



Universidade Federal do Pará



Faculdade de Geologia



Instituto de Geociências

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PABLO HENRIQUE COSTA DOS SANTOS

O PERFIL LATERÍTICO FERROALUMINOSO DA SERRA DO PIRIÁ

GEOCIÊNCIAS
U F P A

BELÉM-PARÁ

JULHO-2014

PABLLO HENRIQUE COSTA DOS SANTOS

O PERFIL LATERÍTICO FERROALUMINOSO DA SERRA DO PIRIÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geologia da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: prof. Dr. Marcondes Lima da Costa.

BELÉM

2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

S237p Santos, Pablo Henrique Costa dos, 1991-

O perfil laterítico ferroaluminoso da serra do Piriá / Pablo Henrique Costa dos Santos – 2014

71 f. : il.

Orientador: Marcondes Lima da Costa

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 2014.

1. Caulinita – Pará. 2. Hematita - Pará. 3. Goethita - Pará. I. Título.

CDD 22. ed.: 549.6709811

PABLLO HENRIQUE COSTA DOS SANTOS

O PERFIL LATERÍTICO FERROALUMINOSO DA SERRA DO PIRIÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Geologia da Universidade
Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às
exigências para obtenção do grau de Bacharel
em Geologia.

Data de aprovação: ____/____/____

Conceito: _____

Banca examinadora:

Prof. Marcondes Lima da Costa - orientador
Pós-Dr. em Mineralogia e Geoquímica
Universidade Federal do Pará

Prof. Rômulo Simões Angélica - Membro
Pós-Dr. em Geologia e Geoquímica
Universidade Federal do Pará

Prof. Joel Buenano Macambira - Membro
Dr. em Geociências
Universidade Federal do Pará

Aos meus pais,
meus primeiros e grandes professores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força em superar todos os desafios do curso de geologia;

Ao professor Dr. Marcondes Lima da Costa pela orientação, redação e correções;

À empresa Vicenza Mineração e Participações S/A e ao geólogo Alessandro Sabá Leite pela coleta, concessão das amostras e dos dados químicos; e orientação;

Aos técnicos e responsáveis pelos laboratórios do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA), especialmente Natalino Valente (Laboratório de Análises Químicas); Henrique Diniz (Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações); Joelma Lobo (Laboratório de Laminação) e Kelly Oliveira (Laboratório de Caracterização Mineral); onde as amostras foram analisadas.

Ao *Zentrum für Werkstoffanalytik Lauf* (ZWL), Alemanha; pelas análises por Microscopia Eletrônica e Espectrometria de Energia Dispersiva, que foram acompanhadas pelo professor Dr. Marcondes Lima da Costa.

À Secretaria de Ensino Superior do (SESU) do Ministério da Educação (MEC) pela bolsa do Programa de Educação Tutorial (PET);

Ao professor Dr. Vladimir de Araújo Távora pela tutoria no grupo PET- geologia e aos demais integrantes do grupo.

Aos componentes do Grupo de Mineralogia e Geoquímica Aplicada (GMGA), especialmente Glayce Jolhy, Suyanne Flávia Rodrigues, Gisele Marques, Henrique Diniz, Bruno Figueira, Heliana Pantoja, Daiveson Abreu, Patrícia Pinheiro, Aline Silva, Fernanda Sobrinho, Luiz Claudio, Darilena Porfírio e Roseane Norat, Maria do Socoro Vilhena e Monia da Silva.

Aos amigos do curso de geologia, pelo companheirismo e apoio ao longo do curso de graduação, especialmente: Ailton Brito, Quézia Alencar, Reinaldo Fontoura, Rômulo Amaral, Thiago Carvalho, Vanessa Pinheiro, Arthur Aragão, Bruna Nogueira, Camila Fonseca, Christian Santana, Dante Alex, Dayane Coelho, Edson Batista, Franco Felipe, Helder Oliveira, Leonardo Negrão, Lucas Baia, Meireanny

Gonçalves, Patricia Rodrigues, Paulo Aviz, Rafael Guimarães, Ramon Carvalho, Adson Pinheiro, Renan Malone e Allana Queiróz.

À minha família, em especial meus pais, Vera Lúcia da Costa e José Santos, sem o apoio dos quais, jamais teria chegado a esta etapa acadêmica.

RESUMO

Depósitos lateríticos de pequeno porte são muito frequentes no Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão. A maioria está mineralizada em fosfatos de alumínio, se apresentando como pequenos platôs e morros, que se destacam na planície rebaixada dessa região. Um desses depósitos de maior porte é a Serra do Piriá, localizada na margem esquerda do baixo curso do rio homônimo, no município de Vizeu (PA). Ela consiste em um conjunto de platôs e morros alinhados segundo a direção NE-SE, com 6km de extensão e altitude máxima de 110m. O perfil laterítico estudado foi exposto através de um furo de sondagem com 17m de profundidade. Deste, foram coletadas 34 amostras, as quais foram descritas, fotografadas, preparadas e submetidas a análises mineralógicas por DRX, microscopia ótica, eletrônica e análises químicas com o objetivo de entender os processos de formação do perfil laterítico e sua inserção na paisagem laterítica regional. O perfil investigado compreende dois horizontes principais, o horizonte argiloso bauxítico na base e a crosta ferruginosa bauxítica no topo. O horizonte inferior (7 a 17m) tem aspecto argilo-arenoso, é de cor vermelho-alaranjado, e localmente apresenta estruturas sugestivas de serem primárias. Ele é composto de caulinita, gibbsita, goethita, anatásio e augelita. A crosta ferruginosa bauxítica é vermelho-amarronzada, formada por concreções hematíticas com córtex goethítico e cimento gibbsítico-goethítico. A hematita, gibbsita e goethita são, portanto, minerais principais, com anatásio e augelita como acessórios. Ao microscópio óptico a trama geral compreende minerais microcristalinos distribuídos em um plasma ferruginoso hematítico, goethítico e gibbsítico (na crosta) e caulínítico/ gibbsítico no horizonte argiloso. Grãos de quartzo são observados, embora este mineral não tenha sido detectado por DRX. Os teores de SiO_2 variam de 28 a 0,48%, diminuindo para o topo, enquanto os de Fe_2O_3 aumentam no mesmo sentido, chegando a atingir 67,8%, da mesma forma que os teores de Al_2O_3 , que chegam a 35%. Os teores oscilantes de TiO_2 entre 0,65 e 5,7% sugerem rocha-mãe de constituição heterogênea. Os teores de P_2O_5 entre 0,22 e 0,72% são ligeiramente elevados e representam a augelita. A composição mineralógica e a distribuição dos teores dos componentes químicos principais são compatíveis com a evolução laterítica, equivalente aos perfis lateríticos mais antigos da Amazônia, conhecidos como maduros.

Palavras-chave: Caulinita. Hematita. Goethita.

ABSTRACT

Small lateritic deposits are very common in the Northeast Pará and Northwest Maranhão. The majority is mineralized in aluminum phosphate and forms a set little hills and plateaus that stand out in this region lowered plain. Piriá Mountain is one of the largests deposits, located in the namesake riverbank, county of Vizeu, State of Pará. The Piriá Mountain is a set of NE-SW plateaus with 6km extension and maximum altitude of 110m height. The studied lateritic profile was exposed through a 17m deep hole. From it, 34 samples were collected, which were described, photographed, prepared and submitted to mineralogical analysis by XRD, optical and eletronic microscopy; and chemical analysis aiming to understand the lateritic profile formation process and its insertion in the lateritic regional landscape. The investigated profile is composed of two main horizons, the bauxitic clay (7 to 17m deep) and bauxitic ferruginous crust (above 7m). The bauxitic clay horizon has a sandy-clay aspect, is orange-red and locally shows suggestive primary structures. It is composed by kaolinite, gibbsite, goethite anatase and augelita. The ferruginous crust is brownish-red, is composed of hematitic concretions with goethitic cortex and gibbsitic-goethitic cement. Hematite, gibbsite and goethite are therefore main minerals, with anatase and augelita accessories. Through the optical microscopy, the general aspect comprises microcrystalline minerals disperse in a plasma, which is hematitic, goethitic and gibbsitic (in the crust) and kaolinitic/gibbsitic in the clay horizon. Quartz grains are observed, despite this mineral has not been detected by XRD. The SiO_2 content vary from 28 to 0,48%, decreasing from the base to the top, while the Fe_2O_3 content increases and range 67,8%, the same way the Al_2O_3 content do, ranging 35%. The inconstant TiO_2 content, from 0,65 to 5,7%, suggest heterogeneous bedrock composition. The P_2O_5 content from 0,22 to 0,72% are lightly high and represent the augelita. The mineralogical composition and the distribution of the main chemical components are compatible with the lateritic evolution, correlated to the oldest Amazon lateritic profiles, known as matures.

Keywords: Kaolinite. Hematite. Goethite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Localização da Serra do Piriá, município de Vizeu, porção litorânea Nordeste do Pará	14
Figura 02 - Equipamentos e processo de amostragem. Trado mecânico motorizado (a). Operação de perfuração (b). Testemunhos de sondagem (c)	15
Figura 03 - Representação da variação no posicionamento dos picos da goethita conforme o teor molar de AlOOH segundo o trabalho experimental de (Thiel, 1963). Reflexões 111 (a); 130 (b); 140 (c); e 121 (d)	17
Figura 04 - Determinação das concentrações dos minerais no perfil laterítico da Serra do Piriá com base em cálculos estequiométricos	20
Figura 05 - Geologia da Região do Gurupi recortada da porção noroeste da Folha Turiaçu-Pinheiro, escala 1: 250.000 (CPRM, 2001). Vide localização do Furo Piriá, objeto do presente estudo	22
Figura 06 - Depósitos lateríticos maduros na porção litorânea do NE do Pará e NW do Maranhão	26
Figura 07 - Geologia da Serra do Piriá e suas proximidades.	29
Figura 08 - Aspectos texturais e de coloração do perfil laterítico entre 13,5 e 17m de profundidade	31
Figura 09 - Aspectos texturais e de coloração do perfil laterítico entre 9,5 e 13m de profundidade	32
Figura 10 - Aspectos texturais e de coloração do perfil laterítico entre 5,5 e 9m de profundidade	34
Figura 11 - Aspectos texturais e de coloração do perfil laterítico entre 0,5m e 5m de profundidade	35
Figura 12 - Feições mesoscópicas encontradas nos horizontes do perfil laterítico da Serra do Piriá. Argila bauxítica mosqueada (a); nódulos gibbsíticos (b); laminação sugestiva de xistosidade reliquiar (c); feições pisolíticas (d) e (e); concreções ferruginosas em plasma hematítico, goethítico e gibbsíticos (f)	37
Figura 13 - Aspectos micromorfológicos do horizonte argiloso bauxítico. Matriz argilosa associada a cristaltos de gibbsita, nicóis x (a). Estrutura reliquiar dada pela alternância de bandas brancas, amareladas e marrons avermelhadas, nicóis // (b). Nódulos de gibbsita microcristalina em matriz argilosa, nicóis x (c). Poros preenchidos por gibbsita mesocristalina com maclamento polissintético, nicóis x (d)	39
Figura 14 - Aspectos texturais da crosta ferruginosa bauxítica. Concreções ferruginosas imersas em plasma microfraturado com preenchimento por gibbsita (a). Nódulos ferruginosos e fragmentos de quartzo reliquiaros cimentados por plasma hematítico-goethítico (b). Feições pisolíticas ferruginosas em cristaliplasma gibbsítico (c). Crosta de aspecto granular, onde grãos de quartzo reliquiaros juntamente com nódulos ferruginosos são cimentados pelo plasma hematítico-goethítico (d)	40

Figura 15 - Principais minerais identificados por DRX no horizonte argiloso bauxítico entre 17 e 12,5m de profundidade	42
Figura 16 - Principais minerais identificados por DRX no horizonte argiloso bauxítico entre 11 e 9,5m de profundidade; composição dos nódulos presentes neste horizonte (a)	43
Figura 17 - Principais minerais identificados por DRX na crosta ferruginosa bauxítica entre 7 e 4,5m de profundidade	44
Figura 18 - Principais identificados por DRX na crosta ferruginosa bauxítica entre 3 e 1m de profundidade	45
Figura 19 - Distribuição dos minerais formadores do perfil laterítico da Serra do Piriá (% em peso)	47
Figura 20 - Proporções molares em moles % de AlOOH nas goethitas. Reflexões 140 (a); 111 (b); 121 (c); e 130 (d)	48
Figura 21 - Grau de ordem-desordem estrutural da caulinita (a) comparado com os dados de Amigó et al. (1994) (b)	51
Figura 22 - Morfologia dos cristais de anatásio (a, b, c e d) e seu espectro químico (e) obtido por MEV/EDS no laboratório ZWL em Lauf, Alemanha, pelo Prof. Marcondes Lima da Costa	52
Figura 23 - Difrátograma de raios x do concentrado obtido após tratamento das amostras SP-33 (a) e SP 22 (b) com H_2TiF_6	53
Figura 24 - Distribuição dos teores dos elementos maiores ao longo do perfil laterítico da Serra do Piriá. SiO_2 e Fe_2O_3 (a); TiO_2 , Al_2O_3 e P.F. (b)	58
Figura 25 - Classificação química das amostras referentes ao horizonte argiloso bauxítico (em azul) e à crosta ferruginosa bauxítica (em vermelho). Propostas de Bardossy (1982) (a); e Aleva (1994) (b)	59
Figura 26 - Correlações geoquímicas no perfil laterítico da Serra do Piriá	62
Figura 27 - Correlações geoquímicas no perfil laterítico da Serra do Piriá	64
Figura 28 - Padrão de distribuição dos ETR normalizado aos condritos de Evensen et al. (1978)	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	APRESENTAÇÃO	13
1.2	JUSTIFICATIVA	13
1.3	OBJETIVOS	14
1.4	LOCALIZAÇÃO	14
2	MATERIAIS E MÉTODOS	15
2.1	AMOSTRAGEM.	15
2.2	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	15
2.3	MICROSCOPIA ÓTICA	15
2.4	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	16
2.5	DETERMINAÇÃO DAS PROPORÇÕES AIOOH-FEOOH NAS GOETHITAS	16
2.6	EXTRAÇÃO DO ANATÁSIO	17
2.7	MEV-EDS	28
2.8	ANÁLISES QUÍMICAS	28
2.9	QUANTIFICAÇÃO DAS FASES MINERALÓGICAS	19
3	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	21
3.1	LITOESTRATIGRAFIA	23
3.1.1	Grupo Aurizona	23
3.1.2	Suíte Tromai	23
3.1.3	Granito Areal	23
3.1.4	Suíte Intrusiva Tracuateua	23
3.1.5	Formações Igarapé de Areia, Viseu e Piriá	24
3.1.6	Grupo Itapecuru	24
3.1.7	Formação Pirabas	24
3.1.8	Formação Barreiras	25
3.1.9	Quaternário	25
3.2	AS FORMAÇÕES LATERÍTICOS DA REGIÃO DO GURUPI	25
3.3	A FORMAÇÃO LATERÍTICA DA SERRA DO PIRIÁ	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1	O PERFIL LATERÍTICO	30
4.1.1	Aspectos micromorfológicos	38

4.2	COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA	40
4.2.1	Distribuição dos minerais no perfil.	46
4.2.2	Substituição Fe-Al nas goethitas	48
4.2.3	Grau de ordenamento estrutural da caulinita	49
4.2.4	Morfologia e química do anatásio	52
4.3	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	53
5	CONCLUSÕES	66
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Depósitos lateríticos são encontrados por quase toda a região amazônica. E dentre as principais zonas lateríticas identificadas, a Região do Gurupi (porção litorânea do Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão) se destaca por sua diversidade composicional, predominando, porém, os lateritos fosfáticos. Estes depósitos são denominados maduros. O termo representa os lateritos evoluídos, com maior complexidade de horizontes, texturas, estruturas, feições geoquímicas e mineralizações associadas (COSTA, 1991). Em geral, eles compõem o relevo mais elevado, sob a forma de platôs ou morros. A Serra do Piriá é sustentada por crosta laterítica ferruginosa bauxítica de pelo menos 7 metros de espessura, exposta em grande parte de sua extensão.

1.2 JUSTIFICATIVA

A região do Gurupi é uma das mais ricas em variedades composicionais de lateritos. Segundo Costa (1991), muitos deles apresentam grande potencial metalogenético, principalmente para fosfatos de alumínio. Além disso, a região tem atraído a atenção de algumas companhias pela possibilidade de uso do fosfato na fabricação de adubos químicos (LEITE; COSTA, 2013).

O depósito laterítico da Serra do Piriá, apesar de ser um dos depósitos de maior porte da região, tem sido pouco estudado. Sua caracterização mineralógica e geoquímica contribui para o entendimento da evolução laterítica cenozóica da região do Gurupi (COSTA, 1980 1982; 1991), pois, em conjunto com as outras formações lateríticas descritas nestes trabalhos, revela informações sobre evolução do relevo e do clima da região. Além disso, o entendimento de como se comportam as formações lateríticas da região contribui para o direcionamento das técnicas de prospecção mineral nela empregadas.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo investigar o perfil laterítico da Serra do Piriá através de sua caracterização micromorfológica, mineralógica e química. A partir destes dados, busca-se entender os processos de formação do perfil, sua evolução e relação com as demais formações lateríticas da região.

1.4 LOCALIZAÇÃO

A Serra do Piriá se situa na margem esquerda do rio homônimo, em terrenos de município de Vizeu, Nordeste paraense. As coordenadas da porção norte da serra são $01^{\circ} 12' 49''$ S e $46^{\circ} 17' 42''$ W. O acesso, a partir de Belém (PA), é feito pela rodovia BR-316 até o trevo de Capanema (PA). Daí toma-se a BR-308, passando por Bragança e Augusto Corrêa até chegar à sua confluência com o ramal de coordenadas $01^{\circ} 13' 02''$ S e $46^{\circ} 23' 01''$ W que leva à Açaiteua (vilarejo do município de Vizeu). Segue-se por 9 km no ramal até esta localidade. A partir de Açaiteua, toma-se uma estrada de 10 km de extensão que leva ao topo da serra (figura 01).

Figura 01 - Localização da Serra do Piriá, município de Vizeu, porção litorânea Nordeste do Pará.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 AMOSTRAGEM

O presente trabalho foi desenvolvido a partir de um furo de sondagem de 17m de profundidade, realizado pela empresa Vicenza Mineração, de coordenadas 1° 12' 49" S e 46° 17' 42" W, no topo da porção norte da Serra do Piriá, utilizando um trado mecânico motorizado (figura 02). Após a descrição de campo dos testemunhos do referido furo, foram coletadas 34 amostras a cada 0,5m de intervalo. Os trabalhos de campo e de organização do material coletado foram orientados pelo geólogo Alessandro Sabá Leite.

Figura 02 - Equipamentos e processo de amostragem. Trado mecânico motorizado (a). Operação de perfuração (b). Testemunhos de sondagem (c).



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram organizadas, descritas, classificadas macroscopicamente e fotografadas. Em seguida, as mesmas passaram por homogeneização, quarteamento e uma alíquota de 15g pulverizada em grau de ágata para as análises por DRX e distintas análises químicas. Outra *in natura* foi empregada para confecção de 10 lâminas delgadas polidas.

2.3 MICROSCOPIA ÓTICA

A investigação por microscopia ótica foi realizada no Laboratório de Gemologia do IG-UFGA, com auxílio de microscópio ZEISS, modelo AXIOLAB POL, objetivando de determinar os aspectos texturais do perfil e aprofundar os estudos mineralógicos. A nomenclatura adotada para descrição dos aspectos texturais é principalmente aquela proposta por Delvigne (1999) no *Atlas of Micromorphology of*

Mineral Alteration and Weathering. Detalhes dos aspectos mineralógicos e texturais foram capturados com câmera digital *Canon* modelo A460.

