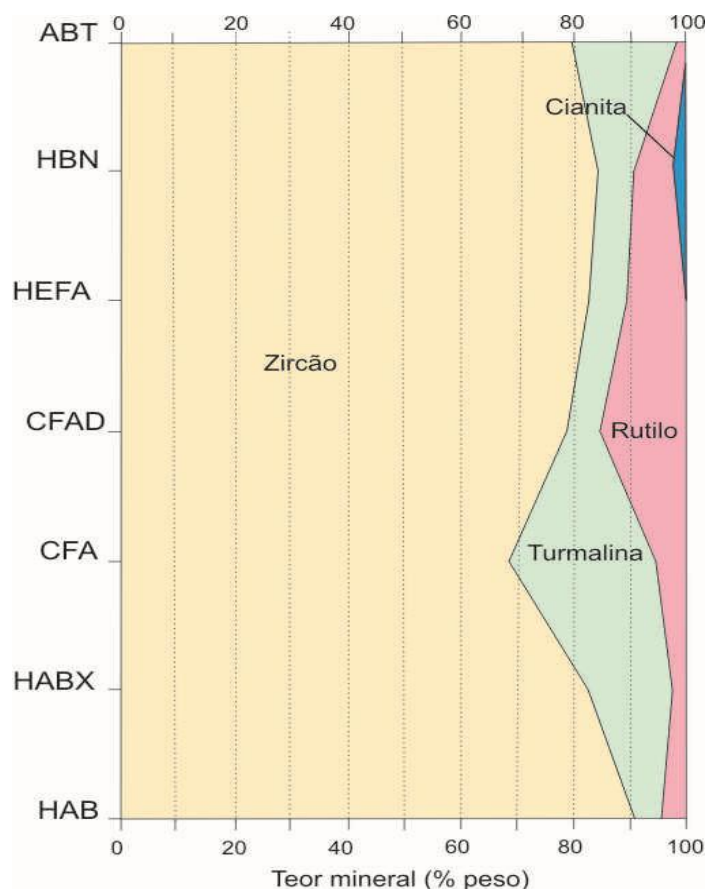


Figura 24. Distribuição da frequência dos minerais pesados não opacos no perfil laterito-bauxítico da lavra piloto Décio e sua cobertura.

Os grãos de zircão são incolores (dominantes), castanhos e amarelos e formam dois grupos quanto a morfologia: os arredondados e os angulosos a subangulosos. Ambos apresentam baixa esfericidade. O primeiro grupo é o mais abundante e representa 82% dos minerais pesados no HAB, 75% no HBX, 95% na CFA, 62% na CFAD, 68% no HEFA, 95% no HBN e 85% na ABT. Já o grupo de zircões angulosos a subangulosos inclui grãos que preservam ainda a morfologia dos cristais, sendo possível observar prismas curtos ou longos com terminações bipiramidais. Sua abundância é de 18% no HAB, 25% no HBX, 5% na CFA, 38% na CFAD, 32% no HEFA, 5% no HBN e 15% na ABT raramente são euédricos. Sob o microscópio ótico é possível observar inclusões mineralógicas não identificadas em ambos os grupos (Figura 23).

Os zircões arredondados mostram feições superficiais típicas de trabalho mecânico tais como fraturas conchoidais e superfícies de abrasão, características essas verificadas em todos os horizontes e ainda na cobertura argilosa (Figura 25A-L).

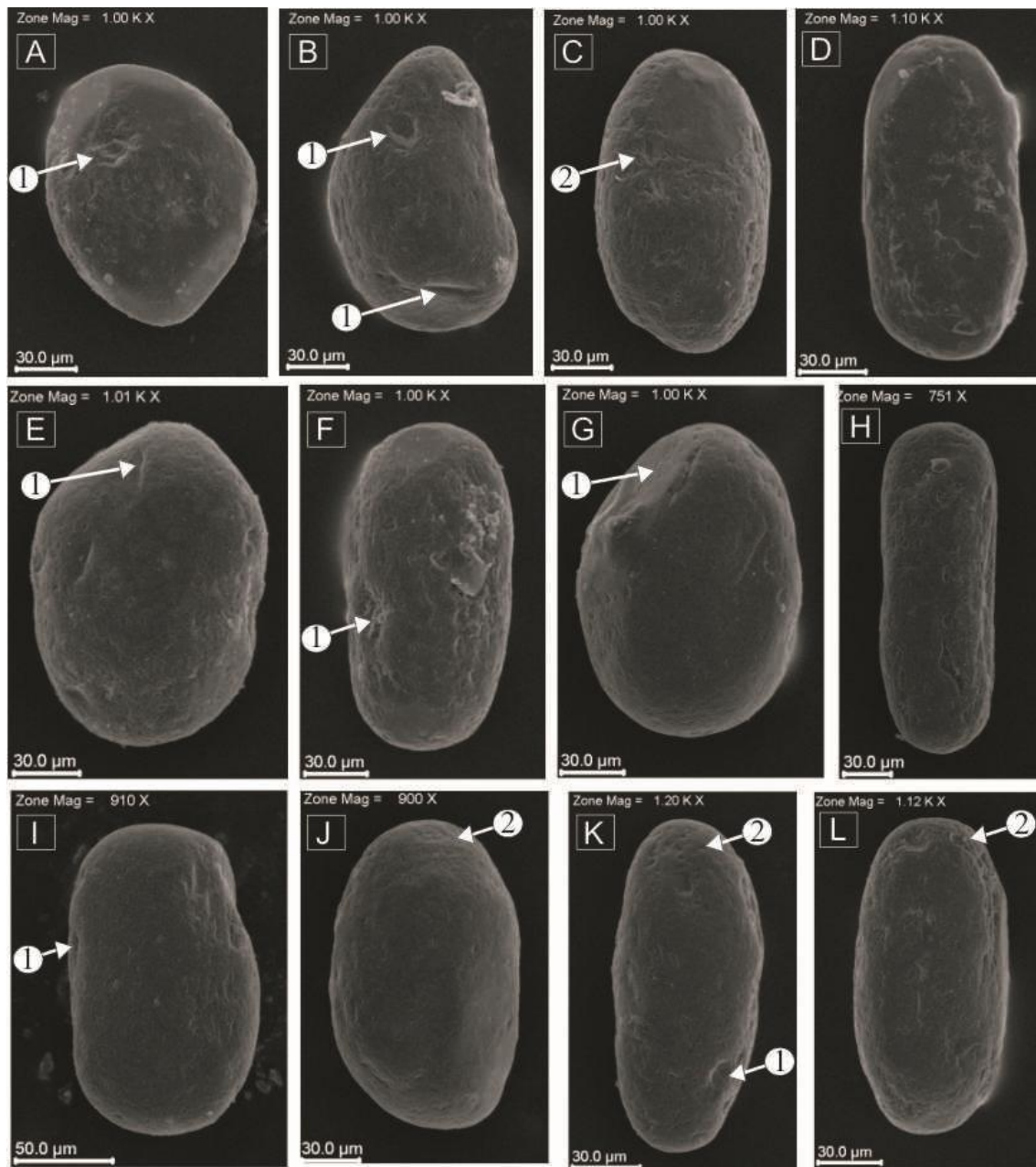


Figura 25. Imagens de MEV (elétrons secundários) dos zircões arredondados, os mais abundantes no perfil laterito-bauxítico da lavra piloto Décio. A e B) zircões do horizonte argiloso bauxítico. C e D) Zircões do horizonte bauxítico. E e F) Zircões da crosta ferroaluminosa. G e H) Zircões da crosta ferroaluminosa desmantelada. I e J) Zircões do horizonte esferolítico ferroaluminoso (matriz argilosa). K) Zircões do horizonte bauxítico nodular (matriz argilosa). L) Zircões da Argila de Belterra. 1 – Fratura conchoidal. 2 – Superfície de abrasão.

No segundo grupo de zircões (angulosos e subangulosos) as texturas superficiais mais comuns são fraturas conchoidais, arestas suavemente abauladas e indícios de ruptura, que contrastam com as faces cristalinas ainda relativamente preservadas. As diferentes formas destes cristais indicam origens distintas, com diferentes tempos e temperaturas de cristalização, conforme a sua inserção na classificação de Pupin (1980), em que se encontraram formas dos cristais equivalentes

aos grupos D, G1, P1, P2, P4, S05, S15, S23, que equivalem a zircões cristalizados a 600°C (G1), 650°C (P1 e S05), 700°C (P2), 750°C (S15), 800°C (P4), 850°C (S23) e 900°C (D) Figura 26A-L.