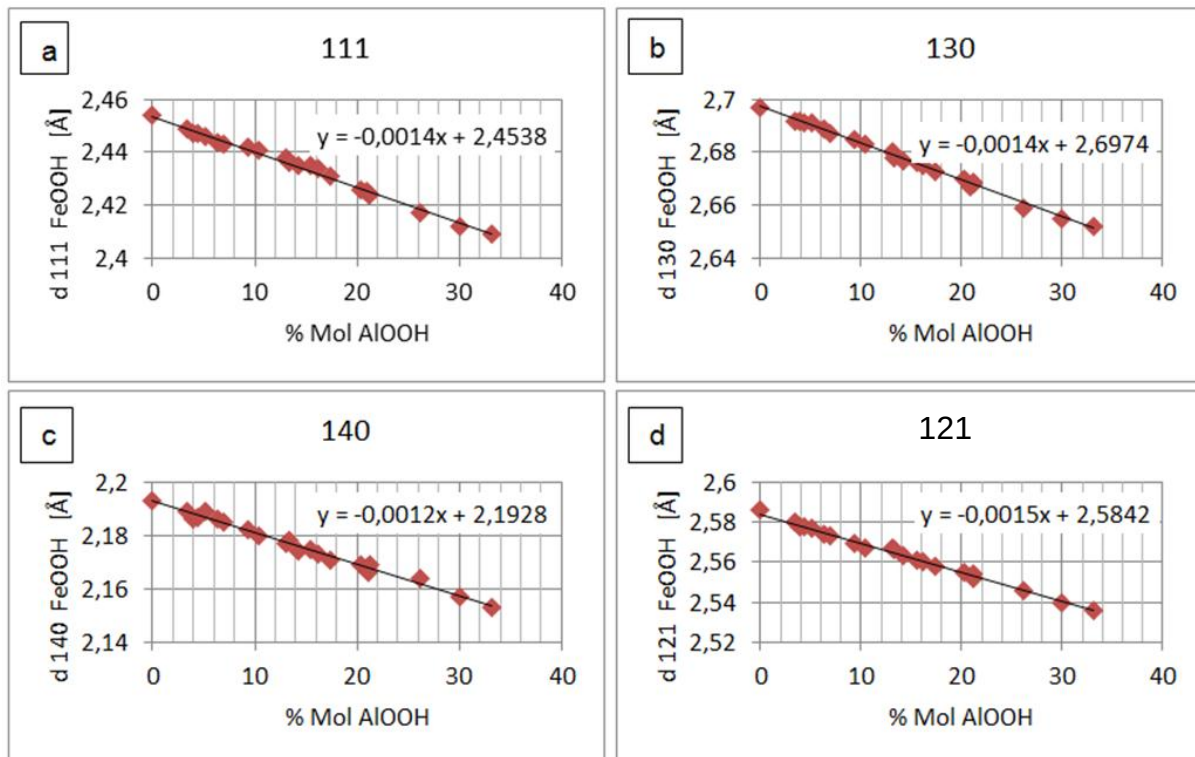
2.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A Difração de Raios X (DRX) foi empregada para identificação dos minerais em 17 amostras do perfil. Utilizou-se o método do pó e um difratômetro *PANalytical X' PERT PRO MPD* (PW 3040/60), com um goniômetro PW 3050/60 (theta-theta) equipado com um ânodo de cobre ($\lambda_{\text{Cu K}\alpha} = 1.5406 \text{ \AA}$) em condições de funcionamento de 40 kV e 35 mA, detector do tipo RTMS, X' Celerator. Os resultados foram visualizados e tratados com o auxílio do *software X' Pert High Score Plus*, que compara os picos obtidos na análise com as fichas do banco de dados do *International Center on Diffraction Data* (ICDD). As análises foram realizadas no laboratório de Difração e Fluorescência de Raios-X (IG-UFPA).

2.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPORÇÕES AlOOH-FeOOH NAS GOETHITAS

A quantificação da substituição AlOOH-FeOOH foi realizada segundo o método proposto por Thiel (1963). O método avalia as variações das reflexões d_{111} , d_{130} , d_{140} e d_{021} (figura 03). Os valores d_{111} , d_{130} , d_{140} e d_{021} foram calculados com auxílio do programa *X' Pert High Score Plus*, cujos valores foram plotados nos diagramas de Thiel (1963).

Figura 03 - Representação da variação no posicionamento dos picos da goethita conforme o teor molar de AlOOH segundo o trabalho experimental de (THIEL, 1963): Reflexões 111 (a); 130 (b); 140 (c); e 121 (d).



Fonte: Thiel (1963)

2.6 EXTRAÇÃO DO ANATÁSIO

Com o objetivo de extrair o anatásio identificado por DRX, que demonstraram se encontrar em cristalitos nanométricos empregou-se o método de Sayin e Jackson (1975). Este consiste em tratar as amostras com o ácido hexafluortitanico (H_2TiF_6), que seletivamente dissolve a caulinita e a maioria dos filossilicatos presentes em solos, além de hidróxidos de Al, como gibbsita. Desse modo são concentrados no resíduo $(\text{Ti, Fe})\text{O}_2$ (anatásio e rutilo parcialmente), além de zircão, óxidos e hidróxidos de Fe. Foram selecionadas duas amostras (SP-22 e SP-33) para extração do anatásio.

Inicialmente foi necessária a produção do H_2TiF_6 seguindo método proposto por Sayin e Jackson (1975). Foi então empregado 200 ml de ácido fluorídrico (HF) a 49% e 90g de TiO_2 de alta pureza. HF e TiO_2 reagem segundo a equação $6\text{HF}_{(\text{aq.})} + \text{TiO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{TiF}_{6(\text{aq.})} + 2\text{H}_2\text{O}$ (SAYIN; JACKSON, 1975). Para porcentagens em peso de Ti iguais ou superiores a 16,5% na solução de H_2TiF_6 , ocorre uma efetiva dissolução da caulinita e outros filossilicatos.

A solução foi diluída em aproximadamente 1: 55.000 para construção da curva de calibração e o teor de TiO_2 é obtido por colorimetria. Após a preparação do ácido hexafluortitânico, seguindo ainda o método de Sayin e Jackson (1975), adicionou-se 30ml de H_2TiF_6 em um tubo de polietileno com 1g da amostra, mantendo-o fechado. O tubo foi então levado ao banho-maria a 45°C por dois dias e agitado periodicamente a cada 5 horas durante o dia. O resíduo originado foi lavado 3 vezes com 30ml de HCl 6N, 2 vezes com HCl 0.1 N, e finalmente 5 vezes com água destilada para eliminar o HCl residual. O resíduo concentrado em óxido de Ti e óxidos e hidróxido de Fe foi então secado a 105°C por 12h.

Posteriormente, os óxidos e hidróxidos de Fe foram eliminados por tratamento com Ditionito-Citrato-Bicarbonato de sódio (DCB) segundo Mehra e Jackson (1960), concentrando, assim, o anatásio. Os procedimentos foram realizados no laboratório de Análises Químicas do IG-UFPA.

2.7 MEV-EDS

As análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e *Energy Dispersive Spectrometry* (EDS) foram empregadas para visualizar os cristalitos de anatásio no *Zentrum für Werkstoffanalytik Lauf* (ZWL), na Alemanha, pelo professor Marcondes Lima da Costa.

2.8 ANÁLISES QUÍMICAS

Foram realizadas análises químicas em 32 amostras na Geosol Laboratórios Ltda. Os elementos maiores foram analisados por fluorescência de raios-X (fusão com tetraborato de lítio); os elementos traço, por ICP (com digestão multiácida); e a perda ao fogo, por calcinação a 1000°C . Os resultados foram cedidos pela empresa Vicenza Mineração.

Os elementos maiores determinados foram SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO, TiO_2 , P_2O_5 , MnO e P.F., enquanto os elementos-traço foram Ag, As, Ba, Co, Cu, Ga, Hf, Hg, Mo, Nb, Ni, Pb, Sb, Sc, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Y, Zn, Zr e ETR (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu).

Também foram enviadas 13 amostras para *Acme Analytical Laboratories Ltda*, que analisou os mesmos elementos e ainda os Elementos Terras Raras (ETR). Os

elementos maiores foram obtidos por Espectrômetro de Emissão em Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-ES); 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 em Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS), após fusão utilizando metaborato/tetraborato 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.

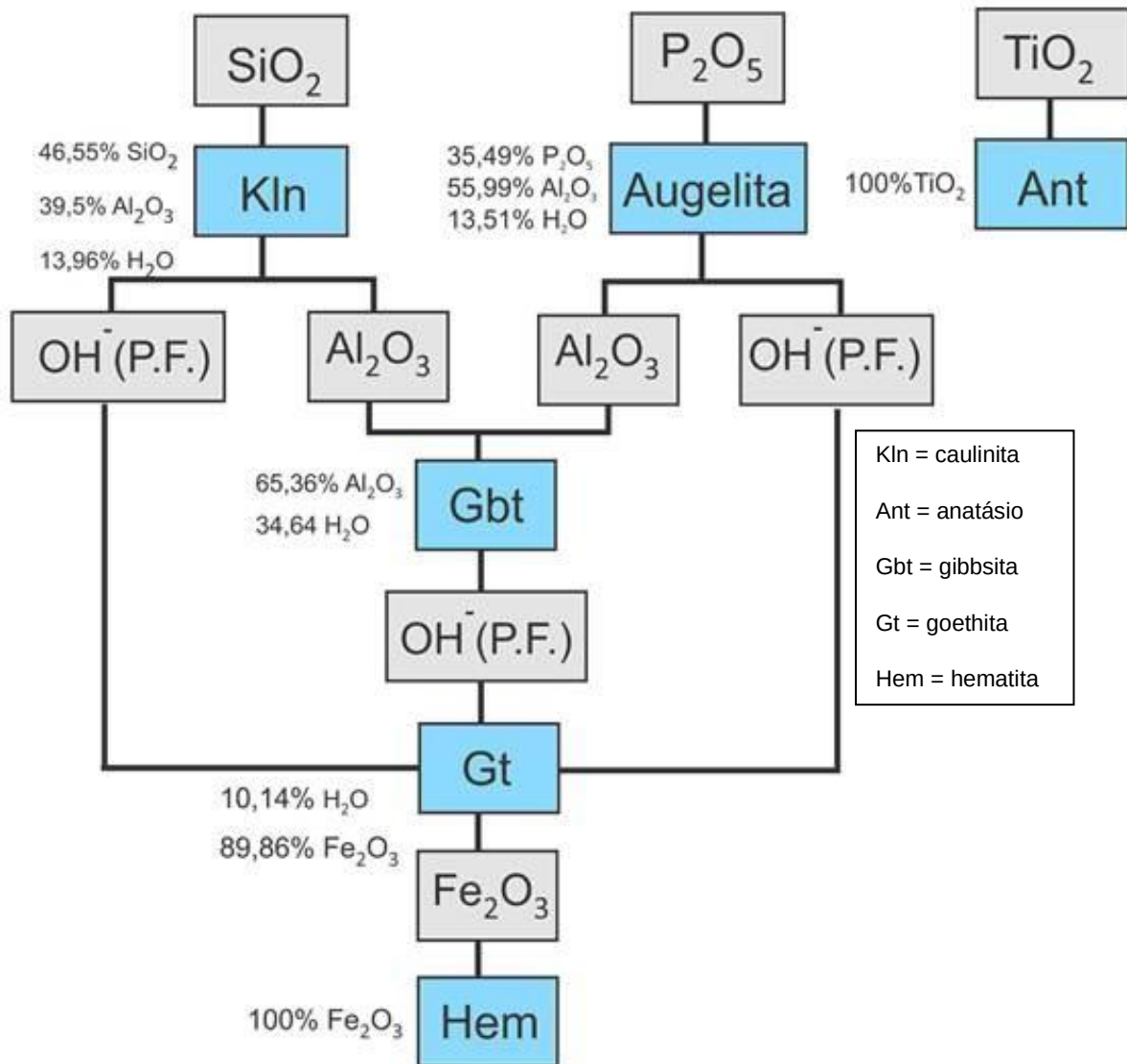
Os resultados foram tratados com o *Excel 2010* onde se gerou uma matriz de correlação com o objetivo de observar o grau de afinidade entre os elementos. Aqueles que apresentaram maior correlação foram usados para gerar diagramas binários. Foram eles Nb-Ta; Zr-Nb; Zr-Ta; TiO₂-ETR; Zr-ETR; Fe₂O₃-SiO₂; Fe₂O₃-Al₂O₃; Fe₂O₃-TiO₂; Al₂O₃- TiO₂; e Fe₂O₃-V. O diagrama ternário Fe₂O₃- SiO₂-Al₂O₃ foi elaborado para fins de classificação das amostras. Os ETR foram normalizados segundo o padrão condritico de Evensen, Hamilton e O'nions (1978) e plotados em diagramas multielementares para observar seu padrão de distribuição.

O comportamento dos elementos maiores SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, P₂O₅, e P.F. foi analisado em função da profundidade para analisar seu comportamento ao longo do perfil. A composição química foi ainda usada para auxiliar na análise mineralógica dos difratogramas de raios x e como base para quantificação das fases mineralógicas.

2.9 QUANTIFICAÇÃO DAS FASES MINERALÓGICAS

A quantificação das fases mineralógicas foi realizada por estequiometria segundo o fluxograma da figura 04 utilizando a composição química teórica de cada mineral. No caso dos teores de TiO₂, estes foram considerados como anatásio.

Figura 04: Determinação das concentrações dos minerais no perfil laterítico da Serra do Piriá com base em cálculos estequiométricos.



F

Fonte: Elaborado pelo autor.

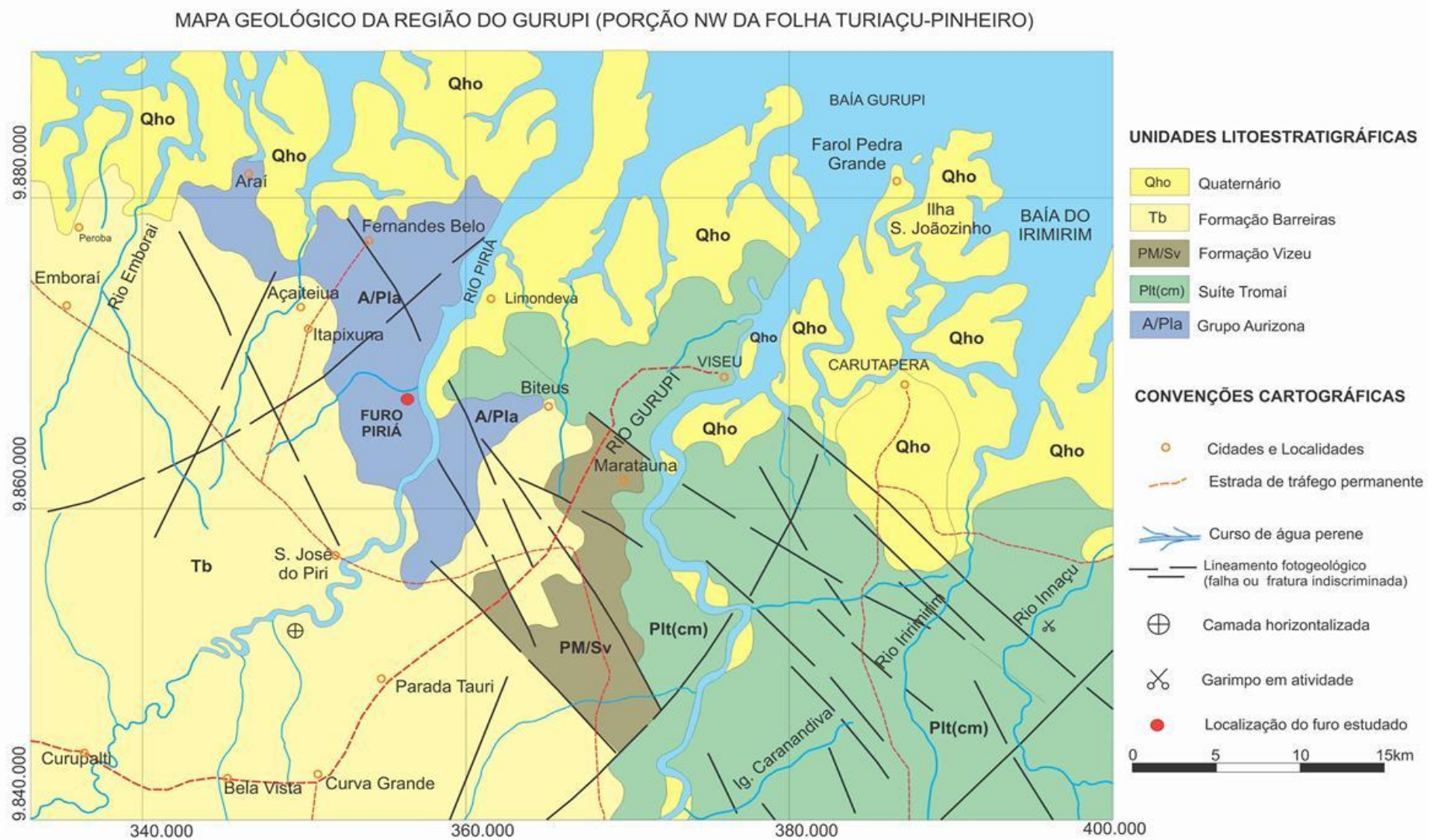
3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

3.1 LITOESTRATIGRAFIA

A região do Gurupi compreende dois domínios tectônicos e geocronológicos (Rb-Sr, K-Ar): o Cráton São Luís (Paleoproterozóico) e o Cinturão Gurupi (Neoproterozóico) (KLEIN; MOURA, 2003). Sobre eles se instalaram bacias sedimentares paleozóicas, mesozóicas e cenozóicas. Os depósitos lateríticos identificados na região se estabeleceram durante o Cenozóico sobre as rochas dos dois domínios e mesmo das bacias. As Unidades Litoestratigráficas aqui apresentadas foram cartografadas em escalas regionais (1: 250.000 a 1: 500.000) por Abreu, Villas e Hasui (1980), Pastana (1995), Costa (2000) e foram revisadas e sintetizadas por Klein e Moura (2003) e Klein et al. (2005).

O mapa geológico (figura 05) apresenta as principais Unidades Litoestratigráficas presentes na porção noroeste da Folha Turiaçu-Pinheiro, SA.23-V-D, mapeada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) (2001), onde se encontra a Serra do Piriá. As Unidades presentes no mapa compõem o Domínio do Craton São Luiz. São elas: Grupo Aurizona, Suíte Tromaí, Granito Areal, Suíte Intrusiva Tracuateua e Formações Vizeu, Igarapé da Areia e Piriá. A seqüência Meso-Cenozóica está representada pelas bacias sedimentares de São Luís e Bragança-Viseu. Nelas estão os sedimentos clásticos do Grupo Itapecuru, do Cretáceo Superior; os depósitos miocênicos Pirabas; e os depósitos fluviais da Formação Barreiras, de idade terciária (PASTANA, 1995). Porém, é no Grupo Aurizona que se inserem as rochas da Serra do Piriá, sobre as quais se formou a cobertura laterítica objeto do presente estudo.

Figura 05: Geologia da Região do Gurupi recortada da porção noroeste da Folha Turiaçu-Pinheiro, escala 1: 250.000 (CPRM, 2001). Vide localização do Furo Piriá, objeto do presente estudo.



Fonte: Modificado de CPRM (2001).

3.1.1 Grupo Aurizona

O Grupo Aurizona foi definido por Pastana (1995) e compreende uma seqüência metavulcano-sedimentar de facies xisto verde a anfibolito (subordinada), composta por xistos de naturezas diversas, filitos, quartzitos, rochas metapiroclásticas, metachert e algumas rochas metamáficas e metaultramáficas. Existe larga predominância de termos paraderivados em relação aos ortoderivados. As rochas apresentam xistosidade com mergulhos fortes para NE. Klein e Moura (2001) dataram cristais de zircão de uma rocha metapiroclástica, definindo uma idade de 2240 ± 5 Ma para essa unidade. A seqüência é intrudida por granitóides da Suíte Intrusiva Tromaí e pelo Granito Areal (KLEIN et al., 2005).

3.1.2 Suíte Tromaí

Esta unidade, de grande extensão geográfica, é composta por batólitos compostos predominantemente por tonalitos, com trondhjemitos, granodioritos e monzogranitos subordinados. As idades Rb-Sr e K-Ar são 2076 ± 96 Ma e 1945 ± 90 Ma, respectivamente, e são ricas em enclaves de rochas máficas e intermediárias. (KLEIN et al., 2005).

3.1.3 Granito Areal

Segundo Klein e Moura (2003), o Granito Areal é constituído por sienogranitos com idade de 2150 Ma, de coloração rosada, inequigranulares a porfiríticos. Localmente foram atingidos por zonas de cisalhamento discretas, e apresentam enclaves de rochas metavulcano-sedimentares com dimensões métricas a decamétricas. Considerado inicialmente fácies da Suíte Intrusiva Tromaí (PASTANA, 1995), foi desmembrado da mesma por Klein et al. (2005) devido representar um magmatismo distinto daquela suíte.

3.1.4 Suíte Intrusiva Tracuateua

A Suíte Intrusiva Tracuateua reúne os corpos granitóides aflorantes no município homônimo, Mirasselas, Tauari e próximo às cidades de Capanema e Bragança (KLEIN; MOURA, 2003). São rochas isotrópicas a foliadas, com biotita e muscovita; e portam enclaves de xistos e migmatitos (LOWELL, 1985 apud KLEIN;

MOURA, 2003). As características petrográficas e geoquímicas dessas rochas foram consideradas compatíveis com as de granitóides tipo S (COSTA, 2000). Foram determinadas idades de cristalização entre 2086 e 2091 Ma em zircão e idades modelo Sm-Nd (TDM) entre 2,31 e 2,50 Ga (PALHETA, 2001 apud KLEIN; MOURA, 2003).

3.1.5 Formações Igarapé de Areia, Viseu e Piriá

As Formações Igarapé de Areia, Viseu e Piriá representam depósitos sedimentares de origem continental de clima semiárido (arenitos arcossianos, pelitos e conglomerados), com pacotes dobrados, foliados e localmente anquimetamorfizados. Estas unidades são entendidas por Abreu, Villas e Hasui (1980) como bacias molássicas. Segundo Klein e Moura (2003), seu posicionamento estratigráfico tem variado largamente, do Proterozóico ao Eopaleozóico, em função das diferentes concepções evolutivas adotadas para a região.