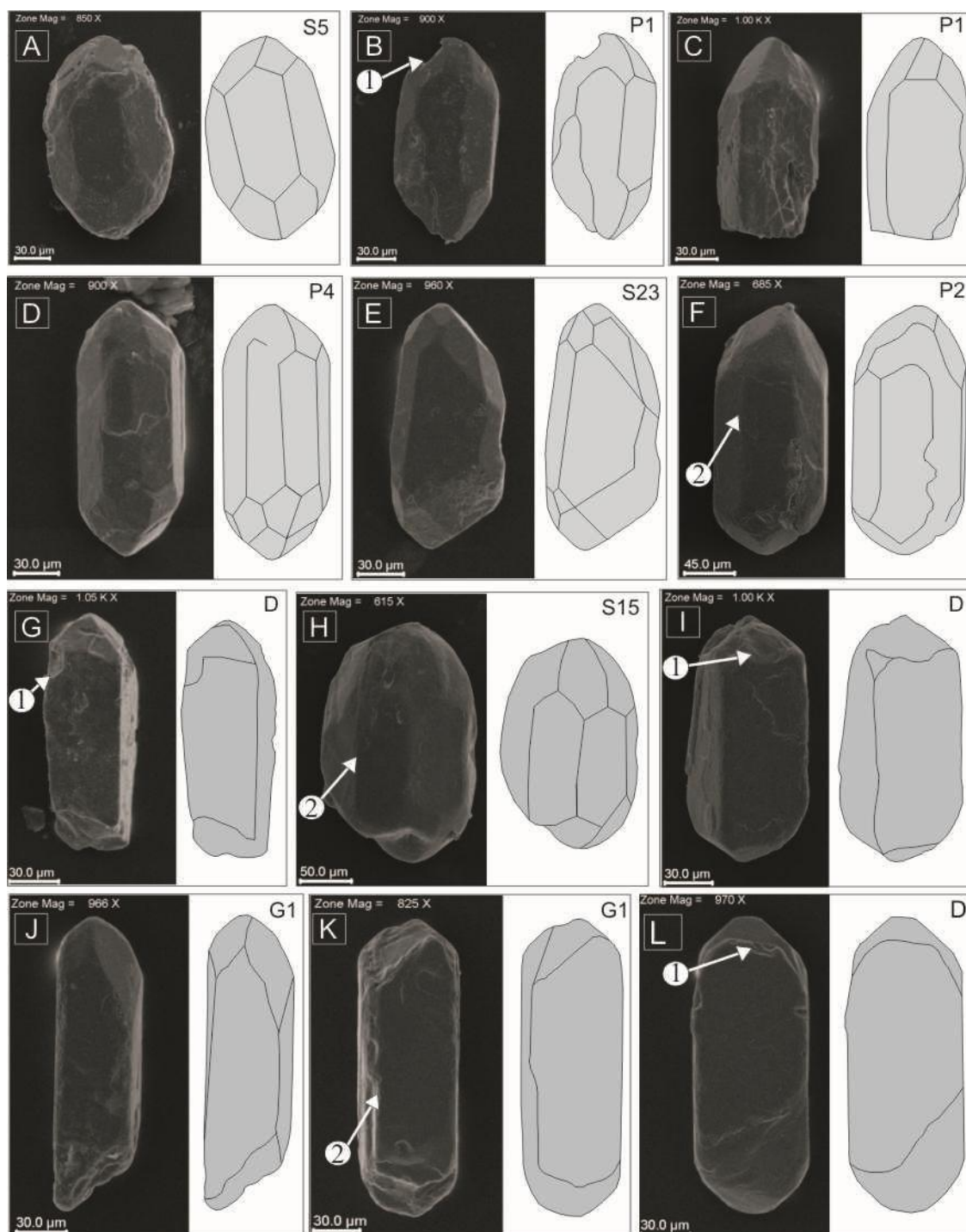


Figura 26. Imagens de MEV (elétrons secundários) dos zircões angulosos a subangulosos, respectiva possível morfologia dos cristais originais e sua equivalência a classificação de Pupin (1980). A e B) Zircões do horizonte argiloso bauxítico. C e D) Zircões do horizonte bauxítico. E e F) Zircões da crosta ferroaluminosa. G) Zircões da crosta ferroaluminosa desmantelada. H) Zircões do horizonte esferolítico ferroaluminoso (matriz argilosa). I, J e K) Zircões do horizonte bauxítico nodular (matriz argilosa). L e M) Zircões da Argila de Belterra. 1 – Fratura conchoidal. 2 – Arestas abauladas.

A turmalina ocorre em grãos arredondados, predominantemente esféricos e restritamente alongados com terminações abauladas. As cores variam de verde (dominante) a marrom, amarelo e raramente azul com bordas suavemente retrabalhadas (Figura 23). Ao MEV, as principais feições superficiais são fraturas conchoidais e superfícies de abrasão (Figura 27A-K).

O rutilo se apresenta em grãos alongados, por vezes facetados, sendo geralmente de contorno irregular. As cores variam de vermelho claro a vermelho amarronzado. São comuns as fraturas conchoidais e estrias de abrasão (Figura 27L - N). A cianita apresenta-se alongada, preservando faces do prisma (Figura 27O e P), é incolor a amarelada e é possível reconhecer os planos de clivagem {001}.