3.1.6 Grupo Itapecuru

Trata-se de um espesso pacote sedimentar, essencialmente siliciclástico composto principalmente por arenitos cauliniticos finos com níveis argilosos a conglomeráticos, depositados em ambiente fluvial, sob condições climáticas semi-áridas. Trata-se provavelmente de arenitos arcossianos que, posteriormente, sofreram intenso intemperismo. Os arenitos exibem abundante estratificação cruzada. Ocorrem igualmente siltitos e arenitos vermelhos subordinados contendo brechas intraformacionais e estruturas de corte e preenchimento (GÓES, 1981).

3.1.7 Formação Pirabas

A Formação Pirabas é uma sucessão carbonática composta por intercalações secundárias de folhelhos negros a esverdeados e arenitos amarelados (FERREIRA, 1966 apud ROSSETTI, 2006) que ocorre no Pará, Maranhão e Piauí. Seu rico e variado conteúdo fóssilífero permitiu o estabelecimento de sua idade no Mioceno (FERNANDES, 1984 apud ROSSETTI, 2006).

Estes depósitos são atribuídos a ambientes marinho raso restrito e marinho transicional, dado o conteúdo paleontológico representado por uma variedade de fósseis de invertebrados (URDINÍNEA, 1977 apud GÓES; ROSSETTI, 2004). O

arranjo de seus depósitos evidenciam domínio geral de padrão progracional, revelado pela superposição de fácies progressivamente mais costeiras associadas à sistema deposicional contendo ilhas-barreira.

3.1.8 Formação Barreiras

A Formação Barreiras possui composição genericamente siliciclástica, consistindo em arenitos quartzosos, depósitos heterolíticos, argilitos e, menos comumente, conglomerados atribuídos a ambiente flúvio-estuarino (ROSSETTI, 2006). Esta Unidade recobre discordantemente as rochas supracrustais do Grupo Aurizona e as plutônicas da Suíte Tromaí, além das rochas sedimentares das unidades Igarapé de Areia, Viseu, Itapecuru e Pirabas. No topo encontra-se parcialmente recoberta por sedimentos quaternários, notadamente próximos à zona litorânea (PASTANA, 1995).

3.1.9 Quaternário

Segundo Pastana (1995), o quaternário da região litorânea do Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão está representado por dunas, depósitos lacustres sazonais, deltaicos e de maré. A rede de drenagem meandrante responde pela grande quantidade de argila no sistema aquoso. O fenômeno das macromarés é responsável pela penetração de material marinho nos sistemas fluviais Piriá, Gurupi, Maracaçumé e Turiaçu, provocando a mistura de depósitos de rios meandantes com materiais transportados pelas marés, gerando depósitos híbridos e extensos depósitos de supramaré lamosa, na qual se desenvolve a vegetação típica de mangue (PASTANA, 1995).

3.2 AS FORMAÇÕES LATERÍTICAS DA REGIÃO DO GURUPI

As ocorrências de formações lateríticas mineralizadas em fosfatos de alumínio e por vezes bauxita são Sapucaia, Boa Vista, Jandiá, Cansa Perna, Itacupim, Pedra Grande, Piriá e Peito de Moça, no Pará; e Pirocaua, Trauíra e Tromaí, no Maranhão (figura 06), sendo as mais expressivas, ao nível de depósito mineral, Sapucaia, Itacupim, Pirocaua e Trauíra, que formam um conjunto de pequenos platôs, conhecidos na região como serras, sendo que alguns já estão circundados pelas águas do Atlântico, formando ilhas (Itacupim e Trauíra).

Figura 06: Depósitos lateríticos maduros na porção litorânea do NE do Pará e NW do Maranhão



Fonte: Modificado de Costa e Sá, 1980; Costa, 1980, 1990).

Os primeiros estudos sobre lateritos fosfáticos, então mais conhecidos como bauxitas fosforosas foram desenvolvidos por Brant (1932), quando descobriram o depósito de Trauíra no Maranhão. Nesta oportunidade realizaram trabalhos de cartografia, sondagem e estabelecimento de um túnel. Com isto coletaram inúmeras amostras e realizaram análises químicas e mineralógicas, concluindo que se tratava de um depósito de fosfatos aluminosos, em que o fósforo era de origem orgânica. Não havia menção à lateritização.

Suszcynski (1975) explicou a gênese dos fosfatos por bauxitização parcial de zona fosfática intempérica de origem supergênica. Posteriormente, Costa et al. (1977) propuseram que transgressões marinhas sobre lateritos teriam depositados fosfatos que cimentaram os mesmos e sofreram posterior processo de lateritização. Já Oliveira e Schwab (1979) propuseram que soluções hidrotermais teriam remobilizado fósforo de horizontes enriquecidos dos metassedimentos do Grupo Gurupi, com precipitação em fraturas e brechas de falhas, para as ocorrências de Santa Luzia (PA).

Costa (1980) propõe para as ocorrências de Cansa Perna, Itacupim, Pirocaua e Trauira um modelo de enriquecimento supergênico com intensa lateritização de rochas mineralizadas em apatita ou com fosfatos de Al de origem não supergênica, no caso dos depósitos de Santa Luzia (PA).

Os diversos depósitos lateríticos do Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão foram posicionados no Eoceno-Oligoceno (OLIVEIRA; COSTA, 1984), idade que coincide com a peneplanação sul-americana, quando se formaram os lateritos do Suriname, Guiana Francesa e da Província Bauxitífera de Paragominas (KOTSCHOUBEY et al., 2007).

Costa (1991) propôs uma classificação genérica para os lateritos, em função do elemento ou do mineral de maior importância em termos de enriquecimento e significado econômico, distinguindo a categoria de laterito fosfático, na qual se inserem estes depósitos.

3.3 A FORMAÇÃO LATERÍTICA DA SERRA DO PIRIÁ

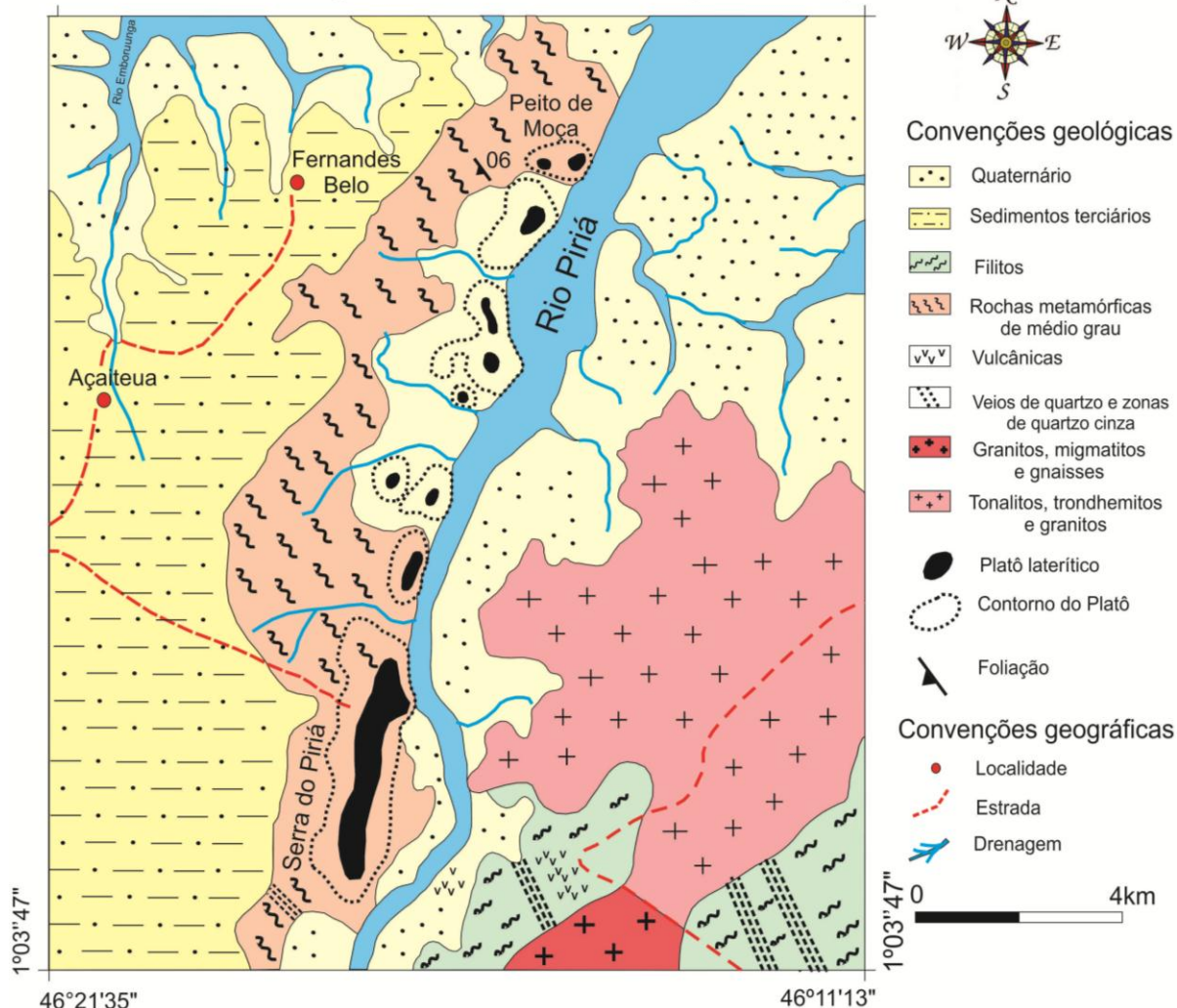
A Serra do Piriá se apresenta como um conjunto de platôs e morros alinhados segundo a direção N-S, ao longo da margem esquerda do rio homônimo, no município de Viseu (PA). Todo o conjunto se estende por cerca de 6km e alcança 100m de altitude máxima. A crosta ferruginosa situada na porção Norte foi explotada durante as décadas de 1980 e 1990 pela Cimentos do Brasil S/A (CIBRASA) como minério complementar para dosagem do calcário de Capanema, visando a fabricação de cimento nesta cidade.

O primeiro estudo sobre os lateritos da Serra do Piriá foram realizados por Costa (1982), quando identificou os principais horizontes de seu perfil, comparando com os demais depósitos da região do Gurupi: rocha mãe; horizonte transicional; horizonte caulínico; horizonte bauxítico-fosfático; e crosta ferruginosa. Como rochas-mãe foram consideradas aquelas aflorantes nos barrancos do rio Piriá, na base da serra, constituídas por rochas metamórficas de médio grau (anfíbólio-mica-albita-silimanita) (COSTA, 1982, figura 07). Nesta oportunidade, o mesmo autor identificou, além dos minerais clássicos de perfil laterítico maduro, como gibbsita, caulinita, anatásio, hematita e goethita, os fosfatos de alumínio, como variscita,

crandallita e augelita. Nas cavernas identificou, além desses fosfatos, leucofosfita e estrengita. Os teores de P_2O_5 na crosta atingiam 0,7% enquanto nas cavernas 41,18%. Por sua vez, Gonçalves, Kotschoubey e Maurity (2001), não identificaram fosfatos, considerando-a tipicamente laterítica bauxítica. Provavelmente sua amostragem tenha sido restrita. Além disto, Costa (1982) descreve os fosfatos em cavernas da Gruta do Piriá, os quais não são de origem laterítica, e sim de guanos, fato identificado posteriormente por Gonçalves, Kotschoubey e Maurity (2001), que atribui a guano em contato com os hidróxidos de Al e Fe da crosta.

Figura 07: Geologia da Serra do Piriá e suas proximidades.

Contexto Geológico da Serra do Piriá (Vizeu-PA)



Fonte: Elaborado pelo autor, modificado de Costa(1982).

Pinheiro e Maurity (2001) investigaram estas mesmas cavernas da Serra do Piriá e salientam que são exemplos raros em rochas bauxíticas. Os mesmos consideram que o número de ocorrências de cavernas e abrigos na Serra do Piriá justifica a identificação desta área como uma "Província Espeleológica". Souza, Kotschoubey e Lima (2001), examinaram o quimismo das águas nascentes da Serra do Piriá para avaliar o atual intemperismo, correlacionável como aquele que deu origem ao perfil laterítico no Paleógeno.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

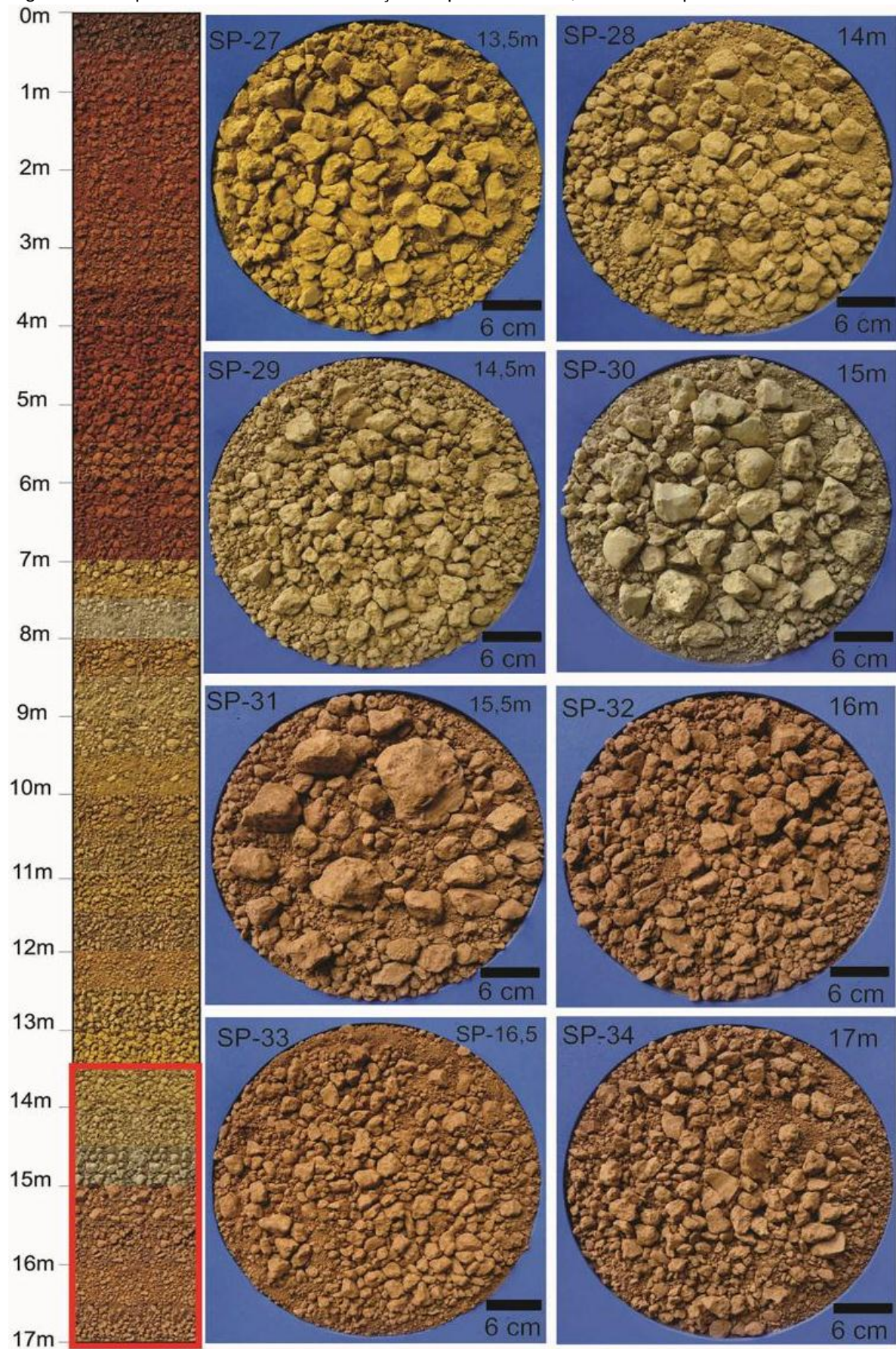
4.1 O PERFIL LATERÍTICO

A porção estudada do perfil laterítico da Serra do Piriá pode ser compartimentada em dois horizontes que da base para o topo são: horizonte argiloso bauxítico e crosta ferruginosa bauxítica. O aspecto fragmentado das amostras não representa seu estado natural (figuras 08, 09, 10, 11). Ele é resultante da perfuração por trado mecânico e do próprio procedimento de amostragem adotado pela empresa, onde as amostras são fragmentadas antes de serem ensacadas. A característica mais marcante é o contraste de cor existente entre os dois horizontes, dado pelo amarelo ocre do horizonte argiloso bauxítico e pelo vermelho amarronzado da crosta ferruginosa bauxítica (figuras 08, 09, 10, 11).

O horizonte argiloso bauxítico ocorre entre 7 e 17m de profundidade. Nele observam-se fragmentos argilo-arenosos com 0,5 a 4cm de diâmetro e de cor amarelo ocre a amarelo pálido (figura 08, amostras SP-30 a SP-27 e figura 09), apresentando porções esbranquiçadas e avermelhadas; e, localmente, ocorrem estruturas representadas pela alternância de lâminas amareladas, avermelhadas e esbranquiçadas, sugestivas de serem uma foliação reliquiar (figura 12c). Entre 17 e 15m, os fragmentos argilo-arenosos gradam do amarelo ocre para um tom rosado com porções esbranquiçadas (figura 08, amostras SP-34 a SP-31).

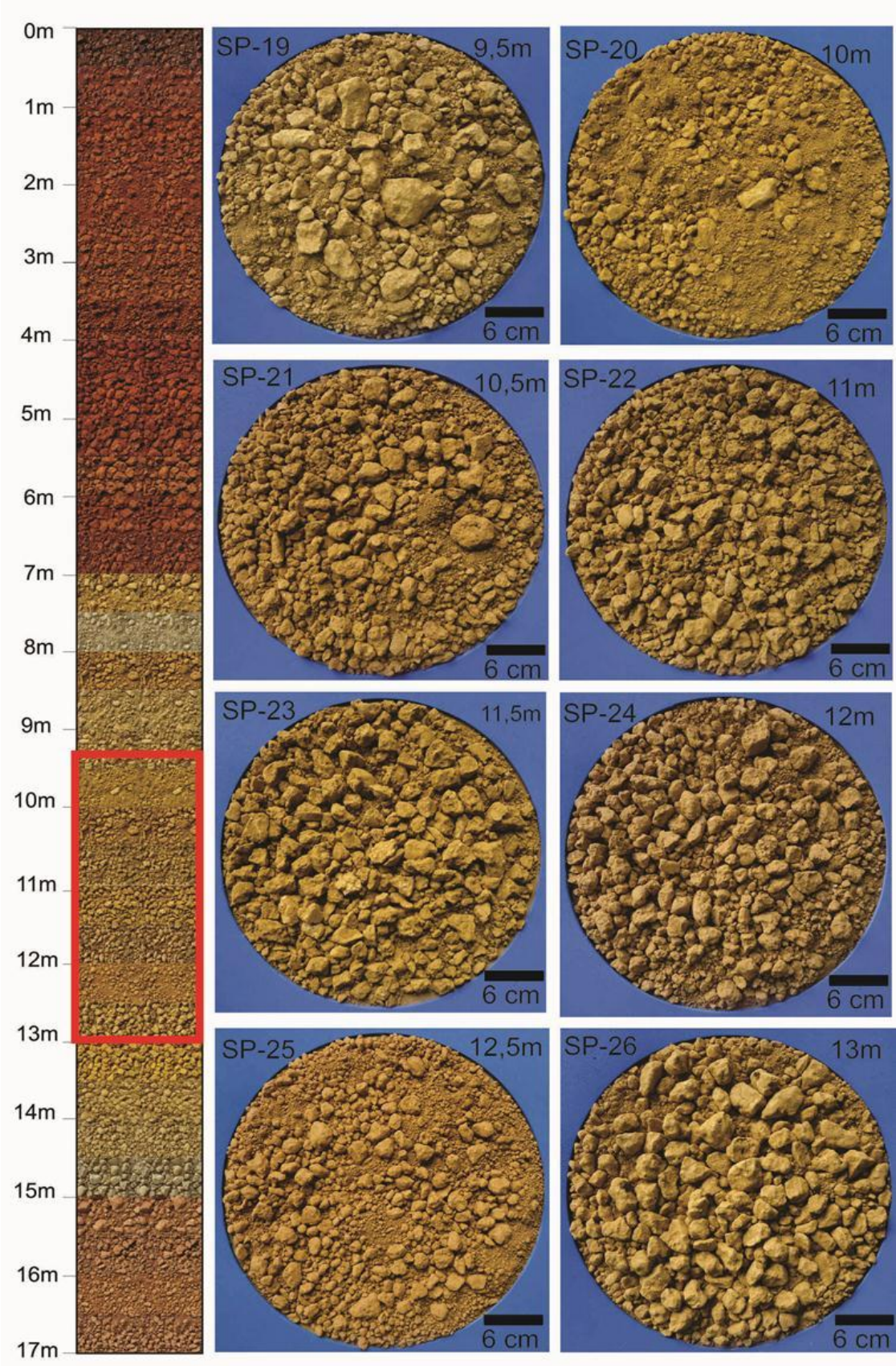
No horizonte argiloso bauxítico ocorrem nódulos de gibbsita com caulinita associada (figura 16a). A frequência dos nódulos aumenta da base para o topo deste horizonte e no intervalo entre 7 e 11m eles estão em maior quantidade. Os nódulos estão envolvidos pela matriz argilo-arenosa de cor amarelada que caracteriza o horizonte argiloso bauxítico.