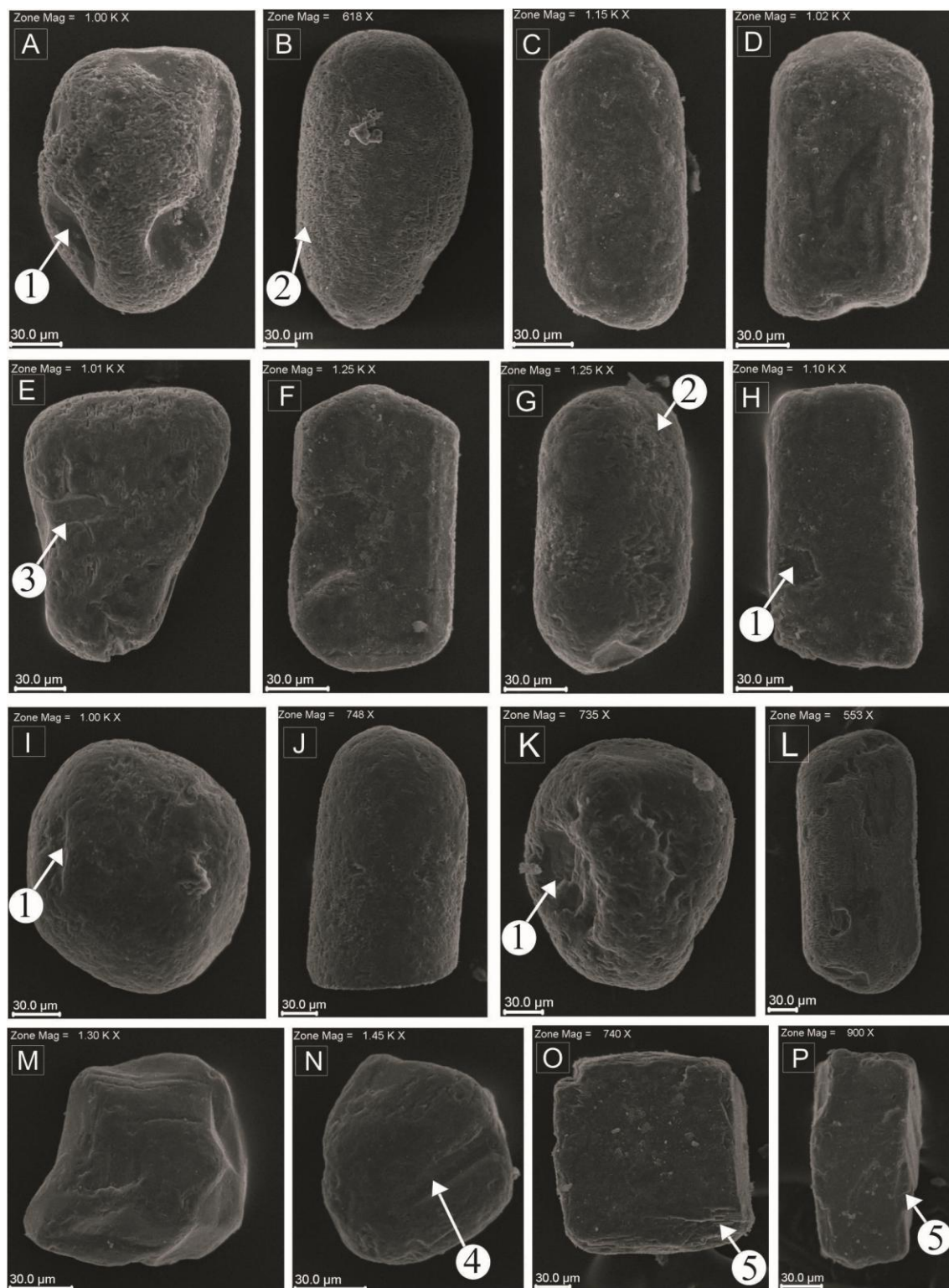


Figura 27. Imagens de MEV (elétrons secundários) das principais morfologias de turmalina, rutilo e cianita. A e B) Turmalinas do HAB. C e D) Turmalinas do HBX. E e F) Turmalinas da CFA. G e H) Turmalinas do HEFA (matriz argilosa). I e J) Turmalinas do HBN. K e L) Turmalinas da ABT. M e N) Rutilos do HEFA (matriz argilosa). O e P) Cianitas do HBN (matriz argilosa). 1 – Fratura conchoideal. 2 – cavidades. 3 – Fraturas. 4 – Estrias. 5 – Clivagem.

5 DISCUSSÕES

A lava piloto estudada expôs perfil laterito-bauxítico com sua cobertura, mas restrito ao topo do horizonte argiloso, portanto não se teve acesso ao substrato rochoso, nem mesmo ao saprólito. Os mapeamentos geológicos da região apontam a ocorrência dos quartzos-arenitos, siltitos e argilitos da Formação Itapecuru (Bizzi *et al.* 2003). Dentre os litotipos citados, as fácies argilosas seriam as únicas com composição química compatível com a formação de bauxitas.

Na lava piloto Décio identificou-se o HAB, que é constituído de caulinita, gibbsita e hematita, que poderia ser um produto do intemperismo dos argilitos da Formação Itapecuru. Enquanto a constituição mineralógica partir do HAB em direção ao topo mostra uma evolução típica de perfil laterítico derivado de possível mesmo protólito, os dados químicos, por sua vez sugerem que embora tenham sido protólitos sedimentares, os mesmos não eram quimicamente homogêneos. Isto fica muito bem demonstrado pelas concentrações dos elementos químicos e sua distribuição no perfil como um todo. Na classificação de Schellmann (1983) torna-se claro que apenas se está diante do topo do perfil, ao nível de lateritização moderada a forte (Figura 28A), correspondendo na formação de bauxita, bauxita pobre em ferro, bauxita ferruginosa e ferrito bauxítico, de acordo com a classificação de Bardossy (1982) (Figura 28B).

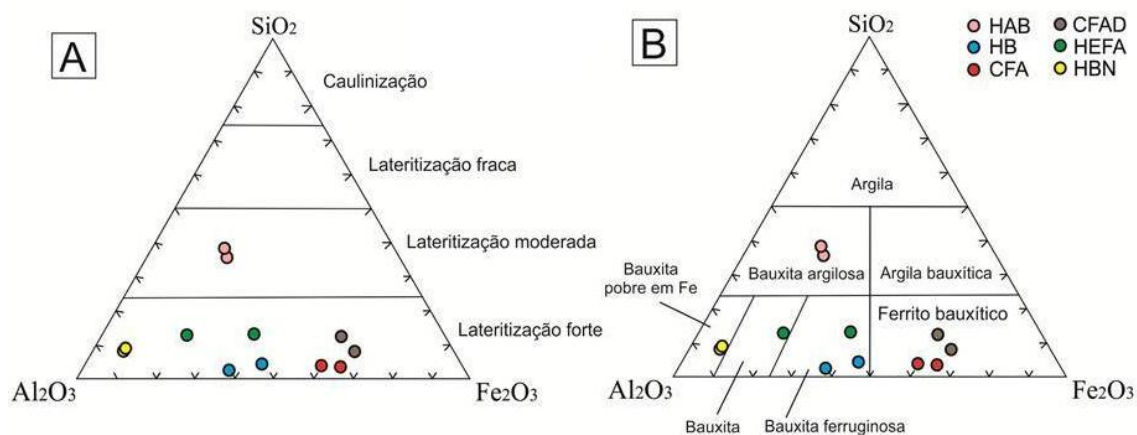


Figura 28. A) Intensidade da lateritização em cada horizonte, de acordo com Schellmann (1983). B) Classificação dos horizontes do perfil laterítico da lava piloto Décio baseada nos teores de Fe_2O_3 , SiO_2 e Al_2O_3 segundo Bardossy (1982).

Os teores elevados de Al_2O_3 e ainda de Fe_2O_3 sugerem a influência de rocha parental rica nestes elementos, e os teores de TiO_2 , relativamente baixo, ao lado das estruturas geológicas de campo, rochas sedimentares derivadas daquelas de natureza ácida a intermediária. Nesse contexto, os minerais neoformados foram goethita e a

hematita. Durante sua formação a goethita assimila à sua estrutura parte do alumínio liberado pela decomposição da caulinita, levando a formação de goethita aluminosa de cor amarelo ocre.

O presente trabalho caracterizou os horizontes, em princípio, considerados como constituintes do perfil laterito-bauxítico. Porém, a mineralogia e geoquímica do HBN indicam que este horizonte possui pouca relação com os horizontes que estão abaixo dele. Isto é indicado pelo balanço de massa, que demonstrou que, diferentemente dos demais horizontes, o HBN não experimentou aumento absoluto nos teores ferro. Além disso, o padrão de distribuição dos elementos traços se assemelha aos demais horizontes apenas quando normalizados pela média crustal. Já quando a normalização é baseada na composição do HAB, ocorre grande disparidade entre o HBN e os outros horizontes.

Esta característica é reforçada pelo fato de que acima da crosta ferroaluminosa desmantelada, o padrão de distribuição dos próprios elementos maiores se inverte. O Fe_2O_3 que aumentava da base para o topo, passa por forte diminuição. O Al_2O_3 , que aumenta do HAB em direção ao HB e depois diminui na CFA e CFAD, têm um novo aumento no topo do perfil, acompanhado pela PF. Desse modo, pode-se compartimentar o perfil estudado em duas partes. Na primeira, a basal, verifica-se um clássico padrão evolutivo laterítico. Na segunda, mais ao topo, compreendendo o HEFA e HBN, não se observa indícios de sua formação a partir do material sotoposto, como se dá como o HAB, que evolui para HB; e com o HB que converge para CFA e CFAD.

Os elementos traço tem sua distribuição controlada principalmente pelos oxi-hidróxidos de ferro e pelos minerais resistatos. As matrizes de correlação, corroboradas pelas análises de grupamento demonstram dois grupos principais de elementos com forte afinidade. O grupo I é composto por W, As, Th, Bi, Cu, Hg, V, Pb, Sb, Mo, U, Sc, Ga, Cr_2O_3 e Fe_2O_3 . Estes elementos são aqueles que apresentam afinidade com a estrutura dos oxi-hidróxidos de ferro, como em parte demonstrado pelos diagramas de dispersão (Figura 29). O grupo II é composto por Ni, Nd, Pr, Ce, La, Sr, Ba, Sn, Tb, Gd, Eu, Sm, Er, Ho, Dy, Lu, Yb, Tm, Y, Zr, Hf, Ta, Nb, TiO_2 , SiO_2 e carbono total. Estes elementos são os que tem afinidade com a estrutura do zircão, mineral que se concentra no perfil como resistato, a uma taxa similar ao do anatásio, o que explica a afinidade com o TiO_2 , como verificado por Costa (2014) e Santos *et al.* (2016).

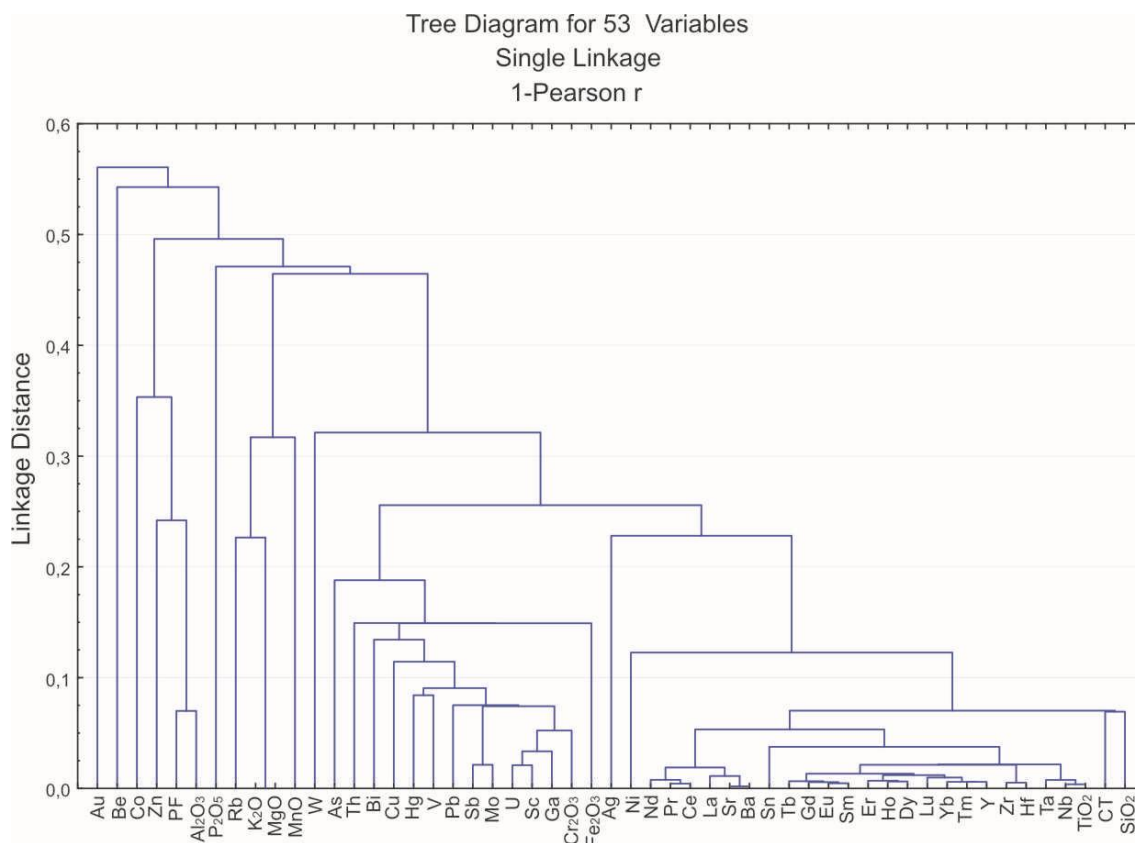


Figura 29. Análise de agrupamento dos elementos que compõem o perfil laterito-bauxítico da lavra piloto Décio.

A composição mineralógica e textural reflete a distribuição dos componentes químicos principais. A porosidade é elevada no HBX, CFA, CAD e nos esferólitos do HEFA. Este aspecto resulta da lixiviação da sílica tanto das caulinitas quanto de grãos de quartzo dissolvidos. Os oxi-hidróxidos de ferro são formados na superfície dessas cavidades como córtex, principalmente de goethita férrica, ou até preenchem-nas totalmente, originando nódulos hematíticos. E, a medida que a caulinita é dissolvida, surge espaço para um plasma ferruginoso criptocristalino que se associa aos mesocristais neoformados de gibbsita.

Esse produto inicial da lateritização passou por retrabalhamento in situ, via agentes biológicos, e/ou é transportado por curtas distâncias, de modo a originar esferólitos onde gibbsita mesocristalina é cimentada por plasma de oxi-hidróxido de ferro. A presença destes esferólitos é marcante em quase todo o perfil (HBX, CFA, CFAD). No HEFA os mesmos esferólitos estão presentes, porém, são envolvidos por uma matriz argilosa, o que sugere um novo ciclo de transporte, iniciado com o desmantelamento da crosta e consolidado com a formação de esferólitos.

A associação de minerais pesados identificada corresponde a fases ultraestáveis que demonstram forte similaridade ao longo do perfil, com diferença apenas no HBN,

onde além do zircão (mineral dominante) turmalina e rutilo, também foi identificada a cianita. Esta associação é similar tanto qualitativa quanto quantitativamente à identificada por Pantoja (2015) no perfil laterito-bauxítico da lavra piloto Ciriaco quanto aos minerais mais abundantes. A exceção é a ausência de cianita e presença de estauroлита. Nascimento & Góes (2007) identificaram a mesma associação de minerais pesados (turmalina, zircão, estauroлита, rutilo e cianita) em quartzo-arenitos da Formação Itapecuru, sendo que em sua associação a turmalina é o mineral mais abundante.

O depósito laterítico bauxítico Décio, Platô Rondon Sul, é muito semelhante aos outros dois depósitos bauxíticos mais conhecidos da Região Bauxitífera de Rondon, estes localizados no Platô Rondon Norte, Ciriaco (Pantoja 2015), e também se assemelha a grandes depósitos de bauxita já conhecidos na Amazônia, como Paragominas (Kotschoubey *et al.* 2005) e Juruti (Costa *et al.* 2014), Tabela 3. A cobertura argilosa pode ser correlacionada com a Unidade Argila de Belterra, que também ocorre sobre os perfis lateríticos bauxíticos de Trombetas, Paragominas e Juruti.

Por outro lado há ligeiras diferenças em relação ao protólito. Embora todos sedimentares, no caso do perfil laterítico de Décio, o perfil foi originado a partir de rochas sedimentares com diferentes composições, um primeiro litotipo com teores mais elevados de TiO_2 originou o HAB e um segundo, com teores mais baixos de TiO_2 originou o HBX, CFA, CFAD e HEFA. O HBN por sua vez aparentemente demonstra uma evolução distinta dos demais horizontes.

Tabela 3. Aspectos geológicos, mineralógicos e químicos do perfil laterito-bauxítico da lavra piloto Décio confrontados com outros depósitos da Região Bauxitífera de Rondon do Pará (Ciríaco e Branco) e da Província Bauxitífera Amazônica (Paragominas e Juruti); as informações destacadas em *itálico* e **negrito** são aquelas que diferem do depósito Décio; os teores de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , PF, SiO_2 e TiO_2 referem-se exclusivamente aos horizontes bauxíticos (HB); o símbolo (-) designa informações não disponíveis.

Região Bauxitífera	Rondon do Pará		Paragominas	Juruti
Depósito	Décio (Este trabalho)	Ciríaco (Pantoja 2015)	Kotschoubey <i>et al.</i> (2005)	Costa <i>et al.</i> (2014)
Horizontes	HAB, HB,CFA, CFAD, HEFA, HBN	HAB, HBX,CFA, CFAD, HEFA	Rocha-mãe, saprólito, Bauxita nodular inferior, bauxita maciça inferior, crosta ferruginosa, nódulos ferruginosos, concreções bauxíticas superiores, psólitos, bauxita porcelanada.	Horizonte argiloso mosqueado, HBX, CFA, HEFA, HBN.
Mineralogia	Gibbsita, caulinita, hematita, goethita, quartzo e anatásio.	Gibbsita, caulinita, hematita, goethita quartzo e anatásio.	Gibbsita, caulinita, hematita, goethita quartzo e anatásio.	Gibbsita, caulinita, hematita, goethita, quartzo e anatásio.
Minerais pesados	Zircão, turmalina, rutilo e cianita.	Zircão, turmalina, rutilo e estauroлита, cianita e granada.	-	-
Cobertura	Argila de Belterra (~12 m).	Argila de Belterra (~13,5 m).	Argila de Belterra.	Argila de Belterra (máximo de 17 m).
Al_2O_3 (%)	41,54	49,98	54,23	44,97
Fe_2O_3 (%)	30,92	12,90	9,2	23,08
SiO_2 (%)	2,93	7,10	7,00	7,39
TiO_2 (%)	1,07	2,66	1,47	1,9
PF (%)	23,3	26,93	27,72	22,6
Total	99,76	99,57	99,62	99,94

6 CONCLUSÕES

A grande variação na composição química dos horizontes em termos de elementos maiores reflete em parte a heterogeneidade composicional das rochas-mãe, o elevado grau de evolução da lateritização e as transformações pós-lateritização. As sequências argilosas da Formação Itapecuru, são possivelmente os materiais geológicos precursores do perfil estudado.