Figura 08 - Aspectos texturais e de coloração do perfil entre 13,5 e 17m de profundidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

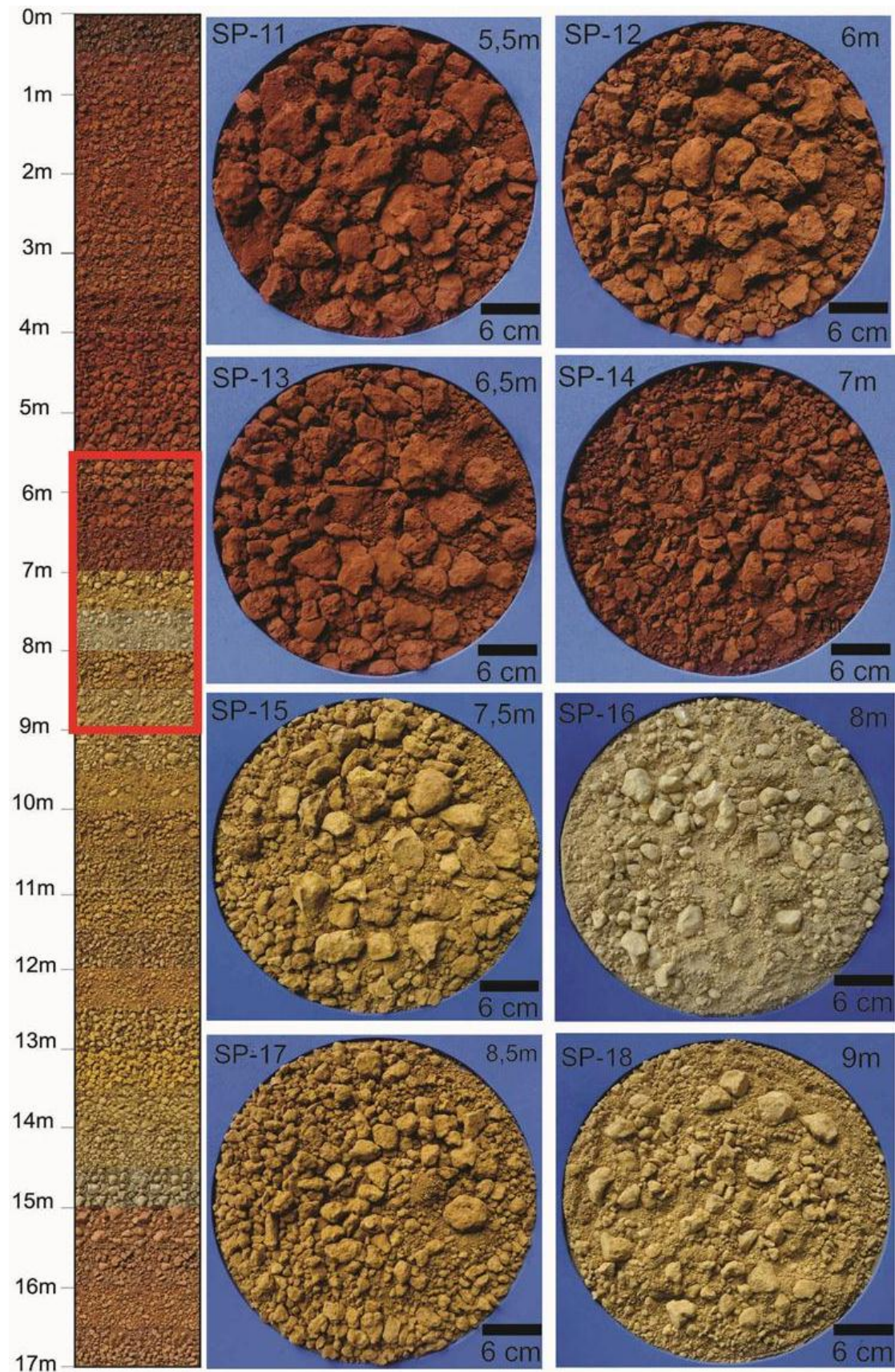
Figura 09 - Aspectos texturais e de coloração do perfil laterítico entre 9,5 e 13m de profundidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

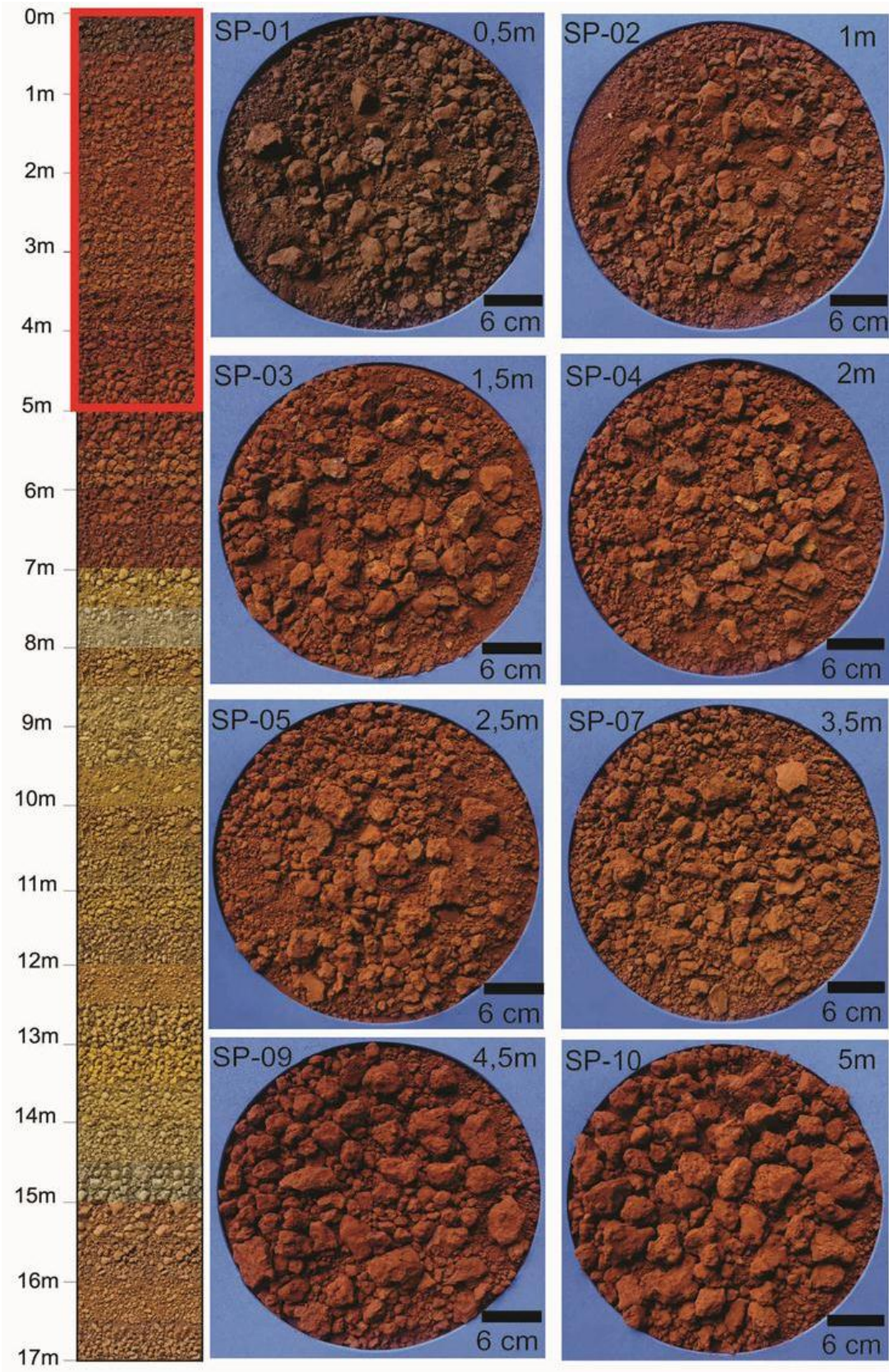
A crosta ferruginosa bauxítica se sobrepõe ao horizonte argiloso bauxítico em contato brusco, se estendendo de 7m de profundidade até a superfície, de cor marrom avermelhada passando a marrom escura no último meio metro em decorrência do acúmulo de matéria orgânica (figuras 10 e 11). São cavernosas e as cavidades estão revestidas por goethita.

Figura 10 - Aspectos texturais e de coloração do perfil laterítico entre 5,5 e 9m de profundidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 - Aspectos texturais e de coloração do perfil laterítico entre 0,5m e 5m de profundidade

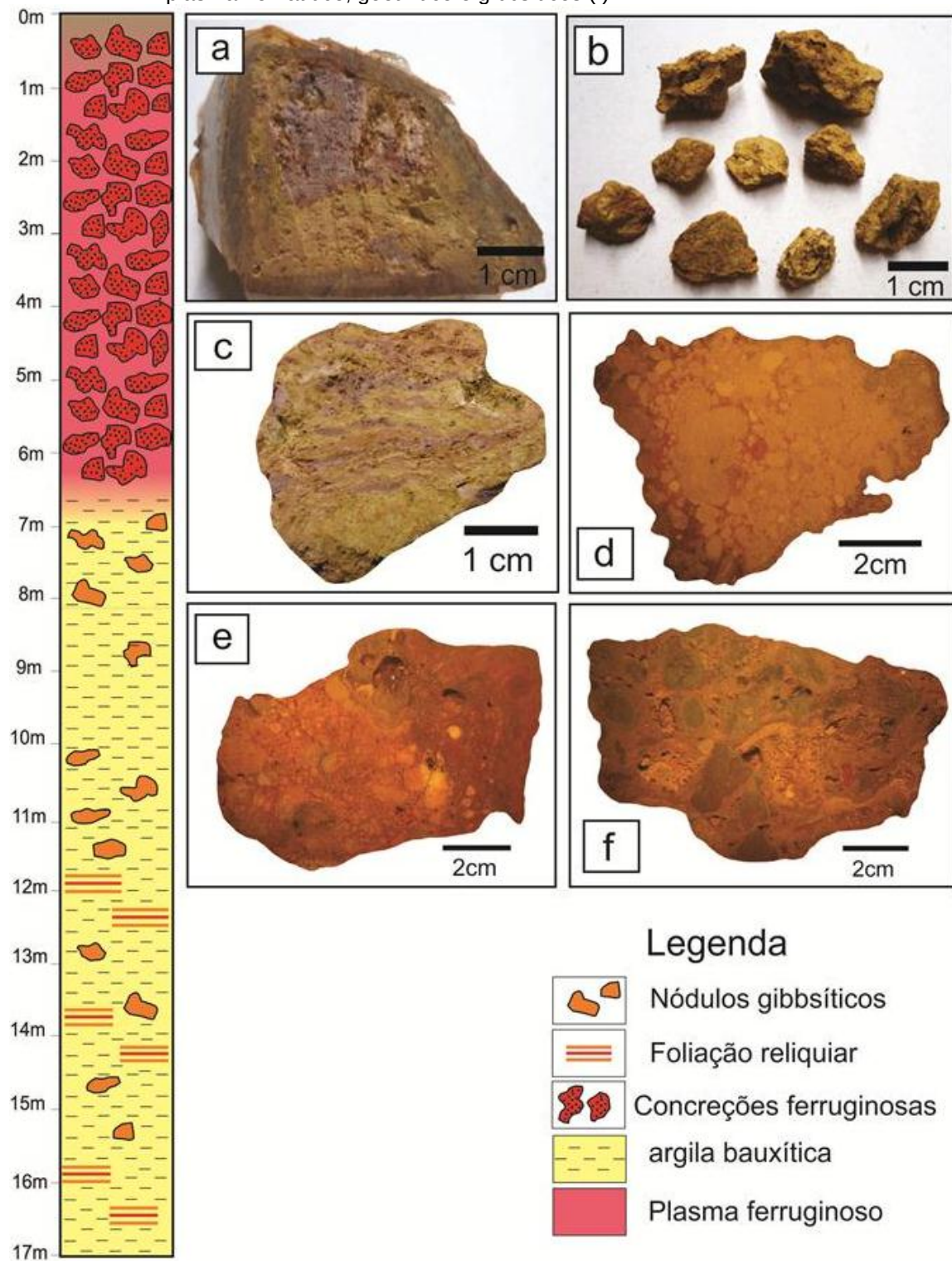


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os principais aspectos texturais observáveis macroscopicamente no perfil estão apresentados na figura 12. Da base para o topo, o horizonte argiloso bauxítico apresenta uma matriz argilosa amarelada, em que a caulinita, mineral de argila dominante, é impregnada por goethita, responsável pela sua cor. Localmente esta matriz se apresenta associada a um plasma avermelhado a arroxeadado de hematita, o que lhe confere aspecto mosqueado (figura 12a). Nessa matriz são abundantes os nódulos gibbsíticos igualmente amarelos com até 3cm de diâmetro (figura 12b). Distingue-se também a estrutura foliada reliquiar (figura 12c), sugestiva de rocha xistosa.

A crosta ferruginosa bauxítica é formada por pisólitos (figura 12d, e) e nódulos ferruginosos pisolíticos (figura 12f) cimentados por um plasma micro a criptocristalino composto por gibbsita, goethita e hematita. O aspecto cavernoso é marcante neste horizonte.

Figura 12 - Feições mesoscópicas encontradas nos horizontes do perfil laterítico da Serra do Piriá. Argila bauxítica mosqueada (a); nódulos gibbsíticos (b); laminação sugestiva de xistosidade reliquiar (c); feições pisolíticas (d) e (e); concreções ferruginosas em plasma hematítico, goethítico e gibbsíticos (f).



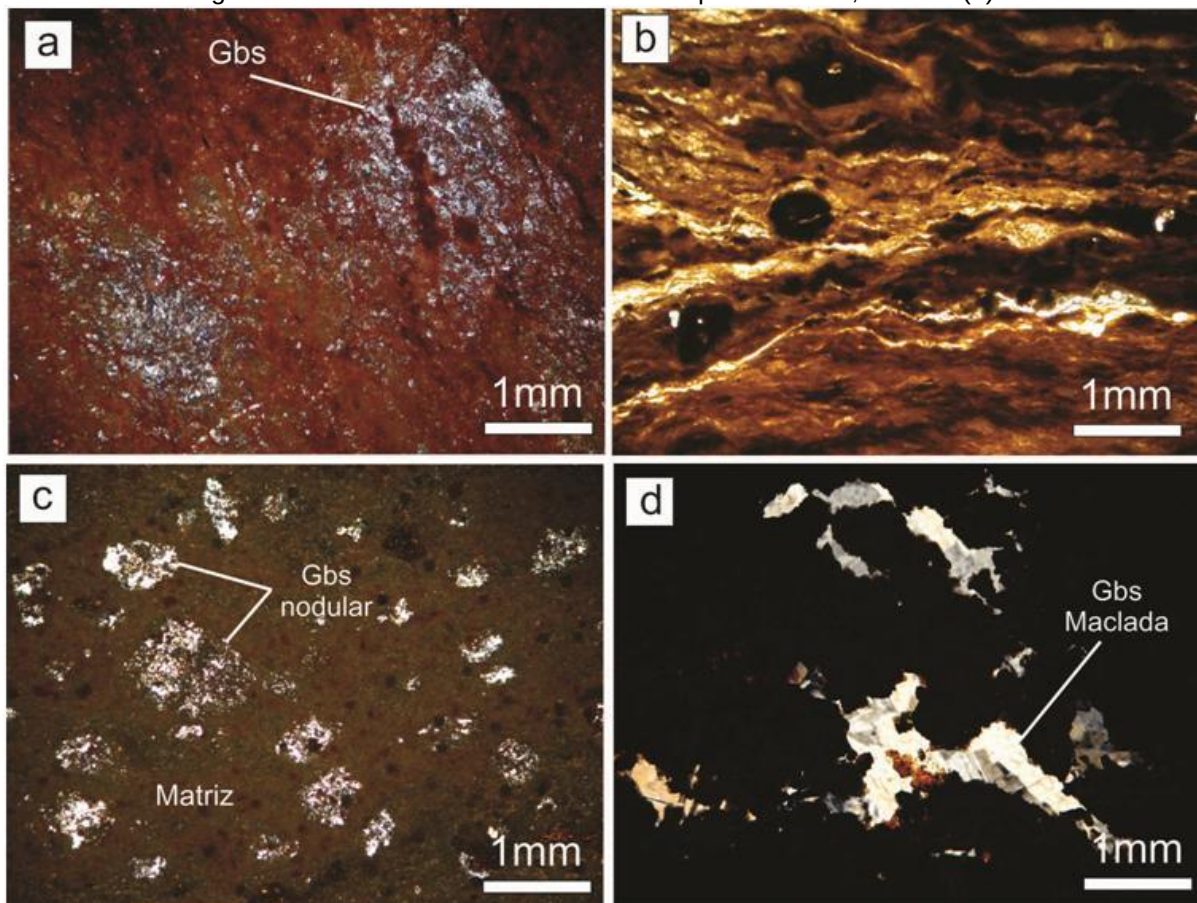
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1 Aspectos micromorfológicos

A matriz argilosa está associada a cristaltos de gibbsita (figura 13a). Destacam-se neste horizonte laminação dada pela alternância de bandas brancas, amarelas e marrons avermelhadas. Os tons amarelados e avermelhados são dados pela impregnação da caulinita por goethita e os esbranquiçados correspondem ao domínio de caulinita e gibbsita (figura 13a, b).

Observam-se duas gerações de gibbsita: uma é cripto a microcristalina, compondo juntamente com a caulinita a matriz do horizonte argiloso bauxítico (figura 13a) e constitui núcleos nodulares (figura 13c). A segunda geração é mesocristalina, preenchendo poros em meio à matriz caulínica e exibindo por vezes o maclamento polissintético (figura 13d).

Figura 13 - Aspectos micromorfológicos do horizonte argiloso bauxítico. Matriz argilosa associada a cristálitos de gibbsita, nicóis x (a). Estrutura reliquiar dada pela alternância de bandas brancas, amareladas e marrons avermelhadas, nicóis // (b). Nódulos de gibbsita microcristalina em matriz argilosa, nicóis x (c). Poros preenchidos por gibbsita mesocristalina com maclamento polissintético, nicóis x (d).

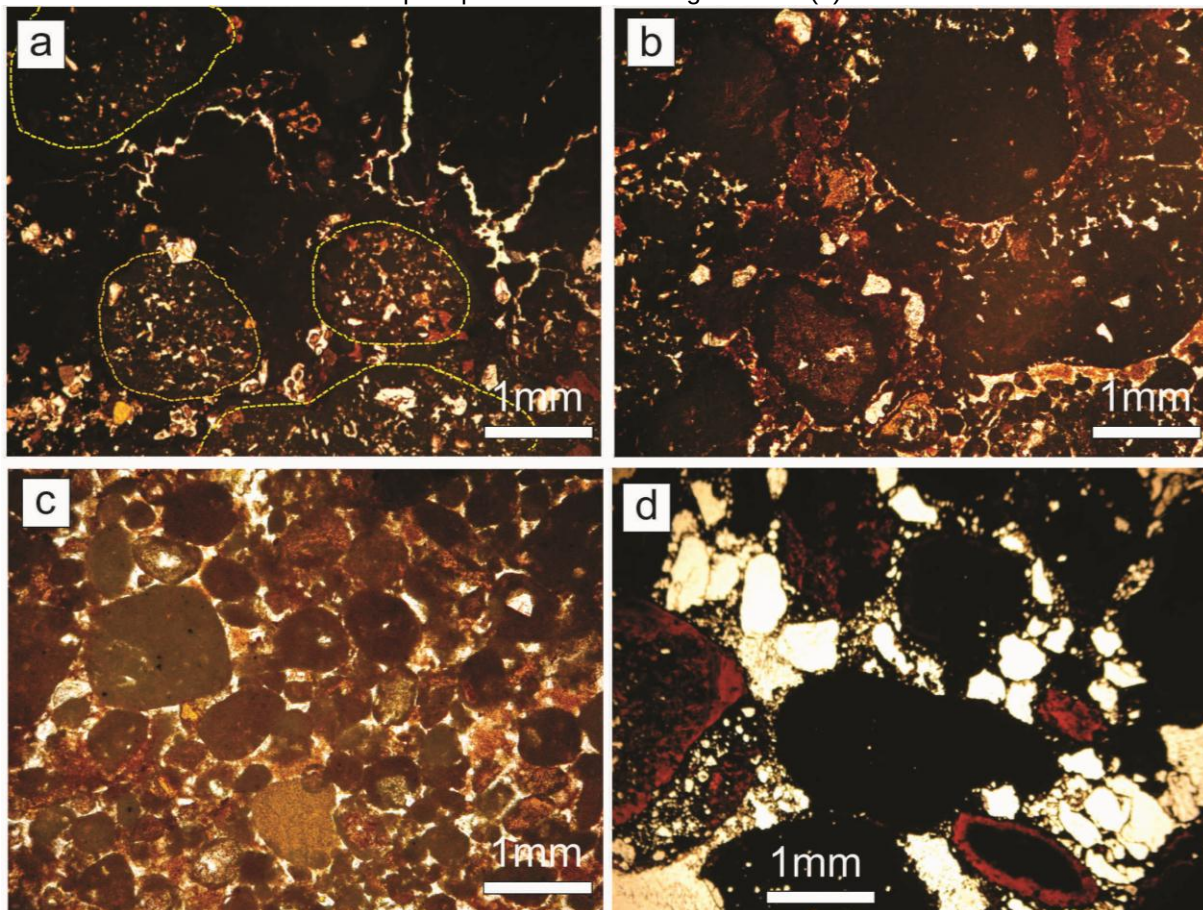


Fonte: Elaborado pelo autor.