Os teores de TiO_2 são muito mais elevados no HAB que nos horizontes sobrejacentes, o que indica evolução laterítica a partir de protólito heterogêneo. Nesse sentido, há um contraste composicional entre as rochas geradoras do HAB e as dos demais horizontes. Além disso, Zr e ETR diminuem em direção ao topo do perfil, o que também não seria esperado em uma evolução laterítica a partir de precursor único e homogêneo.

Por outro lado, o padrão de distribuição dos elementos-traço demonstra que, mesmo partindo de protólitos ligeiramente diferenciados, quase todo o perfil seguiu um padrão similar de evolução laterítica, com exceção do HBN que se comporta como uma unidade a parte.

A rocha precursora era constituída principalmente por argila e quantidades menores de grãos, cujas formas angulosas ficaram preservadas nos esferólitos ferroaluminosos do HBX, CFA, CFAD e HEFA. Os minerais neoformados foram hematita, goethita, gibbsita, parte da caulinita, além do anatásio. Já os minerais que resistiram ao intemperismo laterítico foram zircão, turmalina, rutilo, cianita e quartzo, todos como acessórios.

Após a decomposição dos minerais da rocha precursora, alguns elementos foram assimilados pela estrutura dos oxi-hidróxidos de ferro. Já a gibbsita aparentemente não assimilou esses elementos em sua estrutura. A goethita por sua vez assimilou parte do Al, em substituição ao Fe.

O padrão diferenciado na distribuição dos elementos maiores e traço no HEFA e HBN e a presença de matriz argilosa envolvendo esferólitos e nódulos, respectivamente, e os contatos bruscos e erosivos, indicam que, embora haja semelhança na composição mineralógica, a origem destes horizontes não seguiu o mesmo caminho dos demais, sendo estes possivelmente alóctones.

REFERÊNCIAS

- Barros A.E., Nardi L.V.S., Dillenburg S.R. 2005. Geoquímica de minerais detríticos em estudos de proveniência: uma revisão. *Revista Pesquisas em Geociências*, **32**(1): 3-15.
- Bizzi L.A., Schobbenhaus C., Vidotti R.M., and Gonçalves J.H (eds.). 2003. *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: Texto, mapas and SIG: Brasília, Serviço Geológico do Brasil*. Brasília, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 692 p.
- Boulangé B. & Carvalho A. 1997. The bauxite of Porto Trombetas. In: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas Y. (eds.). *Brazilian Bauxites*. São Paulo, USP/FAPESP/ORSTOM, p. 55-73.
- Bahia R.B.C., Faraco M.T.L., Monteiro M.A.S., Oliveira M.A.O. 2004. Folha AS.22-Belém. In: Schobbenhaus C., Gonçalves J.H., Santos J.O.S., Abram M.B., Leão Neto R., Matos G.M.M., Vidotti R.M., Ramos M.A.B., Jesus J.D.A (eds.). *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de informações Geográficas*. Programa Geologia do Brasil. Brasília, CPRM. CD-ROM.
- Bardossy G. 1982. *Karst bauxites*. Amsterdam, Elsevier, 441p.
- Costa M.L. 1980. *Geologia, mineralogia, geoquímica e gênese dos fosfatos de Jandá, Cansa Perna e Itacupim, no Pará, e Pirocaua e Trauíra, no Maranhão*. MS Dissertation, Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas, Universidade Federal do Pará, Belém, 202 p.
- Costa M.L. 1990. Mineralogia, geoquímica, gênese e epigênese dos lateritos fosfáticos de Jandá, na Região Bragantina (NE do Pará). *Geochimica Brasiliensis*, **4**(1): 85-110.
- Costa M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, **21**(2): 146-160.
- Costa M.L. 2007. Introdução ao intemperismo laterítico e à lateritização. In: Licht O.A.B., Silva C.R.S., Bandeira de Melo C.S. (eds.). *Prospecção geoquímica*. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geoquímica, p. 299-344.
- Costa M. L. Alumínio e bauxita no Brasil. 2016. In: Melfi A.J., Misi A., Campos D.A., Cordani U.G (eds.). *Recursos minerais no Brasil problemas e desafios*. Rio de Janeiro, Academia Brasileira de Ciências, p. 166-173.
- Costa M.L. & Cruz G.S., Almeida H.D.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*, **146**:58-74.
- Costa M.L., Sousa D.J.L., Angélica, R.S. 2009. The contribution of lateritization processes to the formation of the kaolin deposits from eastern Amazon. *Journal of South American Earth Sciences*, **27**: 219-234
- Cruz G.S. 2011. *Bauxita, horizonte nodular e cobertura argilosa da região de Paragominas e Juruti, estado do Pará*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 114p.

Dantas M.E. & Teixeira S.G. 2013. Origem das Paisagens. In.: João X.S.J., Teixeira S.G., Fonseca D.D.F. (eds.). *Geodiversidade do Estado do Pará*. Brasília, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 1988. *Critérios para distinção de classes de solos e de fases de unidades de mapeamento*. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 67p.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 2003. *Zoneamento agroecológico do município de Rondon do Pará – Estado do Pará*. Belém, Embrapa Amazônia Oriental.

Evensen N.M., Hamilton P.J., O’Nions R.K. 1978. Rare-earth abundance in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **42**(8):1199-1212.

Faraco M.T., Marinho P.A.C., Vale A.G., Maia E.J.S., Ferreira A.L., Valente C.R., Lacerda Filho J.V., Moreton L.C., Camargo M.A., Vasconcelos A.M., Oliveira I.W.B., Abreu Filho W.A., Gomes I.P. 2004. Folha SB.22-Araguaia. In: Schobbenhaus C., Gonçalves J.H., Santos J.O.S., Abram M.B., Leão Neto R., Matos G.M.M., Vidotti R.M., Ramos M.A.B., Jesus J.D.A. (eds.). *Carta Geológica do Brasil ao Milhonésimo, Sistema de Informações Geográficas*. Programa Geologia do Brasil. Brasília, CPRM. CD-ROM.

Góes A.M. 1995. *A Formação Poti (Carbonífero Inferior) da Bacia do Parnaíba*. PhD Thesis, Instituto de Geologia, Universidade de São Paulo, 171p.

Grubb P.L.C. 1979. Genesis of Bauxite deposits in the Amazon basin and Guianas coastal plain. *Economic Geology*, **74**:735-750.

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*, **111**: p 1-12.

Horbe A.M.C. & Costa M.L. 1999. Relações genéticas entre latossolos e crostas lateríticas aluminosas e aluminoferruginosas na região de Paragominas, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **29**: 497-504.

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

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). 2016. Disponível em: <www.inmet.gov.br>. Acesso em: 18 nov. 2016.

Klammer G. 1971. Über pilo-leistozäne Terrassen und ihre Sedimente im unteren Amazonasgebiet. *Geomorphology*, **15**: 62-106.

Kotschoubey B. & Truckenbrodt W. 1981. Evolução poligenética das bauxitas do distrito de Paragominas-Açailândia (Estados do Pará e Maranhão). *Revista Brasileira de Geociências*, **(11)**: 193-202.

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

Kotschoubey B., Truckenbrodt W., Hieronymus B. 1996. Depósitos de caulim e argila semi-flint no nordeste do Estado do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **26**(2), p. 71–80.

Kotschoubey B., Truckenbrodt W., Hieronymus B. 1997. Bauxite deposits of Paragominas. In: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas Y. (eds.) *Brazilian Bauxites*. São Paulo, USP/FAPESP/ORSTOM, p. 75-106.