A crosta ferruginosa bauxítica, ao microscópio, se apresenta como um plasma microfraturado, desenvolvendo feições tipo concreções (figura 14a), nódulos (figura 14b) e até oólitos e pisólitos intraplasma. As feições pisolíticas são compostas por alterorrelictos ferruginosos cimentados por uma matriz gibbsítica microcristalina (figuras 14c). Alguns desses pisólitos envolvem cristais reliquiais de quartzo contidos em seu núcleo. A gibbsita microcristalina preenche poros e fraturas; e, de maneira semelhante ao que ocorre no horizonte argiloso bauxítico, é formada por cristaliplasma gibbsítico com impregnações de oxi-hidróxidos de ferro.

Localmente, a crosta apresenta aspecto granular, conferido por grãos reliquiais de quartzo em um plasma ferruginoso (figura 14d). Os mesmos apresentam bordas irregulares, sugestivas de corrosão. Nódulos hematíticos se encontram associados aos grãos de quartzo e imersos no plasma também ferruginoso. Em alguns destes se apresentam envolvidos por goethita (figura 14d).

Figura 14 - Aspectos texturais da crosta ferruginosa bauxítica. Concreções ferruginosas imersas em plasma microfraturado com preenchimento por gibbsita (a). Nódulos ferruginosos e fragmentos de quartzo reliquiais cimentados por plasma hematítico-goethítico (b). Feições pisolíticas ferruginosas em cristaliplasma gibbsítico (c). Crosta de aspecto granular, onde grãos de quartzo reliquiais juntamente com nódulos ferruginosos são cimentados pelo plasma hematítico-goethítico (d).



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

O horizonte argiloso bauxítico é composto essencialmente por caulinita, gibbsita, goethita e anatásio (figuras 15 e 16). Já a crosta ferruginosa bauxítica, distingue-se apenas pela abundância desses minerais e pela presença de hematita, que é preponderante junto com a goethita (figuras 17 e 18), além da ausência de caulinita.

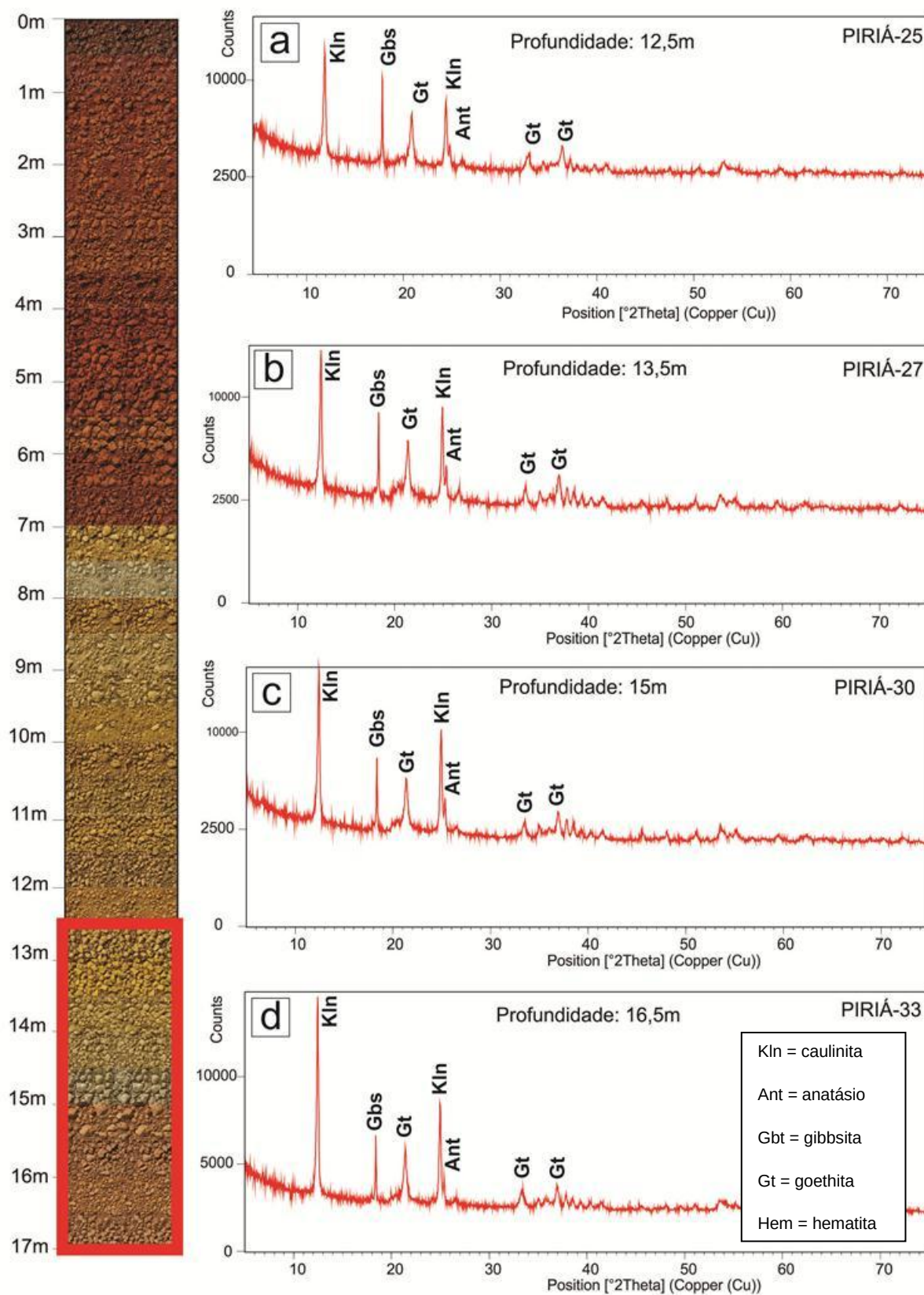
Augelita, zircão e quartzo são comuns aos dois horizontes, porém apenas como acessórios. Esses minerais foram identificados por microscopia ótica e em parte por DRX. A augelita, embora não apresente picos bem distintos nos difratogramas, é apontada pelo *X' Pert High Score Plus* como um mineral provável. A

presença de fosfato é corroborada pelos teores de P_2O_5 que alcançam 0,72%, valor acima da média crustal de 0,17% (TAYLOR; MCLENNAN, 2001).

Gonçalves, Kotschoubey e Maurity (2001) não haviam identificado fosfatos na cobertura laterítica da serra, apenas em suas cavernas, atribuindo-os a processos biológicos. Porém os resultados aqui apresentados estão em conformidade com Costa (1982), que identificou na Serra do Piriá os mesmos minerais principais e, além da augelita, identificou crandallita e variscita.

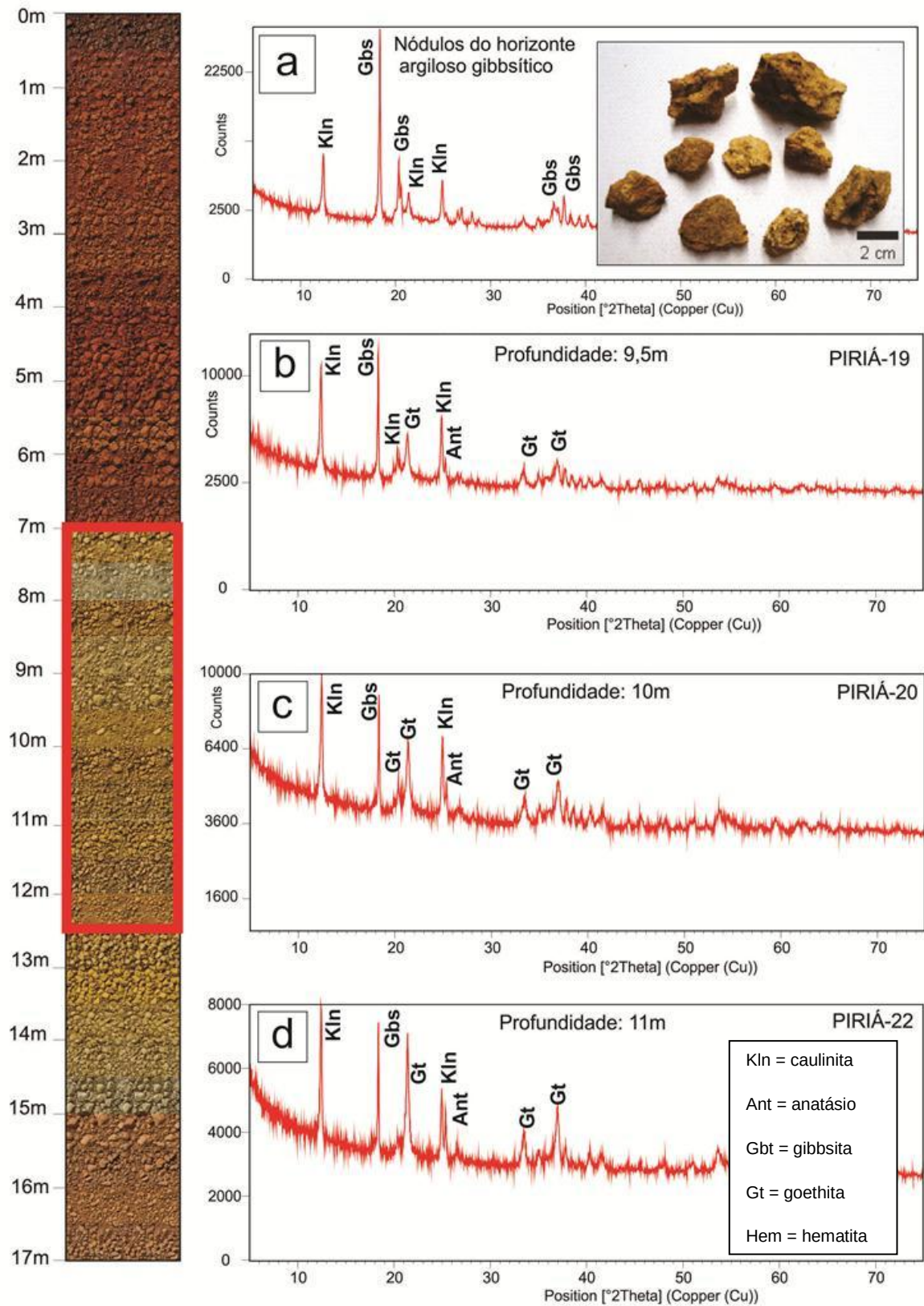
O zircão foi identificado por microscopia ótica e confirmado pelas concentrações de Zr entre 250 e 380ppm. Este mineral é o provável portador das concentrações de Hf, Ta e ETR.

Figura 15 - Principais minerais identificados por DRX no horizonte argiloso bauxítico entre 17 e 12,5m de profundidade.



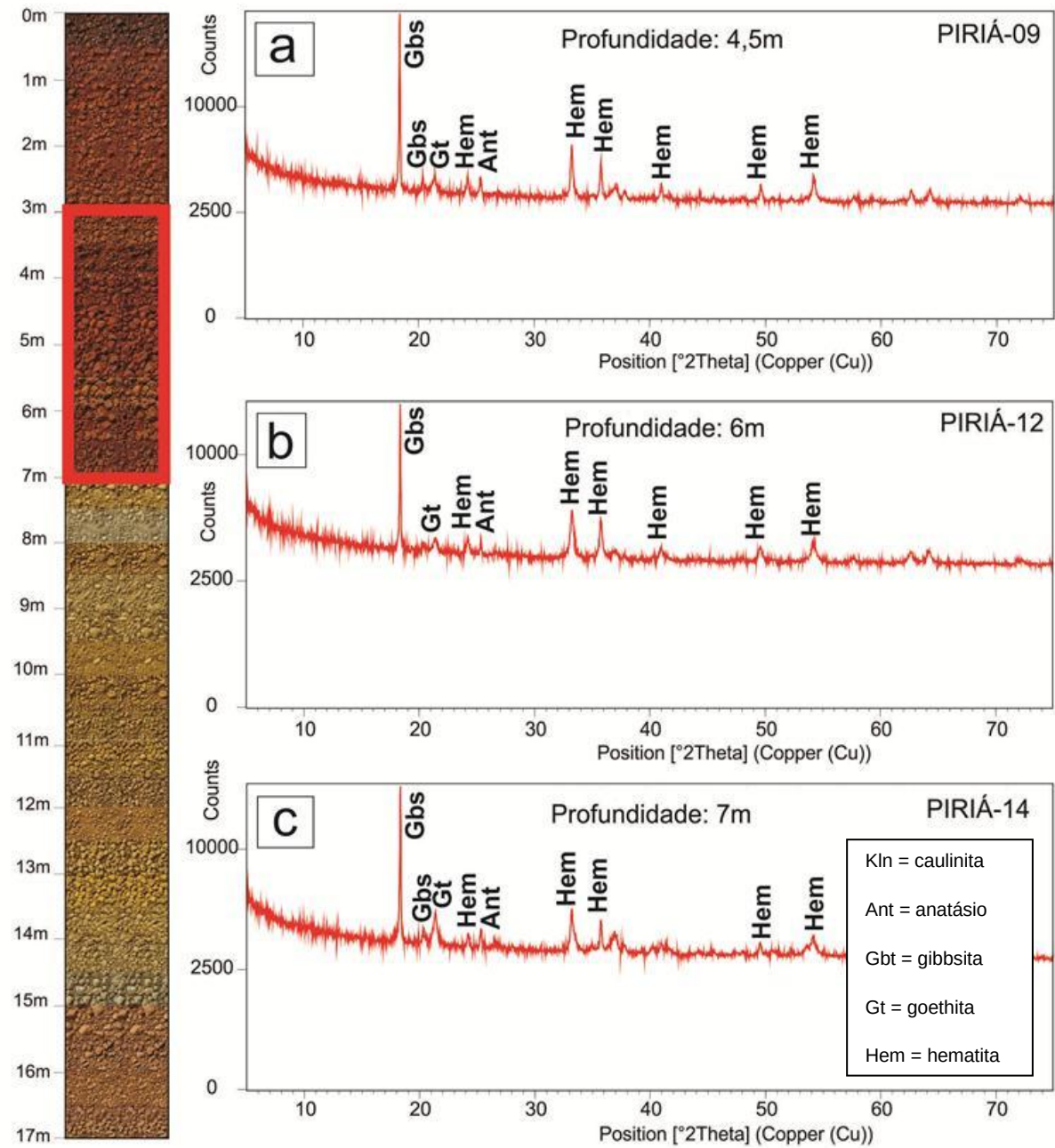
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Principais minerais identificados por DRX no horizonte argiloso bauxítico entre 11 e 9,5m de profundidade; composição dos nódulos presentes neste horizonte (a).



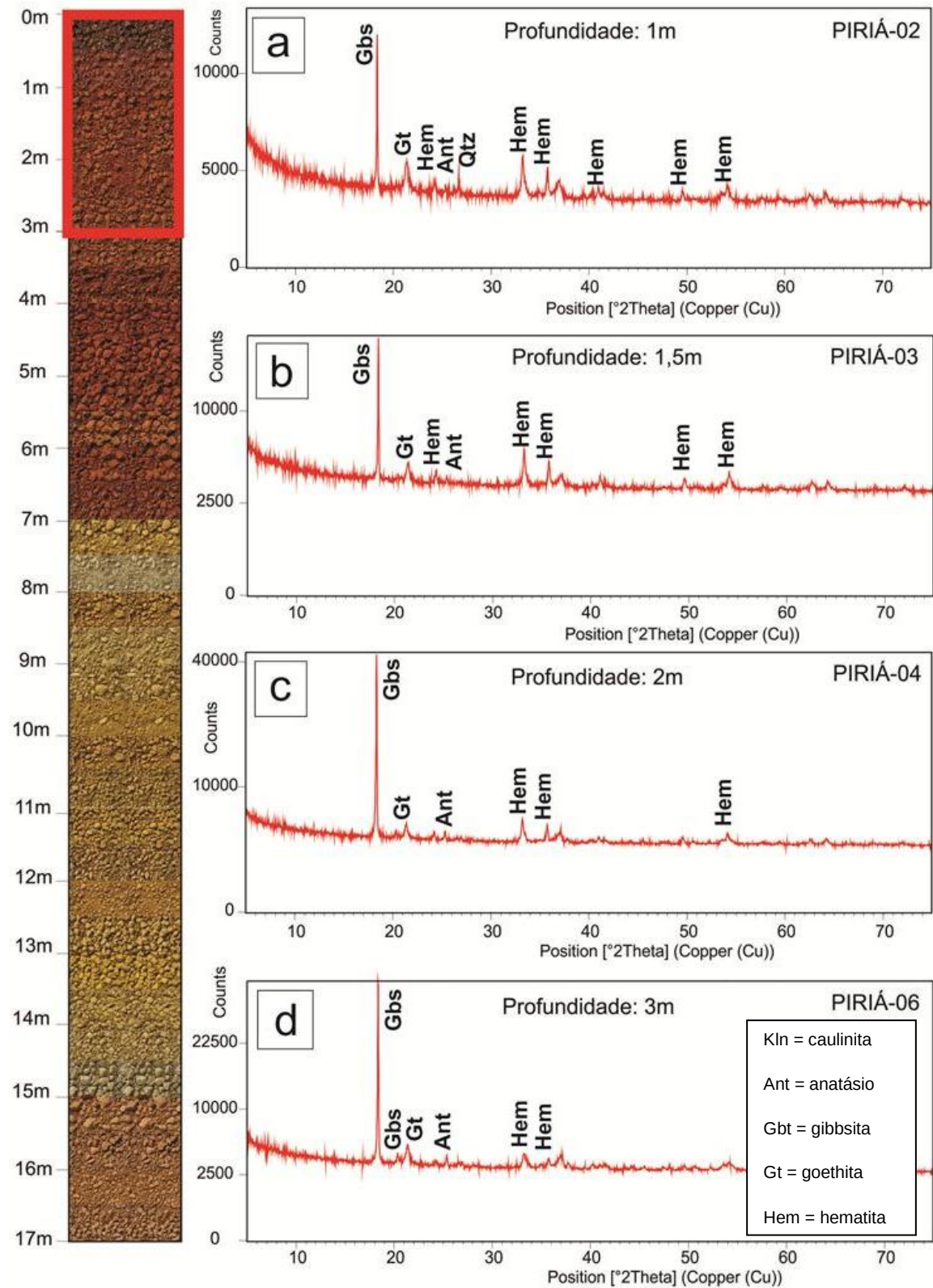
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Principais minerais identificados por DRX na crosta ferruginosa bauxítica entre 7 e 4,5m de profundidade.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18 - Principais identificados por DRX na crosta ferruginosa bauxítica entre 3 e 1m de profundidade.