Kotschoubey B., Calaf J.M.C., Lobato A.C.C., Leite A.S., Azevedo C.H.D. 2005. Caracterização e Gênese dos depósitos de Bauxita da Província Bauxitífera de Paragominas, Nordeste da Bacia do Grajaú, Nordeste do Pará, oeste do Maranhão. In: Marini O.J., Queiroz E.T., Ramos B.W. (eds.). *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília, CT-MINERAL/FINEP/ADIMB, p. 691-782.

Kronberg B.I., Couston J.F., Stilianidi Filho B., Fyfe, W.S. Nash R.A., Sugden D. 1979. Minor element geochemistry of Paragominas bauxites, Brazil. *Economic Geology*, **74**:1869-1875.

Leite, A. S. *Geologia, mineralogia e geoquímica dos fosfatos de Sapucaia (Bonito-PA)*. MS Dissertation. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 94p.

Lucas Y. 1997. The bauxite of Juruti. In: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas Y. (eds.). *Brazilian Bauxites*. São Paulo, USP/FAPESP/ORSTOM, p. 107-133.

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.

Nascimento M.S., Góes A.M. 2007. Petrografia de arenitos e minerais pesados de depósitos cretáceos (Grupo Itapecuru), Bacia de São Luís-Grajaú, norte do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**(1): 1-15.

Negrão L.B.A. & Costa M.L. 2012. O perfil laterito-bauxítico do furo FN3 39 em Carajás, Pará, Brasil. In: SBG, 46º Congresso Brasileiro de Geologia / 1º Congresso de Geologia dos Países de Língua Portuguesa, 2012, Santos-SP. 46º Congresso Brasileiro de Geologia, Santos. *Anais*.

Oliveira N.P., Costa M.L. 1984. Os fosfatos aluminosos do Pará e do Maranhão: estágio atual de conhecimentos e estratégia para o aproveitamento econômico. *Ciências da Terra*, **10**: 16-19.

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

Pantoja H.M. 2015. *Mineralogia, geoquímica e minerais pesados do perfil laterito-bauxítico com cobertura e sua relação com o Grupo Itapecuru: lavra piloto Ciríaco (Rondon do Pará)*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 73p.

Prazeres Filho, H.J., Oliveira S.B., Molinari L., Belther J. 2016. *The rediscovery of Rondon do Para, the last giant world-class bauxite deposit in an attractive geography*. Disponível em: http://icsoba.org/sites/default/files/2015paper/bauxitepapers/BX07%20-%20The_rediscovery_of_Rondon_do_Para_Final.pdf>. Acesso em 22 fev. 2017.

Rossetti D.F. 2001. Arquitetura Depositional da Bacia de São Luís-Grajaú. In: Rossetti D.F., Góes A.M., Truckenbrodt W. (eds.). *O Cretáceo na Bacia de São Luís–Grajaú*. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi, p. 31-46.

Pupin J.P. 1980. Zircon and granite petrology. *Contribution to mineralogy and petrology, Berlin /Heidelberg*, **73**: 207-220.

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

Santos P.H.C., Costa M.L., Leite A.S. 2016. The Piriá aluminous lateritic profile: mineralogy, geochemistry and parent rock. *Brazilian Journal of Geology*, **46** (4) 617-636-610.

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

Sombroek W.G. 1966. *Amazon soils: a reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region*. Netherlands, Wageningen: Center for Agriculture Publications and Documentation, 292p.

Truckenbrodt W. & Kotschoubey B. 1981. Argila de Belterra: Cobertura terciária das bauxitas amazônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, **11**(3): 203-208.

Truckenbrodt W., Kotschoubey B., Schellmann W. 1991. Composition and origin of north brazilian laterites. *Geologische Rundschau*, **80** (3): 591-610.

Truckenbrodt W., Kotschoubey B., Hieronymus B. 1995. Aluminization: an important process in the evolution of Amazonian bauxites. *Travaux ICSOBA*, **22**(1): 27-42.

USGS (United States Geological Survey). *Bauxite and alumina statistics and information* 2016. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/bauxite/mcs-2016-bauxi.pdf>. Acesso em: 20 set. 2016.

Vasconcelos A.M., Veiga Júnior, J., Colares J.Q.S., Ribeiro J.A.P., Gomes I.P., Medeiros M.F., Forgiarini I.I. 2004a. Folha SA.23-São Luís. In: Schobbenhaus C., Gonçalves J.H., Santos J.O.S., Abram M.B., Leão Neto R., Matos G.M.M., Vidotti R.M., Ramos M.A.B., Jesus J.D.A (eds.). *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de informações Geográficas*. Programa Geologia do Brasil. Brasília, CPRM. CD-ROM.

Vasconcelos A.M., Veiga Júnior, J., Colares J.Q.S., Ribeiro J.A.P., Gomes I.P., Medeiros M.F., Forgiarini I.I. 2004b. Folha SB.23-São Luís. In: Schobbenhaus C., Gonçalves J.H., Santos J.O.S., Abram M.B., Leão Neto R., Matos G.M.M., Vidotti

R.M., Ramos M.A.B., Jesus J.D.A (eds.). *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de informações Geográficas*. Programa Geologia do Brasil. Brasília, CPRM. CD-ROM.

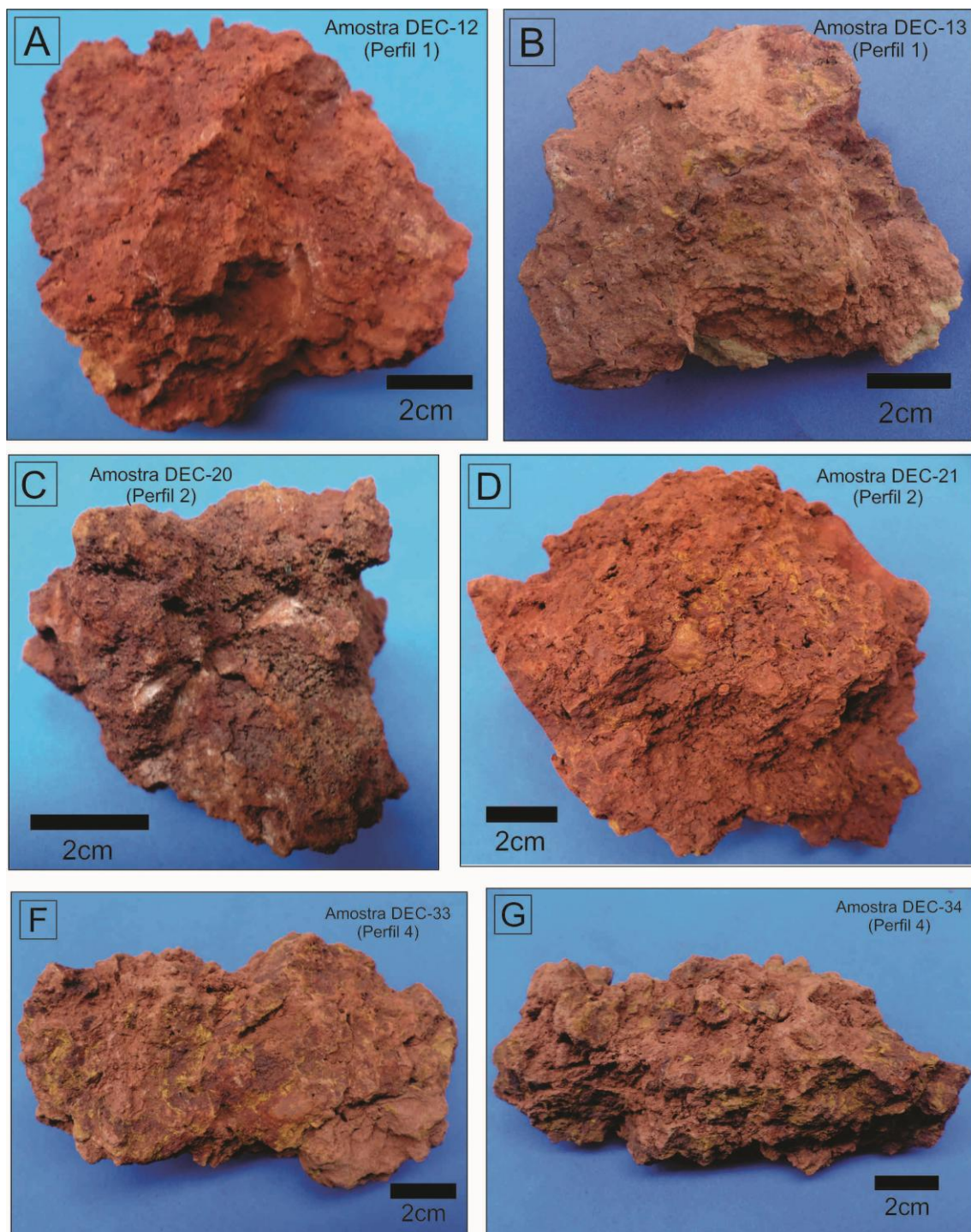
Vaz P.T., Rezende Filho N.G.A.M., Travassos W.A.S. 2007. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 5(2): 253-263.