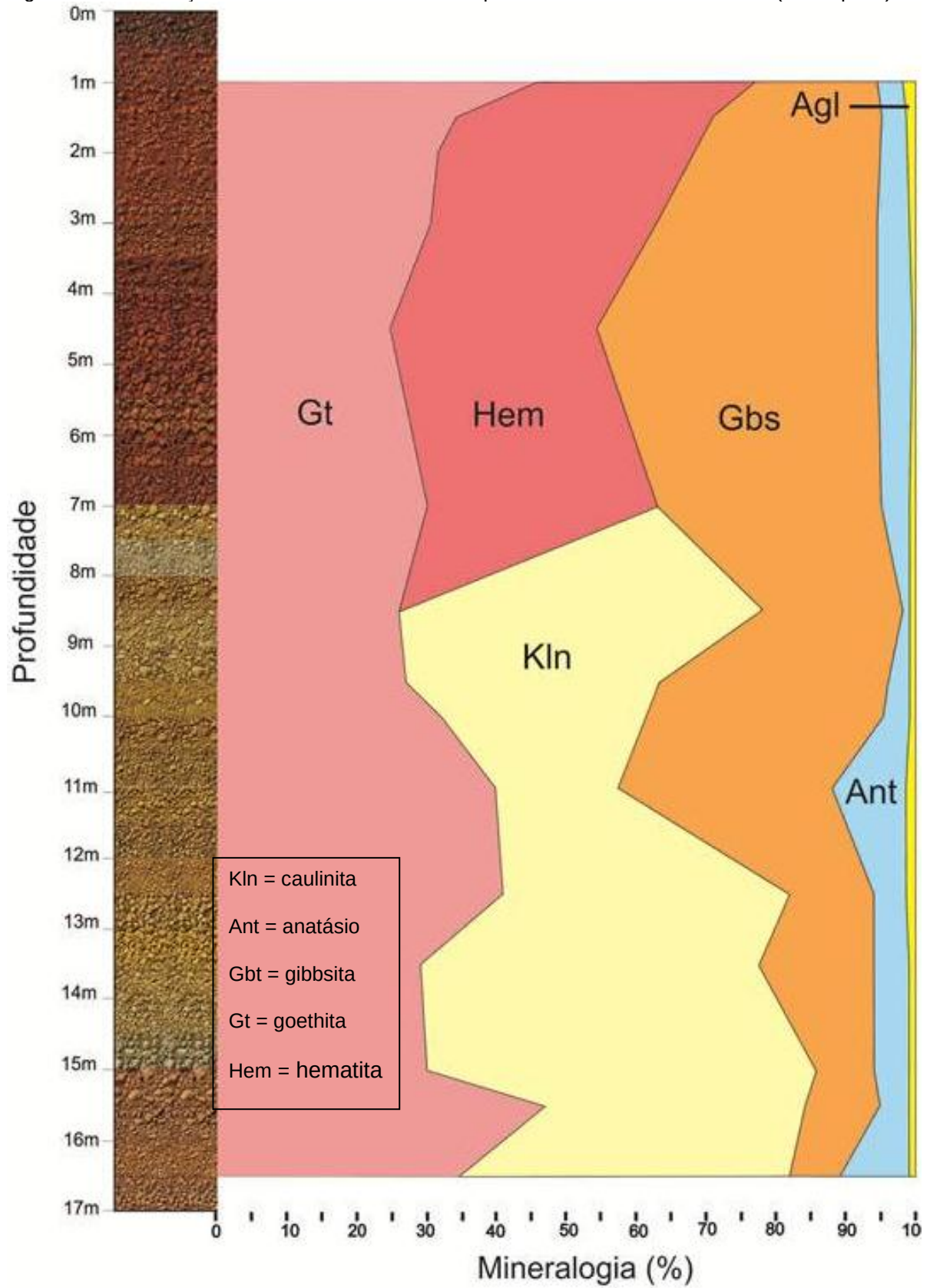


Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.1 Distribuição dos minerais no perfil

O padrão de distribuição dos minerais constituintes do perfil laterítico da Serra do Piriá (figura 19) é similar à maioria dos perfis lateríticos maduros e completos associados à bauxita (DENNEN; NORTON, 1977; COSTA, 1980; COSTA, 1991; CALAF, 2000; HORBE; COSTA, 1999; KOTSCHOUBEY et al., 2007; COSTA; CRUZ, 2012). A caulinita diminui da base aparente para o topo, enquanto que nesta direção aumentam os teores de hematita, goethita e gibbsita. As concentrações de anatásio são oscilantes e quase constantes ao longo do perfil e os de fosfatos crescentes, o que também é compatível.

Figura 19 - Distribuição dos minerais formadores do perfil laterítico da Serra do Piriá (% em peso).

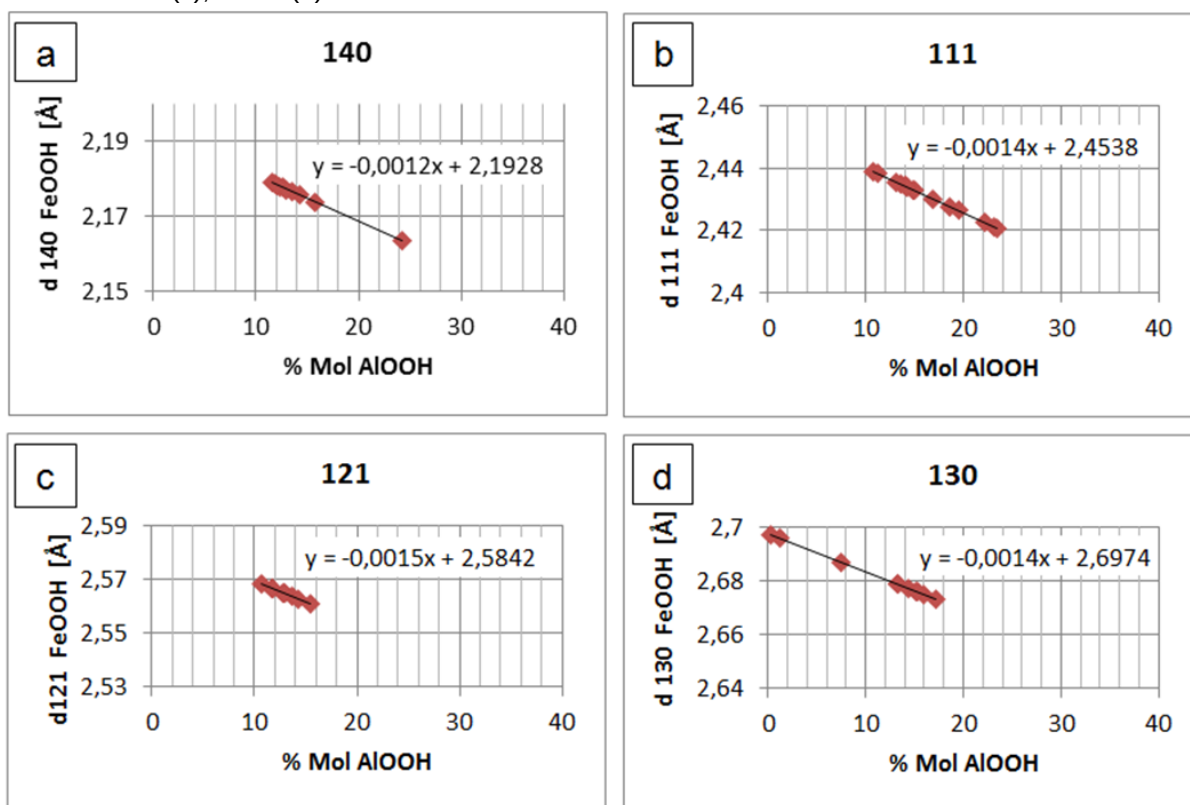


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Substituição Fe-Al nas goethitas

O alumínio no perfil laterítico da Serra do Piriá, como na maioria dos lateritos, não ocorre apenas sob a forma de gibbsita e caulinita, como também se aloja em substituição ao Fe na estrutura da goethita. Esta substituição se verifica em todo o perfil, variando de 9,85 a 22,25 moles % de AlOOH , em que o máximo é 33% (FITSZPATRICK; SCHWERTMANN, 1982). O alumínio liberado pela dissolução da caulinita pode, em vez de se precipitar como gibbsita, ser admitido na estrutura da goethita. O grau de substituição AlOOH nas goethitas está expresso nos diagramas propostos por Thiel (1963) (figura 20) e são sintetizados na tabela 01, onde se pode observar que a substituição Fe-Al nas goethitas é superior na crosta ferruginosa bauxítica em relação ao horizonte argiloso bauxítico.

Figura 20 - Proporções molares em moles % de AlOOH nas goethitas. Reflexões 140 (a); 111 (b); 121 (c); e 130 (d).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 01 - Proporções molares em moles % de AlOOH nas goethitas obtidas a partir das respectivas reflexões.

Amostra	d_{140}	d_{111}	d_{121}	d_{130}	Média	Profundidade (m)	Horizonte
SP-02	-	13,99	-	-	13,99	1,0	Crosta ferruginosa bauxítica
SP-03	-	18,64	-	-	18,64	1,5	
SP-04	-	22,25	-	-	22,25	2,0	
SP-06	24,24	23,19	11,74	-	19,72	3,0	
SP-09	-	23,5	-	1,2	12,35	4,5	
SP-12	-	19,46	-	0,24	9,75	6,0	
SP-14	-	16,85	-	-	16,85	7,0	
SP-17	11,58	10,81	12,81	13,21	12,10	8,5	Argiloso bauxítico
SP-19	12,58	13,51	11,65	13,28	12,75	9,5	
SP-20	15,78	13,96	13,64	14,40	14,45	10,0	
SP-22	11,89	14,90	12,95	15,97	13,93	11,0	
SP-25	14,31	14,99	11,75	17,19	14,56	22,5	
SP-27	13,58	14,21	10,68	15,10	13,39	13,5	
SP-30	12,33	14,21	14,30	15,36	14,05	15,0	
SP-31	12,96	11,21	12,89	-	12,35	15,5	
SP-33	12,00	13,15	15,48	7,47	12,03	16,5	

Fonte: Elaborado pelo autor.

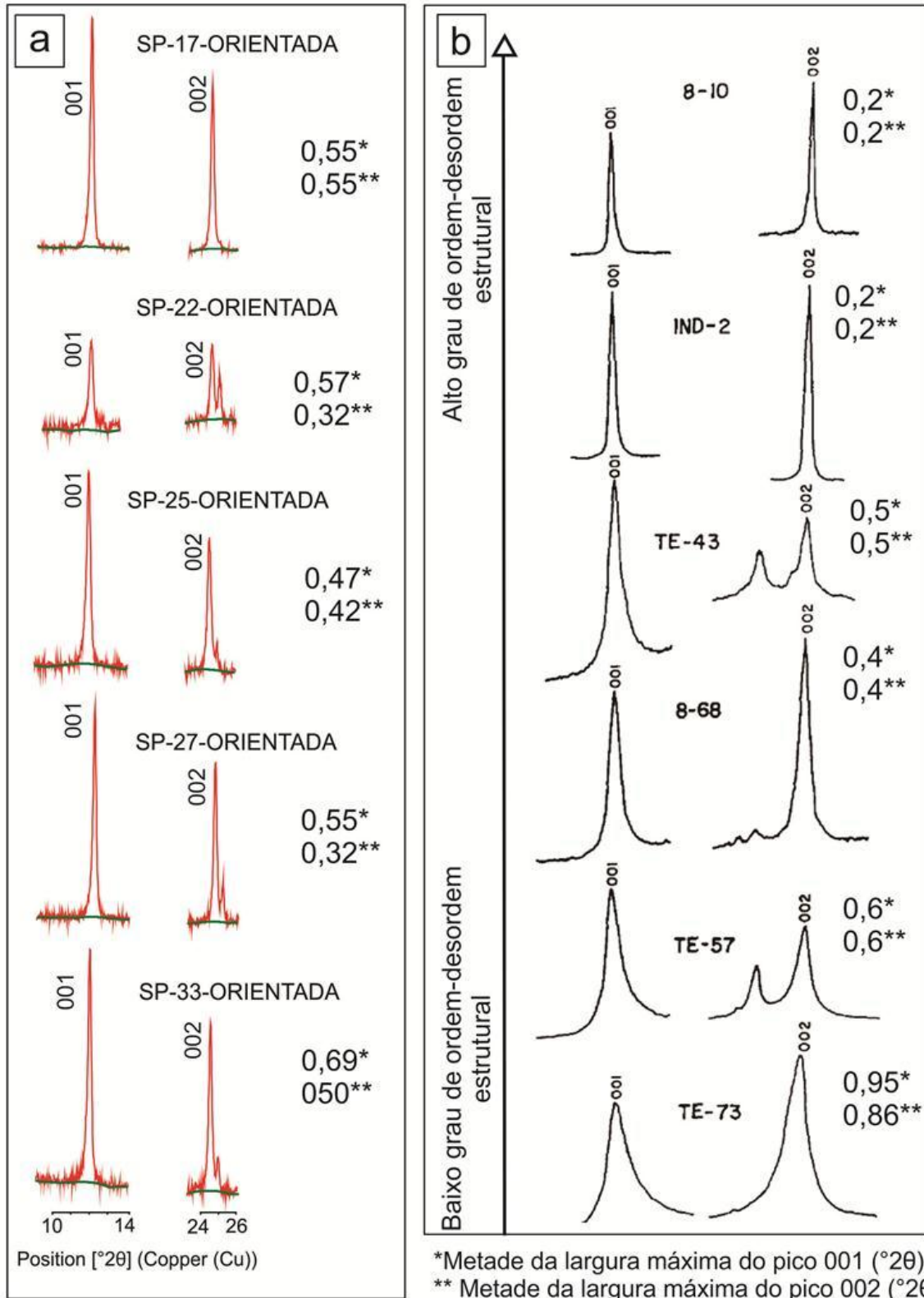
4.2.3 Grau de ordenamento estrutural da caulinita

A determinação do grau de ordem-desordem estrutural da caulinita, por DRX, método do pó, foi limitada pela natureza poliminerálica das amostras, em que as reflexões da caulinita se sobrepõem em parte às da goethita, principalmente. Aparicio e Galán (1999) comparam diversos métodos de determinação do grau de ordem-desordem da caulinita: índice de Hinckley (HI); índice de Stoch (IK); índice de Range & Weiss (QF); índice de Lietard (R2); índice de Rughe & Brown (H & B); sistema de Plaçon & Zacharie; e índice de Amigó *et al.* (FWHM 001 e FWHM 002). Dentre os métodos discutidos por esses autores, apenas este último (AMIGÓ *et al.*, 1994) é aplicável às amostras estudadas, já que as reflexões utilizadas neste método, 001 e 002, não apresentam sobreposição por outros minerais.

Segundo Amigó *et al.* (1994) o grau de ordem-desordem estrutural da caulinita modifica a largura máxima e a assimetria das reflexões 001 e 002,

localizadas em $12^{\circ}2\theta$ e $25^{\circ}2\theta$ (tubo de Cu), respectivamente. Empregando este método, se observa que as caulinitas do perfil laterítico da Serra do Piriá apresentam largura máxima/2 entre $0,3$ e $0,4^{\circ}2\theta$ (figura 21a), compatíveis com as caulinitas de médio grau de ordenamento estrutural de Amigó et al. (1994) (figura 21b).

Figura 21 - Grau de ordem-desordem estrutural da caulinita (a) comparado com os dados de Amigó et al. (1994) (b).

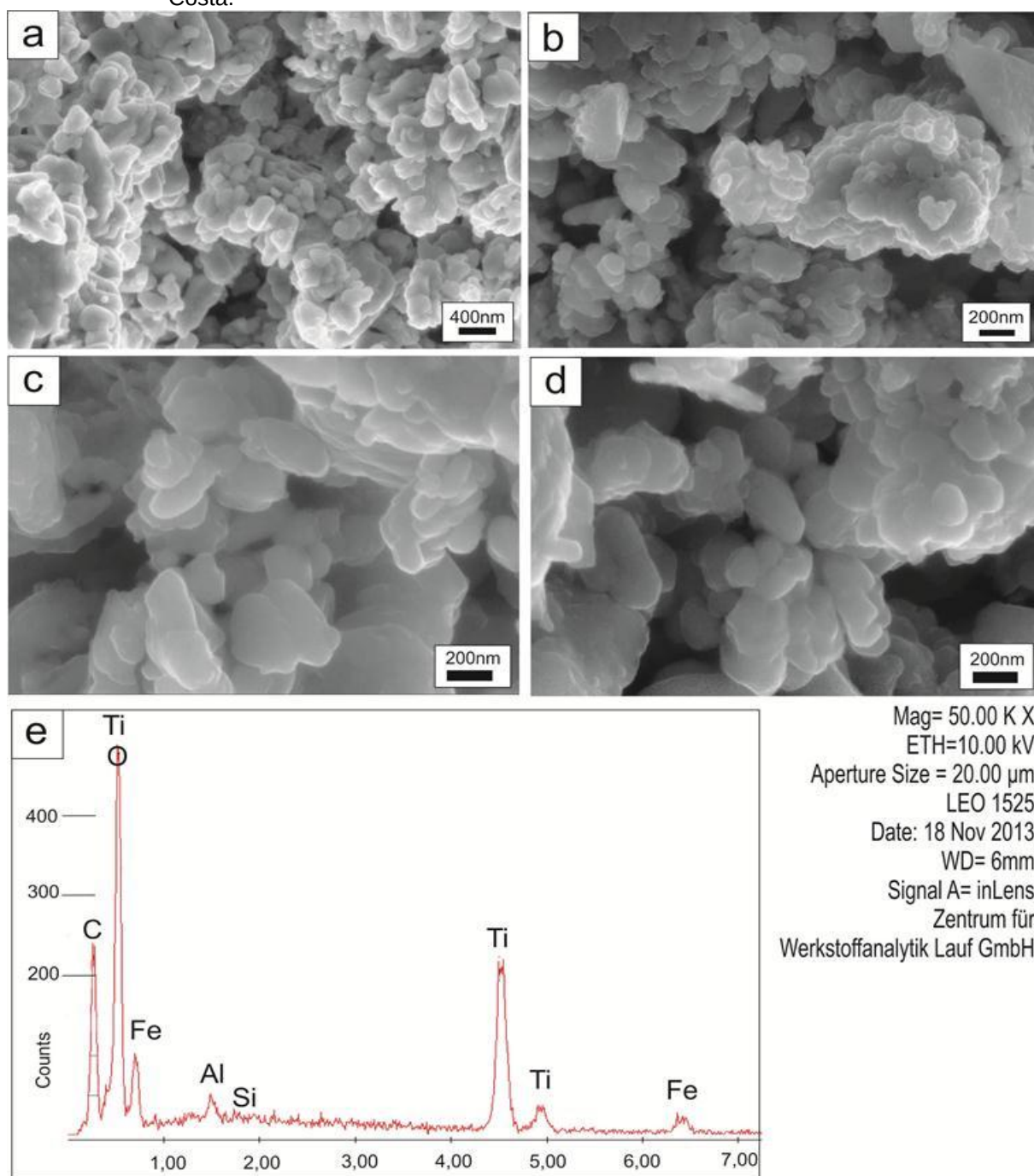


Fonte: Elaborado pelo autor (a); Amigó et al. (1994) (b).

4.2.4 Morfologia e química do anatásio

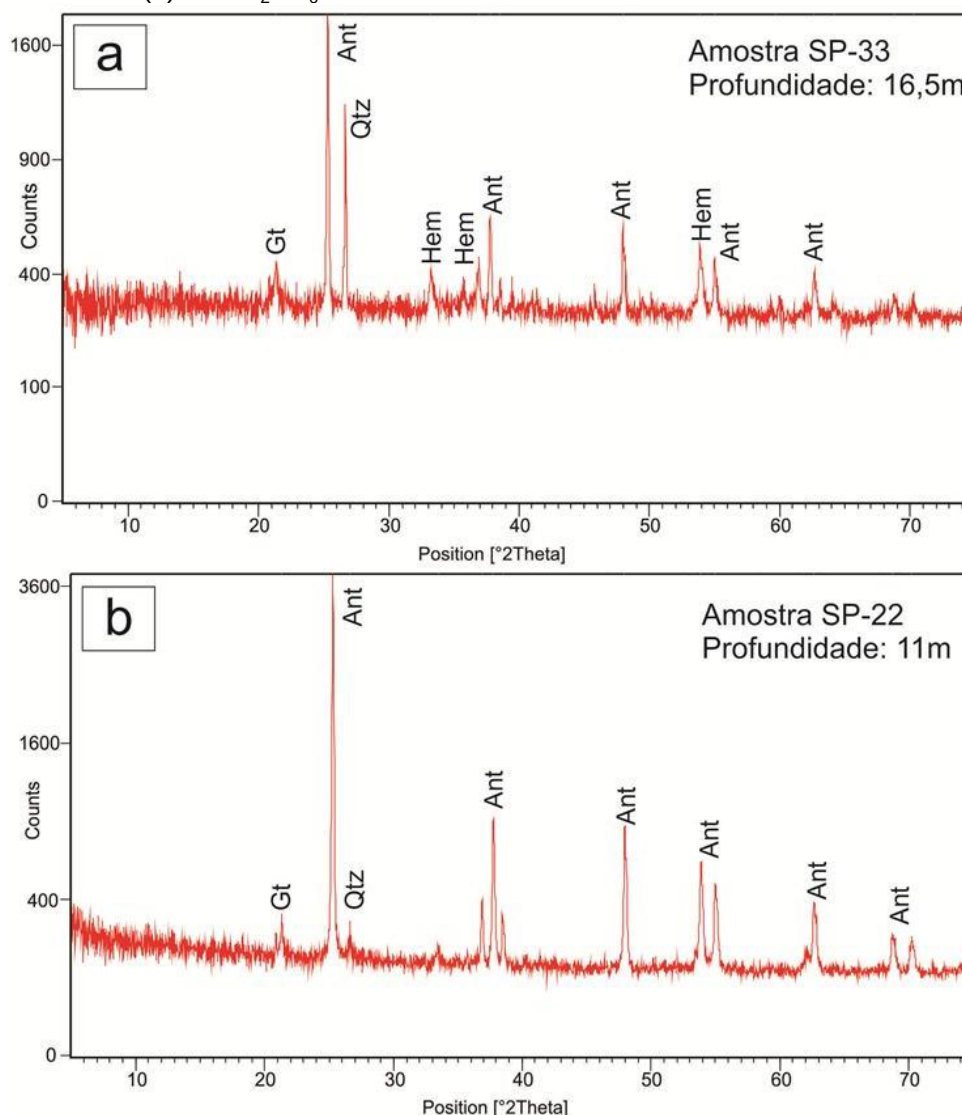
O anatásio, que varia de 0,65 a 5,7% em peso, segundo os dados obtidos se apresenta em cristais nanométricos de 100 e 400nm (figura 22a, b, c, d). Os difratogramas de raio x dos concentrados extraídos com H_2TiF_6 mostram o domínio deste mineral (figura 23), confirmados por análises de EDS (figura 22e).