Wedepohl K.H. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7):1217-1232.

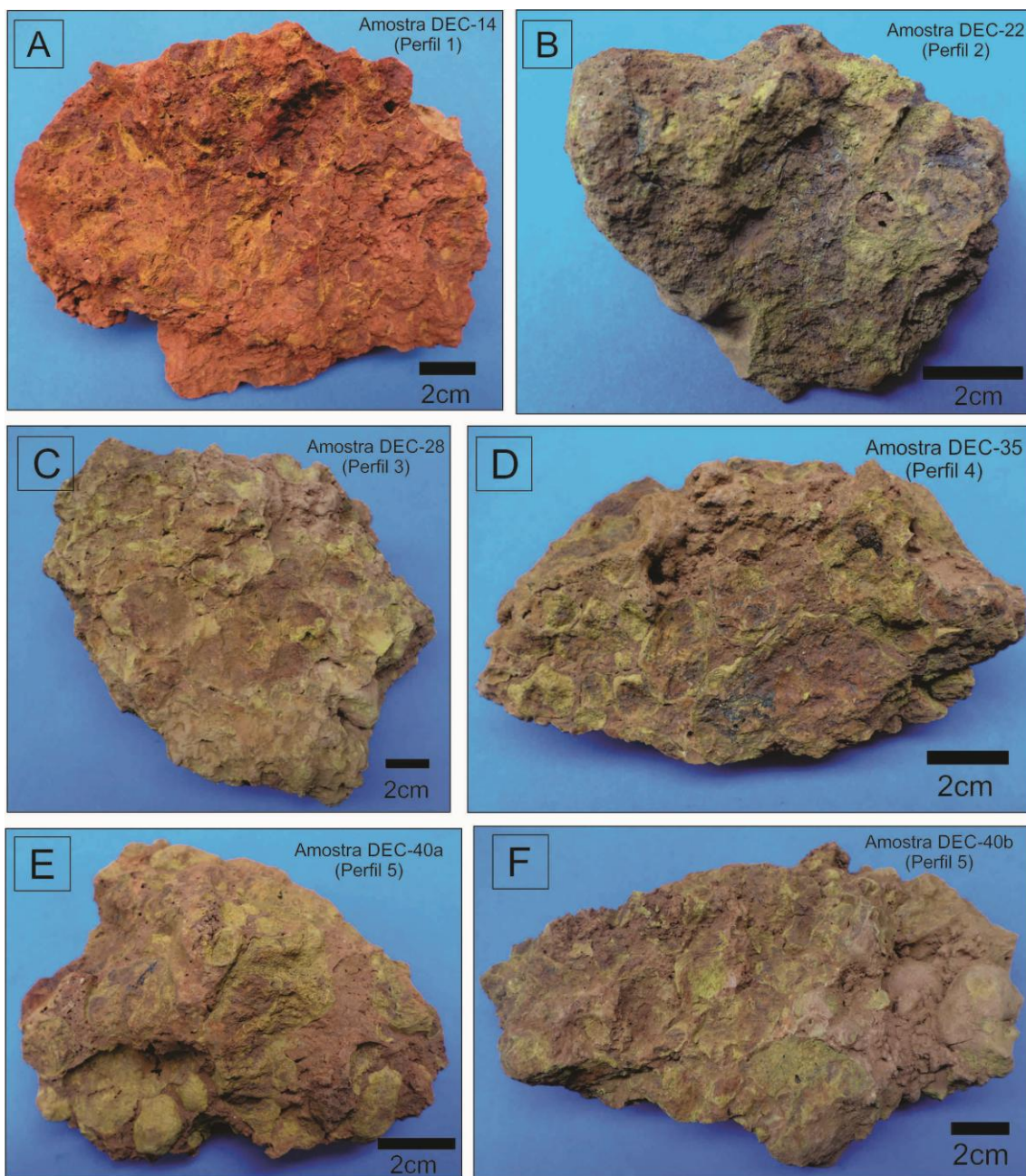
Wolf F.A.M. & Silva J.M.R. 1973. *Província bauxitífera da Amazônia*. Belém, Departamento Nacional de Produção Mineral, 35p.

ANEXOS

ANEXO A – AMOSTRAS DO HORIZONTE BAUXÍTICO



ANEXO B – AMOSTRAS DA CROSTA FERROALUMINOSA



ANEXO C - MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE ELEMENTOS MAIORES E TRAÇO DO PERFIL LATERÍTICO DA LAVRA PILOTO DÉCIO.

[illegible]

ANEXO C - MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE ELEMENTOS MAIORES E TRAÇO DO PERFIL LATERÍTICO DA LAVRA PILOTO DÉCIO.

	As	Au	Bi	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Zn	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
SiO ₂	-0.50	-0.13	0.19	-0.07	-0.35	-0.19	0.74	0.02	-0.28	-0.22	0.01	0.74	0.84	0.85	0.87	0.83	0.85	0.87	0.89	0.91	0.91	0.91	0.92	0.93	0.92
TiO ₂	-0.68	-0.28	-0.09	-0.39	-0.69	-0.55	0.53	-0.32	-0.61	-0.19	-0.36	0.85	0.90	0.89	0.87	0.72	0.73	0.79	0.82	0.86	0.88	0.87	0.94	0.94	0.95
Al ₂ O ₃	-0.62	-0.02	-0.47	-0.52	-0.71	-0.76	-0.46	-0.78	-0.70	0.03	-0.80	-0.10	-0.04	-0.12	-0.14	-0.22	-0.18	-0.14	-0.08	-0.02	0.01	0.06	0.14	0.11	0.13
Fe ₂ O ₃	0.81	0.07	0.36	0.52	0.81	0.80	0.10	0.73	0.78	0.08	0.75	-0.23	-0.33	-0.27	-0.25	-0.17	-0.21	-0.26	-0.33	-0.39	-0.42	-0.46	-0.54	-0.52	-0.54
PF	-0.38	0.08	-0.51	-0.43	-0.47	-0.60	-0.70	-0.72	-0.52	0.08	-0.71	-0.41	-0.38	-0.45	-0.47	-0.52	-0.49	-0.46	-0.41	-0.36	-0.33	-0.29	-0.23	-0.25	-0.22
CT	-0.55	-0.05	-0.01	-0.22	-0.41	-0.39	0.59	-0.24	-0.45	-0.28	-0.18	0.61	0.72	0.73	0.73	0.66	0.69	0.71	0.75	0.77	0.78	0.81	0.83	0.85	0.85
Ba	-0.47	-0.39	-0.06	-0.30	-0.54	-0.37	0.67	-0.10	-0.45	-0.08	-0.17	0.99	0.98	0.98	0.95	0.78	0.76	0.81	0.80	0.80	0.81	0.77	0.84	0.83	0.85
Be	-0.36	-0.47	-0.57	-0.35	-0.23	-0.35	-0.23	-0.38	-0.33	0.43	-0.36	-0.10	-0.13	-0.15	-0.19	-0.28	-0.29	-0.26	-0.28	-0.31	-0.27	-0.24	-0.19	-0.22	-0.20
Co	-0.24	0.28	-0.02	0.22	-0.06	-0.12	-0.23	-0.13	-0.11	-0.15	-0.06	-0.43	-0.31	-0.35	-0.29	-0.14	-0.12	-0.13	-0.09	-0.10	-0.10	-0.06	-0.09	-0.13	-0.09
Cs	-0.37	-0.20	-0.01	-0.20	-0.32	-0.26	0.22	-0.13	-0.32	-0.09	-0.08	0.46	0.48	0.51	0.49	0.35	0.39	0.45	0.52	0.58	0.58	0.61	0.64	0.68	0.68
Ga	0.32	0.29	0.87	0.82	0.54	0.83	0.48	0.88	0.77	-0.24	0.81	-0.05	0.04	0.08	0.18	0.47	0.48	0.41	0.40	0.36	0.30	0.32	0.17	0.18	0.13
Hf	-0.62	-0.20	0.09	-0.27	-0.65	-0.42	0.55	-0.19	-0.47	-0.17	-0.28	0.83	0.90	0.88	0.87	0.78	0.80	0.85	0.88	0.92	0.93	0.93	0.98	0.98	0.98
Nb	-0.68	-0.24	-0.05	-0.35	-0.68	-0.53	0.52	-0.30	-0.59	-0.21	-0.34	0.82	0.88	0.87	0.85	0.72	0.74	0.80	0.83	0.88	0.89	0.89	0.95	0.95	0.96
Rb	-0.49	-0.35	0.12	-0.01	-0.42	-0.27	0.80	0.03	-0.35	-0.16	0.05	0.83	0.91	0.92	0.93	0.87	0.88	0.91	0.92	0.91	0.92	0.91	0.92	0.92	0.93
Sc	0.48	0.30	0.78	0.86	0.73	0.89	0.52	0.92	0.82	-0.30	0.93	-0.10	-0.02	0.03	0.12	0.39	0.39	0.31	0.29	0.22	0.17	0.18	0.02	0.05	0.00
Sn	-0.68	-0.30	0.03	-0.11	-0.60	-0.43	0.60	-0.14	-0.51	-0.31	-0.14	0.76	0.86	0.84	0.85	0.79	0.82	0.86	0.90	0.92	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96
Sr	-0.49	-0.39	-0.08	-0.30	-0.58	-0.40	0.65	-0.13	-0.48	-0.06	-0.19	0.99	0.98	0.98	0.95	0.78	0.76	0.81	0.80	0.80	0.82	0.78	0.85	0.84	0.86
Ta	-0.67	-0.25	-0.06	-0.35	-0.68	-0.51	0.55	-0.28	-0.58	-0.20	-0.33	0.86	0.91	0.91	0.88	0.75	0.77	0.82	0.84	0.88	0.89	0.89	0.94	0.95	0.95
Th	0.31	0.05	0.82	0.64	0.45	0.71	0.74	0.84	0.65	-0.23	0.77	0.32	0.38	0.43	0.50	0.66	0.67	0.62	0.60	0.56	0.52	0.50	0.41	0.43	0.38
U	0.33	0.27	0.79	0.84	0.62	0.83	0.53	0.89	0.75	-0.32	0.87	-0.08	0.02	0.07	0.16	0.46	0.46	0.39	0.37	0.31	0.25	0.28	0.12	0.13	0.09
V	0.65	0.22	0.53	0.59	0.92	0.91	0.21	0.80	0.90	-0.11	0.79	-0.31	-0.34	-0.28	-0.23	-0.07	-0.09	-0.15	-0.19	-0.24	-0.30	-0.31	-0.40	-0.38	-0.40
W	-0.34	-0.28	0.00	-0.29	-0.72	-0.45	0.06	-0.24	-0.44	-0.11	-0.39	0.61	0.58	0.54	0.52	0.38	0.39	0.46	0.49	0.54	0.55	0.51	0.59	0.58	0.58
Y	-0.55	-0.19	0.22	-0.07	-0.55	-0.27	0.66	0.00	-0.35	-0.14	-0.08	0.83	0.92	0.91	0.92	0.88	0.90	0.93	0.96	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99
Zr	-0.63	-0.16	0.10	-0.29	-0.67	-0.43	0.49	-0.23	-0.48	-0.16	-0.32	0.77	0.85	0.84	0.83	0.74	0.77	0.81	0.85	0.91	0.92	0.92	0.97	0.97	0.97
Ag	0.77	0.54	0.60	0.60	0.87	0.89	-0.04	0.68	0.89	-0.06	0.68	-0.57	-0.56	-0.51	-0.46	-0.23	-0.23	-0.31	-0.34	-0.37	-0.41	-0.39	-0.53	-0.48	-0.55
As	1.00	0.29	0.49	0.53	0.76	0.74	-0.09	0.62	0.80	0.04	0.62	-0.41	-0.47	-0.44	-0.41	-0.28	-0.30	-0.37	-0.41	-0.46	-0.48	-0.51	-0.58	-0.56	-0.61
Au		1.00	0.35	0.14	0.30	0.37	-0.26	0.10	0.33	-0.20	0.07	-0.42	-0.37	-0.35	-0.33	-0.16	-0.15	-0.21	-0.18	-0.14	-0.16	-0.14	-0.22	-0.18	-0.22
Bi			1.00	0.75	0.45	0.78	0.42	0.81	0.77	-0.18	0.69	-0.03	0.06	0.08	0.17	0.43	0.46	0.39	0.38	0.37	0.34	0.33	0.21	0.22	0.13
Cu				1.00	0.62	0.79	0.39	0.89	0.75	-0.16	0.92	-0.25	-0.14	-0.13	-0.01	0.30	0.30	0.22	0.19	0.10	0.06	0.08	-0.08	-0.09	-0.13
Hg					1.00	0.85	0.09	0.69	0.88	-0.22	0.77	-0.54	-0.55	-0.49	-0.44	-0.25	-0.27	-0.34	-0.38	-0.43	-0.48	-0.48	-0.57	-0.55	-0.58
Mo						1.00	0.22	0.92	0.98	-0.10	0.87	-0.33	-0.32	-0.26	-0.19	0.06	0.05	-0.03	-0.07	-0.12	-0.17	-0.18	-0.31	-0.29	-0.35
Ni							1.00	0.50	0.15	-0.28	0.50	0.65	0.74	0.75	0.80	0.88	0.86	0.84	0.79	0.73	0.71	0.70	0.66	0.65	0.62
Pb								1.00	0.87	-0.11	0.95	-0.04	-0.01	0.04	0.12	0.37	0.35	0.28	0.23	0.16	0.11	0.10	-0.04	-0.04	-0.08
Sb									1.00	0.10	-0.82	0.41	0.40	0.36	0.29	0.05	0.05	0.13	0.17	0.21	0.26	0.26	0.38	0.36	0.43
Se										1.00	-0.18	-0.04	-0.09	-0.11	-0.13	-0.21	-0.22	-0.20	-0.22	-0.26	-0.17	-0.21	-0.16	-0.23	-0.20
Zn											1.00	-0.13	-0.08	-0.03	0.06	0.30	0.29	0.21	0.17	0.08	0.03	0.03	-0.11	-0.10	-0.14
La												1.00	0.97	0.98	0.95	0.78	0.76	0.80	0.78	0.78	0.79	0.74	0.81	0.79	0.81
Ce													1.00	1.00	0.99	0.88	0.87	0.90	0.89	0.88	0.90	0.86	0.90	0.89	0.90
Pr														1.00	0.99	0.88	0.87	0.90	0.89	0.88	0.89	0.86	0.89	0.88	0.89
Nd															1.00	0.93	0.92	0.95	0.93	0.91	0.92	0.89	0.91	0.90	0.90
Sm																1.00	1.00	0.99	0.97	0.93	0.92	0.91	0.87	0.86	0.84
Eu																	1.00	0.99	0.98	0.95	0.94	0.89	0.88	0.88	0.86
Gd																		1.00	0.99	0.97	0.97	0.96	0.93	0.92	0.90
Tb																			1.00	0.99	0.98	0.98	0.95	0.95	0.93
Dy																				1.00	0.99	0.99	0.97	0.98	0.96
Ho																					1.00	0.99	0.98	0.98	0.97
Er																						1.00	0.98	0.98	0.97
Tm																							1.00	0.99	0.99
Yb																								1.00	0.99
Lu																									1.00