Figura 222 - Morfologia dos cristais de anatásio (a, b, c e d) e seu espectro químico (e) obtido por MEV/EDS no laboratório ZWL em Lauf, Alemanha, pelo Prof. Marcondes Lima da Costa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Difratoograma de raios x do concentrado obtido após tratamento das amostras SP-33 (a) e SP 22 (b) com H_2TiF_6 .



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química em amostras totais do perfil laterítico da Serra do Piriá (tabela 02) reforça os dados mineralógicos obtidos, confirmando o domínio de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . A comparação com a média de horizontes equivalentes de outros perfis lateríticos é apresentada na tabela 02, que mostra lateritos derivados de granitos de Balkouin (Burkina Faso) (GIORGIS et al., 2014); rocha ultramáfica (Barro alto, Goiás) (OLIVEIRA et al., 2013); e rochas carbonáticas (Guangxi, China) (LIU, et al., 2012). Observa-se que na porção do perfil estudada, zona bauxítica e zona ferruginosa, o perfil laterítico da Serra do Piriá mais se assemelha composicionalmente a lateritos provenientes de rochas graníticas.

Tabela 02 - Composição química expressa em % em peso (elementos maiores) e ppm (elementos traço); n. a.: não analisado.

(continua)

Elem.	SP-01	SP-02	SP-03	SP-04	SP-05	SP-06	SP-07	SP-08	SP-09	SP-10	SP-13	SP-14	SP-15	SP-16
SiO ₂	11,7	4,85	1,22	0,84	0,5	0,52	0,56	0,5	0,48	0,55	0,89	0,98	13,2	28,2
Al ₂ O ₃	8,53	11,8	16,3	21,1	25,9	28,7	27,1	24,1	22,5	23,8	23,7	21	35,4	36,6
Fe ₂ O ₃	67,8	69,3	67,4	59,4	52,4	47,4	50,3	55,8	57,2	55,1	55	60	28,7	15,6
CaO	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02	<0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	<0,01
TiO ₂	2,99	3,35	3,59	4,12	4,88	4,7	4,8	4,28	5,7	5,5	5,29	4,21	3,11	1,15
P ₂ O ₅	0,718	0,649	0,518	0,405	0,514	0,486	0,543	0,447	0,206	0,244	0,372	0,301	0,357	0,162
MnO	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,05	0,03	0,04	0,03	0,06	0,04	0,01	<0,01
P.F.	8,46	10,4	11,86	14,19	15,93	18,09	17,32	15,56	14,35	14,73	15,36	14,01	19,05	17,19
Total	100,3	100,4	100,9	100,1	100,2	100,0	100,7	100,7	100,5	100,0	100,7	100,6	99,8	98,9
Ag	n.a.	0,9	n.a.	0,3	n.a.	0,3	n.a.	n.a.	0,5	n.a.	n.a.	5,6	n.a.	n.a.
As	n.a.	13,8	n.a.	10,4	n.a.	9,5	n.a.	n.a.	10,4	n.a.	n.a.	7,1	n.a.	n.a.
Ba	n.a.	4	n.a.	2	n.a.	3	n.a.	n.a.	3	n.a.	n.a.	2	n.a.	n.a.
Co	n.a.	6,0	n.a.	7,3	n.a.	13,1	n.a.	n.a.	6,0	n.a.	n.a.	15,8	n.a.	n.a.
Cr	n.a.	104,0	n.a.	102,0	n.a.	98,0	n.a.	n.a.	100,0	n.a.	n.a.	82,0	n.a.	n.a.
Cu	n.a.	80,3	n.a.	104,7	n.a.	142,8	n.a.	n.a.	45,7	n.a.	n.a.	83,5	n.a.	n.a.
Ga	n.a.	47,2	n.a.	39,2	n.a.	48,2	n.a.	n.a.	50,0	n.a.	n.a.	44,2	n.a.	n.a.
Hf	n.a.	6,5	n.a.	8,8	n.a.	8,7	n.a.	n.a.	9,9	n.a.	n.a.	9,3	n.a.	n.a.
Hg	n.a.	0,31	n.a.	0,52	n.a.	0,22	n.a.	n.a.	0,16	n.a.	n.a.	0,32	n.a.	n.a.
Mo	n.a.	1,8	n.a.	1,5	n.a.	1,8	n.a.	n.a.	1,6	n.a.	n.a.	1,5	n.a.	n.a.
Nb	n.a.	16,1	n.a.	21,4	n.a.	22,7	n.a.	n.a.	26,9	n.a.	n.a.	23,5	n.a.	n.a.
Ni	n.a.	10,3	n.a.	17,7	n.a.	49,3	n.a.	n.a.	24,7	n.a.	n.a.	53,5	n.a.	n.a.
Pb	n.a.	6,1	n.a.	3,5	n.a.	6,3	n.a.	n.a.	4,6	n.a.	n.a.	4,7	n.a.	n.a.
Sb	n.a.	1,4	n.a.	1,4	n.a.	2,6	n.a.	n.a.	2,1	n.a.	n.a.	2,0	n.a.	n.a.
Sc	n.a.	53	n.a.	50	n.a.	70	n.a.	n.a.	50	n.a.	n.a.	57	n.a.	n.a.
Sn	n.a.	3	n.a.	3	n.a.	3	n.a.	n.a.	4	n.a.	n.a.	4	n.a.	n.a.
Sr	n.a.	7,8	n.a.	5,1	n.a.	6,3	n.a.	n.a.	4,1	n.a.	n.a.	6,7	n.a.	n.a.
Ta	n.a.	1,1	n.a.	1,4	n.a.	1,4	n.a.	n.a.	1,6	n.a.	n.a.	1,6	n.a.	n.a.
Th	n.a.	5,6	n.a.	5,2	n.a.	6,3	n.a.	n.a.	4,3	n.a.	n.a.	4,9	n.a.	n.a.
U	n.a.	0,7	n.a.	0,9	n.a.	1,1	n.a.	n.a.	0,7	n.a.	n.a.	1,0	n.a.	n.a.
V	n.a.	1179	n.a.	1188	n.a.	999	n.a.	n.a.	1327	n.a.	n.a.	1079	n.a.	n.a.
W	n.a.	1,7	n.a.	1,7	n.a.	1,9	n.a.	n.a.	2,0	n.a.	n.a.	2,3	n.a.	n.a.
Y	n.a.	5,9	n.a.	6,5	n.a.	8,8	n.a.	n.a.	7,1	n.a.	n.a.	10,0	n.a.	n.a.
Zn	n.a.	44	n.a.	45	n.a.	98	n.a.	n.a.	42	n.a.	n.a.	107	n.a.	n.a.
Zr	n.a.	258,2	n.a.	324,5	n.a.	336,7	n.a.	n.a.	380,6	n.a.	n.a.	351,8	n.a.	n.a.
La	n.a.	6,3	n.a.	5,2	n.a.	6,8	n.a.	n.a.	5,1	n.a.	n.a.	7,7	n.a.	n.a.
Ce	n.a.	11,8	n.a.	9,0	n.a.	16,7	n.a.	n.a.	9,4	n.a.	n.a.	13,2	n.a.	n.a.
Pr	n.a.	1,29	n.a.	1,16	n.a.	1,67	n.a.	n.a.	0,92	n.a.	n.a.	1,58	n.a.	n.a.
Nd	n.a.	4,6	n.a.	4,4	n.a.	6,9	n.a.	n.a.	3,3	n.a.	n.a.	6,2	n.a.	n.a.
Sm	n.a.	1,11	n.a.	0,84	n.a.	1,64	n.a.	n.a.	0,76	n.a.	n.a.	1,55	n.a.	n.a.
Eu	n.a.	0,30	n.a.	0,33	n.a.	0,56	n.a.	n.a.	0,27	n.a.	n.a.	0,50	n.a.	n.a.
Gd	n.a.	0,99	n.a.	1,05	n.a.	1,67	n.a.	n.a.	0,87	n.a.	n.a.	1,70	n.a.	n.a.
Tb	n.a.	0,20	n.a.	0,20	n.a.	0,32	n.a.	n.a.	0,19	n.a.	n.a.	0,30	n.a.	n.a.
Dy	n.a.	1,36	n.a.	1,45	n.a.	2,02	n.a.	n.a.	1,17	n.a.	n.a.	1,94	n.a.	n.a.
Ho	n.a.	0,26	n.a.	0,34	n.a.	0,42	n.a.	n.a.	0,30	n.a.	n.a.	0,45	n.a.	n.a.
Er	n.a.	0,99	n.a.	1,21	n.a.	1,61	n.a.	n.a.	1,18	n.a.	n.a.	1,48	n.a.	n.a.
Tm	n.a.	0,19	n.a.	0,25	n.a.	0,30	n.a.	n.a.	0,29	n.a.	n.a.	0,29	n.a.	n.a.
Yb	n.a.	1,57	n.a.	1,95	n.a.	2,46	n.a.	n.a.	2,33	n.a.	n.a.	2,30	n.a.	n.a.
Lu	n.a.	0,26	n.a.	0,36	n.a.	0,44	n.a.	n.a.	0,48	n.a.	n.a.	0,47	n.a.	n.a.

Tabela 02 - Composição química expressa em % em peso (elementos maiores) e ppm (elementos traço); n. a.: não analisado.

(continuação)

Elem.	SP-17	SP-18	SP-19	SP-20	SP-21	SP-22	SP-23	SP-24	SP-25	SP-26	SP-27	SP-28	SP-29	SP-30
SiO ₂	24,5	24,8	16,5	13,2	13,2	10,2	7,78	11,3	14,4	17,6	19,7	22	26,8	24,1
Al ₂ O ₃	34,3	35,3	35,4	33,1	33,1	28,9	29,4	28,1	26,6	23,2	27	29,8	29,1	29
Fe ₂ O ₃	21,7	21,5	26	30,7	30,7	38,4	39,4	38,6	38,9	42,2	33	26,2	25,5	27,7
CaO	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
TiO ₂	1,14	1,62	2,66	3,47	3,47	4,44	5,2	4,84	3,97	3,77	4,61	5,03	5,14	4,93
P ₂ O ₅	0,224	0,258	0,331	0,358	0,358	0,428	0,487	0,493	0,409	0,397	0,363	0,326	0,328	0,379
MnO	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,03	0,05	0,06
P.F.	17,06	17,39	18,8	18,53	18,53	17,44	18,04	17,15	15,79	13,33	14,67	15,28	14,07	14,67
Total	98,9	100,9	99,7	99,4	99,4	99,8	100,4	100,5	100,1	100,6	99,4	98,7	101,0	100,8
Ag	0,1	n.a.	n.a.	0,5	0,5	n.a.	n.a.	0,5	n.a.	1,3	n.a.	0,2	n.a.	n.a.
As	4,9	n.a.	n.a.	4,6	4,6	n.a.	n.a.	2,0	n.a.	4,5	n.a.	2,1	n.a.	n.a.
Ba	5	n.a.	n.a.	4	4	n.a.	n.a.	5	n.a.	2	n.a.	3	n.a.	n.a.
Co	5,3	n.a.	n.a.	14,3	14,3	n.a.	n.a.	23,2	n.a.	20,0	n.a.	14,0	n.a.	n.a.
Cr	74,0	n.a.	n.a.	79,0	79,0	n.a.	n.a.	95,0	n.a.	87,0	n.a.	60,0	n.a.	n.a.
Cu	43,2	n.a.	n.a.	83,2	83,2	n.a.	n.a.	129,7	n.a.	116,8	n.a.	109,3	n.a.	n.a.
Ga	26,7	n.a.	n.a.	33,6	33,6	n.a.	n.a.	47,9	n.a.	33,9	n.a.	42,2	n.a.	n.a.
Hf	5,1	n.a.	n.a.	7,0	7,0	n.a.	n.a.	10,2	n.a.	7,4	n.a.	9,4	n.a.	n.a.
Hg	0,11	n.a.	n.a.	0,07	0,07	n.a.	n.a.	0,10	n.a.	0,06	n.a.	0,09	n.a.	n.a.
Mo	0,9	n.a.	n.a.	0,8	0,8	n.a.	n.a.	0,7	n.a.	0,4	n.a.	0,5	n.a.	n.a.
Nb	7,0	n.a.	n.a.	16,3	16,3	n.a.	n.a.	23,7	n.a.	18,4	n.a.	23,4	n.a.	n.a.
Ni	16,3	n.a.	n.a.	48,0	48,0	n.a.	n.a.	77,5	n.a.	54,0	n.a.	55,4	n.a.	n.a.
Pb	0,9	n.a.	n.a.	1,5	1,5	n.a.	n.a.	3,6	n.a.	5,1	n.a.	2,1	n.a.	n.a.
Sb	0,6	n.a.	n.a.	1,0	1,0	n.a.	n.a.	1,3	n.a.	0,7	n.a.	0,8	n.a.	n.a.
Sc	32	n.a.	n.a.	61	61	n.a.	n.a.	95	n.a.	82	n.a.	91	n.a.	n.a.
Sn	1	n.a.	n.a.	3	3	n.a.	n.a.	4	n.a.	4	n.a.	4	n.a.	n.a.
Sr	5,0	n.a.	n.a.	8,2	8,2	n.a.	n.a.	14,2	n.a.	5,3	n.a.	10,7	n.a.	n.a.
Ta	0,6	n.a.	n.a.	1,1	1,1	n.a.	n.a.	1,7	n.a.	1,1	n.a.	1,5	n.a.	n.a.
Th	5,2	n.a.	n.a.	4,7	4,7	n.a.	n.a.	6,4	n.a.	2,8	n.a.	3,3	n.a.	n.a.
U	1,6	n.a.	n.a.	1,5	1,5	n.a.	n.a.	1,8	n.a.	1,1	n.a.	1,0	n.a.	n.a.
V	691	n.a.	n.a.	918	918	n.a.	n.a.	1272	n.a.	888	n.a.	665	n.a.	n.a.
W	0,7	n.a.	n.a.	1,1	1,1	n.a.	n.a.	2,4	n.a.	1,6	n.a.	1,6	n.a.	n.a.
Y	6,2	n.a.	n.a.	6,4	6,4	n.a.	n.a.	9,4	n.a.	10,0	n.a.	8,0	n.a.	n.a.
Zn	59	n.a.	n.a.	122	122	n.a.	n.a.	164	n.a.	117	n.a.	110	n.a.	n.a.
Zr	174,8	n.a.	n.a.	250,3	250,3	n.a.	n.a.	382,9	n.a.	295,2	n.a.	367,4	n.a.	n.a.
La	14,0	n.a.	n.a.	16,2	16,2	n.a.	n.a.	20,0	n.a.	7,6	n.a.	12,6	n.a.	n.a.
Ce	10,9	n.a.	n.a.	22,8	22,8	n.a.	n.a.	33,3	n.a.	15,5	n.a.	29,7	n.a.	n.a.
Pr	1,52	n.a.	n.a.	2,56	2,56	n.a.	n.a.	3,75	n.a.	1,76	n.a.	3,01	n.a.	n.a.
Nd	4,9	n.a.	n.a.	7,5	7,5	n.a.	n.a.	12,6	n.a.	6,7	n.a.	10,9	n.a.	n.a.
Sm	0,88	n.a.	n.a.	1,47	1,47	n.a.	n.a.	2,37	n.a.	1,57	n.a.	1,58	n.a.	n.a.
Eu	0,33	n.a.	n.a.	0,37	0,37	n.a.	n.a.	0,62	n.a.	0,50	n.a.	0,39	n.a.	n.a.
Gd	1,10	n.a.	n.a.	1,21	1,21	n.a.	n.a.	1,74	n.a.	1,69	n.a.	1,12	n.a.	n.a.
Tb	0,20	n.a.	n.a.	0,22	0,22	n.a.	n.a.	0,32	n.a.	0,30	n.a.	0,19	n.a.	n.a.
Dy	1,38	n.a.	n.a.	1,41	1,41	n.a.	n.a.	1,90	n.a.	2,13	n.a.	1,21	n.a.	n.a.
Ho	0,26	n.a.	n.a.	0,29	0,29	n.a.	n.a.	0,45	n.a.	0,46	n.a.	0,34	n.a.	n.a.
Er	0,75	n.a.	n.a.	1,04	1,04	n.a.	n.a.	1,44	n.a.	1,56	n.a.	1,30	n.a.	n.a.
Tm	0,14	n.a.	n.a.	0,21	0,21	n.a.	n.a.	0,34	n.a.	0,29	n.a.	0,31	n.a.	n.a.
Yb	0,87	n.a.	n.a.	1,61	1,61	n.a.	n.a.	2,67	n.a.	2,38	n.a.	2,50	n.a.	n.a.
Lu	0,18	n.a.	n.a.	0,33	0,33	n.a.	n.a.	0,50	n.a.	0,43	n.a.	0,47	n.a.	n.a.

Tabela 02 - Composição química expressa em % em peso (elementos maiores) e ppm (elementos traço); n. a.: não analisado. (final)

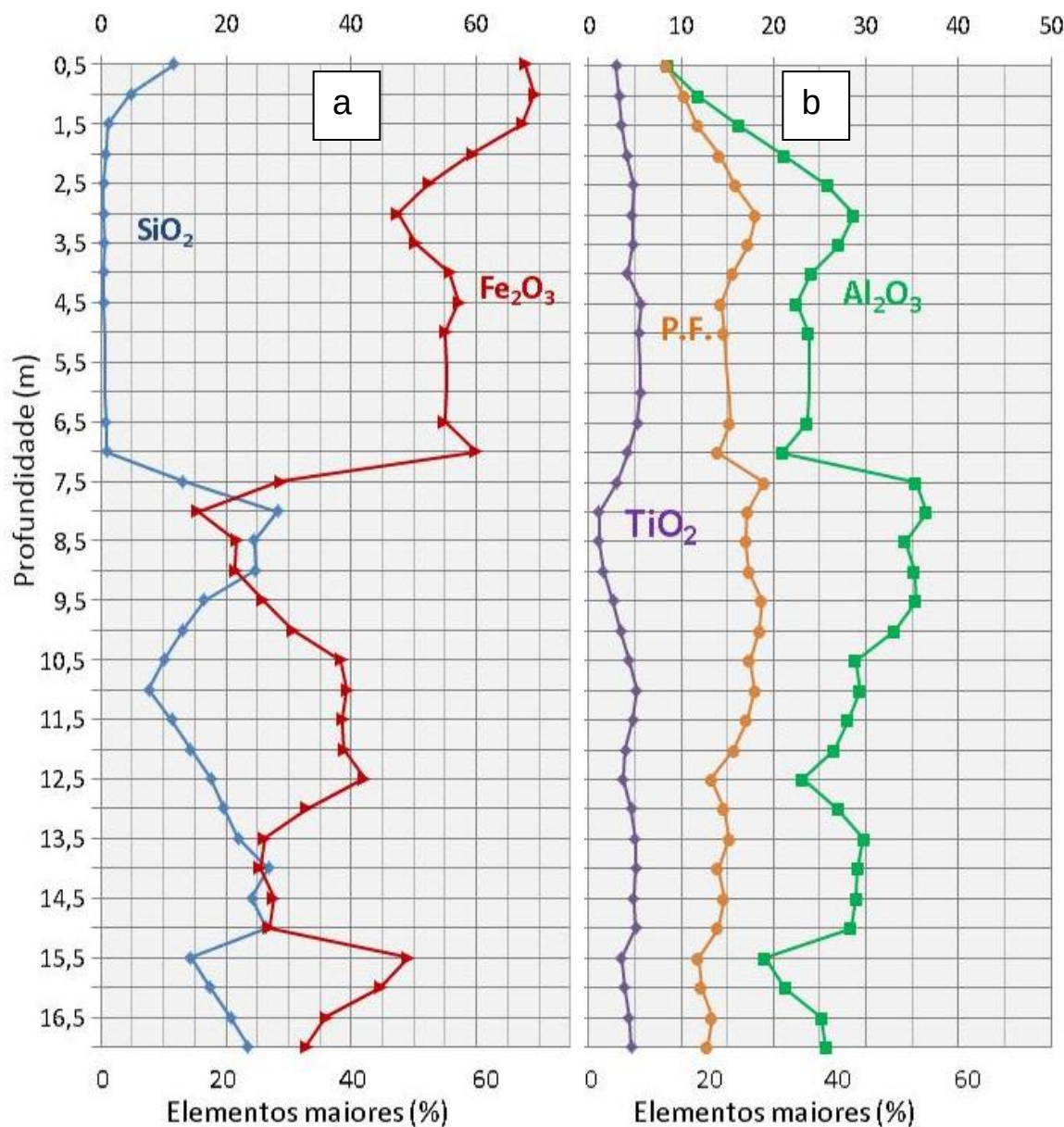
Elem.	SP-31	SP-32	SP-33	SP-34	Média Serra do Piria	Média Crustal (TAYLOR; MCLENNAN, 2001)	Balkouin (Burkina Faso) (GIORGIS et al., 2014)	Barro Alto (Goiás)(OLIV EIRA et al., 2013)	Guangxi (China) (LIU, et al., 2012)
SiO ₂ (%)	26,4	14,4	20,8	23,6	12,52	65,87	19,05	22,62	6,73
Al ₂ O ₃	28,4	19,1	25,2	25,7	26,11	15,19	16,25	49,74	43,70
Fe ₂ O ₃	26,9	49,2	36	32,9	41,90	4,99	54,9	2,73	32,94
CaO	0,01	0,02	<0,01	<0,01	0,02	4,20	0,11	0,01	0,14
TiO ₂	5,14	3,55	4,42	4,64	4,07	0,65	0,51	0,38	4016
P ₂ O ₅	0,371	0,298	0,279	0,221	0,38	0,17	0,21	0,02	0,04
MnO	0,05	0,08	0,07	0,08	0,05	0,08	0,02	n.a.	0,03
P.F.	14	11,93	13,35	12,89	15,10	-	9,77	n.a.	11,26
Ag (ppm)	0,7	10,3	n.a.	<0,1	1,77	50	n.a.	n.a.	n.a.
As	4,4	12,3	n.a.	7,0	7,15	1,5	n.a.	n.a.	7,61
Ba	6	2	n.a.	<1	3,42	550	18,8	n.a.	18,00
Co	12,5	14,1	n.a.	15,0	12,82	17	n.a.	n.a.	451,00
Cr	47,0	32,0	n.a.	0	73,85	85	n.a.	n.a.	26,40
Cu	134,1	123,5	n.a.	141,8	102,97	25	n.a.	n.a.	93,50
Ga	41,1	34,0	n.a.	33,6	40,14	17	n.a.	n.a.	70,70
Hf	9,9	7,8	n.a.	7,7	8,28	5,8	5,6	n.a.	n.a.
Hg	0,04	0,04	n.a.	0,03	0,16	-	n.a.	n.a.	4,30
Mo	0,6	0,4	n.a.	1,2	1,05	1,5	n.a.	n.a.	230,00
Nb	22,6	19,7	n.a.	19,9	20,12	12,5	7,6	n.a.	70,30
Ni	46,3	42,8	n.a.	56,3	42,47	50	19	n.a.	132,00
Pb	2,6	4,8	n.a.	3,7	3,81	16	n.a.	n.a.	n.a.
Sb	0,7	0,6	n.a.	0,5	1,21	0,2	n.a.	n.a.	56,20
Sc	110	81	n.a.	68	69,23	13	n.a.	n.a.	n.a.
Sn	4	3	n.a.	3	3,31	5,5	n.a.	n.a.	11,10
Sr	16,9	5,5	n.a.	0,7	7,42	350	15,5	n.a.	14,80
Ta	1,4	1,3	n.a.	1,2	1,31	1,1	n.a.	n.a.	77,80
Th	2,7	1,9	n.a.	2,1	4,26	10,7	19,85	n.a.	17,30
U	1,3	0,8	n.a.	0,8	1,10	2,8	3,43	n.a.	232,00
V	686	771	n.a.	547	939,23	110	n.a.	n.a.	n.a.
W	2,0	1,9	n.a.	2,8	1,82	2	n.a.	n.a.	71,40
Y	7,5	7,5	n.a.	8,2	7,81	22	4,6	n.a.	103,00
Zn	102	92	n.a.	101	92,54	71	n.a.	n.a.	2274,00
Zr	366,2	305,0	n.a.	301,9	315,04	190	200	n.a.	n.a.
La	24,1	11,2	n.a.	1,1	10,61	30	12,9	n.a.	n.a.
Ce	34,4	15,3	n.a.	3,3	17,33	64	26,4	n.a.	n.a.
Pr	4,01	1,66	n.a.	0,40	1,95	7,1	3,22	n.a.	n.a.
Nd	11,9	5,7	n.a.	1,8	6,72	26	11,0	n.a.	n.a.
Sm	2,02	1,12	n.a.	0,68	1,35	4,5	2,08	n.a.	n.a.
Eu	0,50	0,35	n.a.	0,27	0,41	0,88	0,55	n.a.	n.a.
Gd	1,43	1,10	n.a.	0,85	1,27	3,8	1,44	n.a.	n.a.
Tb	0,23	0,20	n.a.	0,19	0,24	0,64	0,22	n.a.	n.a.
Dy	1,26	1,36	n.a.	1,33	1,53	3,5	1,15	n.a.	n.a.
Ho	0,30	0,27	n.a.	0,32	0,34	0,8	0,22	n.a.	n.a.
Er	1,24	1,16	n.a.	1,38	1,26	2,3	0,6	n.a.	n.a.
Tm	0,27	0,24	n.a.	0,26	0,26	0,33	0,09	n.a.	n.a.
Yb	2,34	2,13	n.a.	2,19	2,10	2,2	0,69	n.a.	n.a.
Lu	0,45	0,43	n.a.	0,40	0,40	0,32	0,1	n.a.	n.a.

Fonte:Elaborado pelo autor.

Os teores de sílica variam de 0,48 a 26,78%, mais altos na base e mais baixos no topo. Esses teores refletem o domínio variável de caulinita. Os teores de Fe_2O_3 apresentam um comportamento inverso ao da sílica (figura 24a), demonstrando de fato se trata de perfil laterítico. Eles variam de 15,6 a 69,3%, mais altos na crosta ferruginosa bauxítica. Os teores de Al_2O_3 oscilam entre 8,53 e 36% e estão associados à maior abundância de gibbsita, e caulinita além de goethita $\{(\text{Fe},\text{Al})\text{OOH}\}$.

O TiO_2 está representado unicamente pelo anatásio e oscila entre 1,14 e 5,7% (figura 24b). Os teores de P_2O_5 (0,162 a 0,718%) são superiores ao da média crustal e estão representados pela augelita. A Perda ao Fogo (P. F.) varia de 8,46 a 19,05%, refletindo a presença de caulinita, gibbsita e goethita. Portanto, a distribuição dos teores dos elementos mais abundantes mostra também um padrão típico de evolução laterítica.

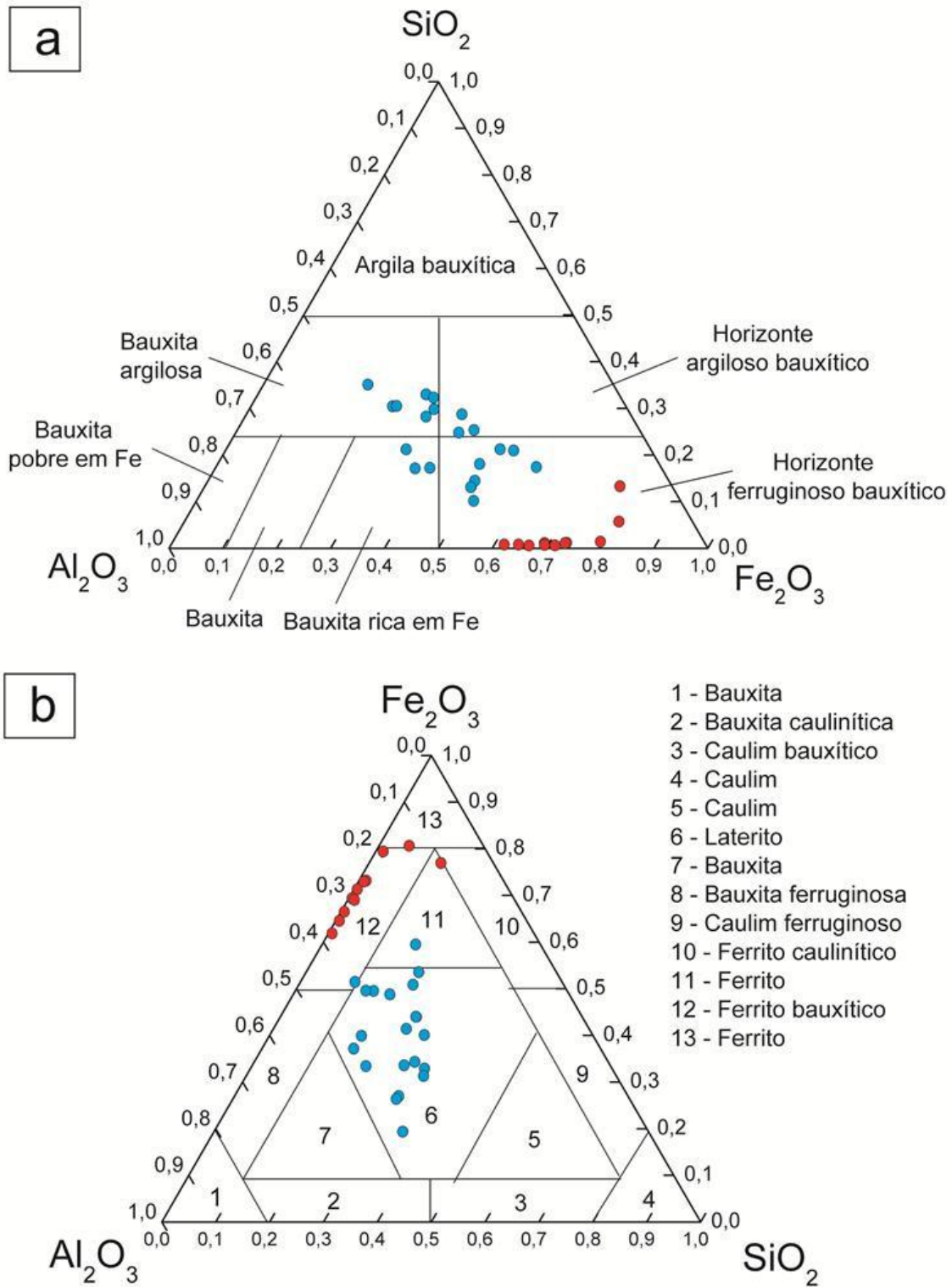
Figura 24 - Distribuição dos teores dos elementos maiores ao longo do perfil laterítico da Serra do Piriá. SiO_2 e Fe_2O_3 (a); TiO_2 , Al_2O_3 e P.F. (b).



Fonte: elaborado pelo autor.

A nítida diferença na composição química dos dois horizontes é claramente observada no diagrama ternário SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 (figura 25), em que a nomenclatura aqui empregada está de acordo com aquela proposta por Bardossy (1982) e Aleva (1994). Portanto o perfil laterítico da Serra do Piriá é portador de ferrito bauxítico no seu topo. Isto sugere que a rocha-mãe era pobre em Al_2O_3 e muito rica em Fe_2O_3 . A matriz de correlação da tabela 03 mostra o grau de correlação geoquímica entre todos os elementos analisados.

Figura 25 - Classificação química das amostras referentes ao horizonte argiloso bauxítico (em azul) e à crosta ferruginosa bauxítica (em vermelho). Propostas de Bardossy (1982) (a); e Aleva (1994) (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 03 - Matriz de correlação. As mais significativas estão sombreadas em azul (positivas) e em vermelho (negativas).

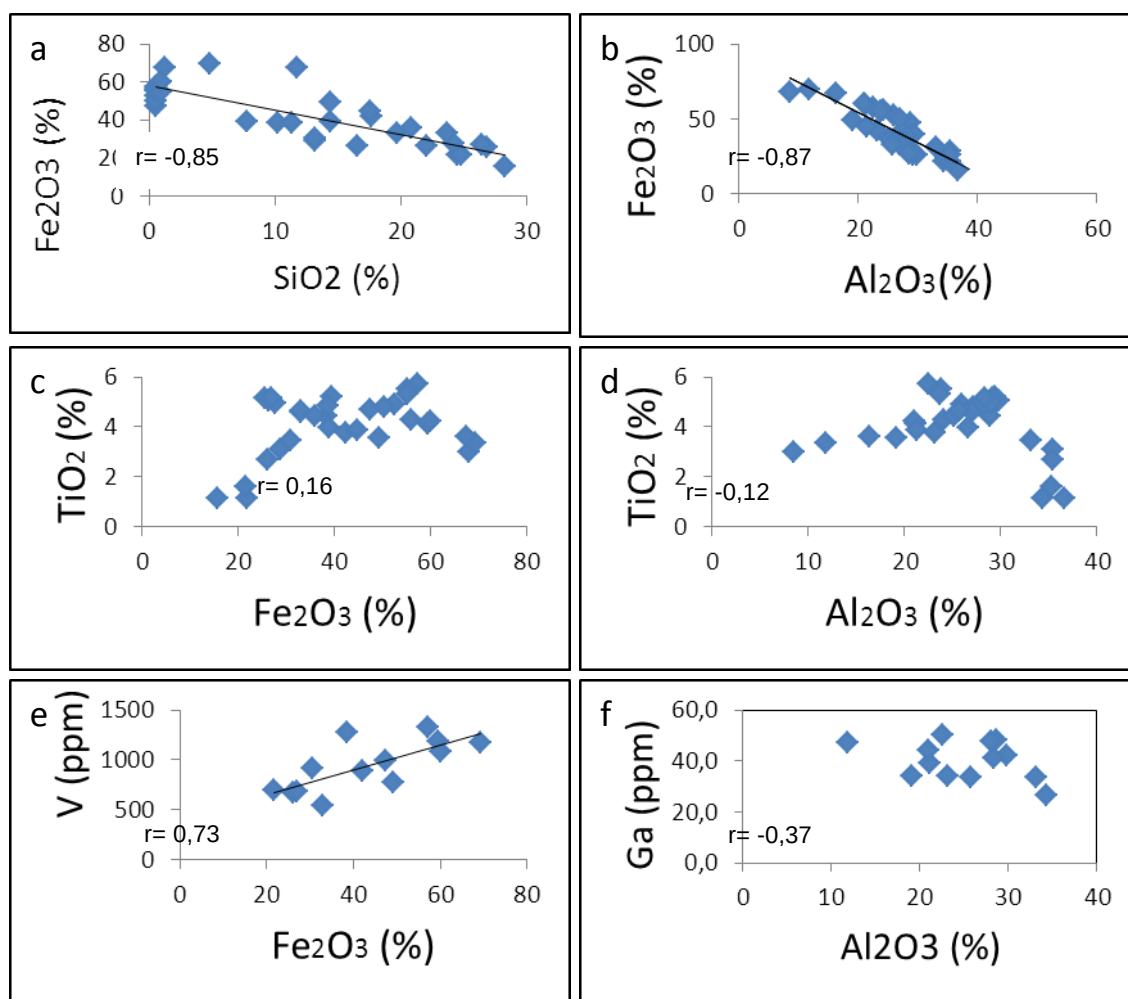
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	P.F.	Ag	As	Ba	Co	Cr	Cu	Ga	Hf	Hg	Mo	Nb	Ni	Pb	Sb	Sc	Sn
SiO ₂	1,00	0,50	-0,85	-0,50	-0,24	-0,34	-0,11	0,01	-0,12	-0,59	0,20	0,20	-0,70	0,21	-0,64	-0,27	-0,74	-0,75	-0,41	0,25	-0,62	-0,87	0,41	-0,19
Al ₂ O ₃		1,00	-0,87	-0,67	-0,12	-0,40	-0,44	0,85	-0,41	-0,76	0,36	0,19	-0,17	0,02	-0,37	-0,04	-0,47	-0,39	-0,23	0,36	-0,74	-0,21	0,13	-0,25
Fe ₂ O ₃			1,00	0,67	0,16	0,41	0,29	-0,51	0,30	0,79	-0,32	-0,25	0,50	-0,17	0,55	0,14	0,71	0,67	0,32	-0,39	0,78	0,61	-0,35	0,22
CaO				1,00	0,25	0,09	0,08	-0,53	0,41	0,37	-0,21	-0,17	0,28	-0,20	0,39	0,40	0,62	0,20	0,44	-0,25	0,28	0,24	-0,07	0,42
TiO ₂					1,00	0,02	0,47	-0,06	-0,12	-0,07	-0,16	0,30	-0,03	0,43	0,70	0,90	-0,03	0,11	0,96	0,45	0,31	0,37	0,55	0,84
P ₂ O ₅						1,00	0,11	-0,11	-0,16	0,21	0,31	0,11	0,52	0,28	0,47	0,00	0,36	0,25	0,02	-0,04	0,48	0,27	0,19	0,15
MnO							1,00	-0,45	0,36	0,35	-0,56	0,37	-0,38	0,76	0,19	0,34	-0,07	0,03	0,48	0,34	0,66	0,06	0,43	0,35
P. F.								1,00	-0,40	-0,56	0,38	0,19	0,26	-0,05	-0,04	0,07	-0,14	-0,08	-0,08	0,32	-0,47	0,24	-0,04	-0,19
Ag									1,00	0,38	-0,28	0,17	-0,29	0,09	-0,13	0,01	-0,07	-0,24	0,08	0,09	0,29	-0,08	0,10	0,07
As										1,00	-0,32	-0,57	0,15	-0,16	0,22	-0,19	0,49	0,62	0,02	-0,65	0,65	0,36	-0,45	-0,20
Ba											1,00	-0,12	0,35	-0,23	0,15	0,03	-0,15	-0,18	-0,22	-0,10	-0,38	-0,02	0,20	-0,10
Co												1,00	-0,20	0,63	0,02	0,36	-0,43	-0,52	0,32	0,94	0,08	-0,15	0,67	0,53
Cr													1,00	-0,42	0,51	0,08	0,60	0,45	0,07	-0,31	0,27	0,66	-0,33	0,09
Cu														1,00	0,08	0,37	-0,23	-0,26	0,37	0,64	0,27	-0,14	0,75	0,35
Ga															1,00	0,69	0,36	0,53	0,74	0,10	0,56	0,76	0,19	0,61
Hf																1,00	0,08	0,01	0,94	0,49	0,18	0,39	0,57	0,82
Hg																	1,00	0,70	0,12	-0,50	0,31	0,56	-0,50	-0,06
Mo																		1,00	0,15	-0,47	0,50	0,77	-0,60	-0,13
Nb																			1,00	0,43	0,40	0,48	0,48	0,86
Ni																				1,00	-0,03	-0,09	0,71	0,54
Pb																					1,00	0,56	0,02	0,33
Sb																						1,00	-0,27	0,23
Sc																							1,00	0,64
Sn																								1,00
Sr																								
Ta																								
Th																								
U																								
V																								
W																								
Y																								
Zn																								
Zr																								
La																								
Ce																								
Pr																								
Nd																								
Sm																								
Eu																								
Gd																								
Tb																								
Dy																								
Ho																								
Er																								
Tm																								
Yb																								
Lu																								

	Sr	Ta	Th	U	V	W	Y	Zn	Zr	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
SiO ₂	0,24	-0,45	-0,60	0,35	-0,85	-0,16	-0,05	0,31	-0,28	0,46	0,33	0,37	0,29	0,12	-0,06	-0,12	-0,28	-0,31	-0,28	-0,23	-0,21	-0,17	-0,17
Al ₂ O ₃	0,23	-0,21	0,07	0,73	-0,43	-0,36	0,03	0,43	-0,14	0,50	0,41	0,43	0,39	0,28	0,26	0,18	0,10	-0,01	0,04	-0,07	0,00	-0,11	-0,05
Fe ₂ O ₃	-0,29	0,34		-0,62	0,73	0,28	-0,01	-0,46	0,20	-0,56	-0,46	-0,48	-0,43	-0,26	-0,14	-0,04	0,09	0,19	0,12	0,15	0,08	0,11	0,08
CaO	0,03	0,51	0,00	-0,51	0,46	0,20	0,04	-0,33	0,42	-0,22	-0,10	-0,11	-0,05	-0,11	-0,12	-0,08	-0,13	-0,09	0,09	0,06	0,22	0,23	0,28
TiO ₂	0,27	0,87	-0,14	-0,30	0,25	0,70	0,38	0,23	0,93	-0,04	0,31	0,23	0,28	0,30	0,24	0,11	0,16	-0,02	0,34	0,63	0,84	0,87	0,86
P ₂ O ₅	0,40	0,10	0,52	0,06	0,43	0,01	-0,02	0,09	0,03	0,11	0,28	0,26	0,31	0,44	0,38	0,35	0,38	0,35	0,20	0,15	0,07	0,09	-0,09
MnO	-0,19	0,38	-0,39	-0,47	-0,07	0,74	0,45	0,15	0,44	-0,36	-0,17	-0,21	-0,15	0,01	0,16	0,11	0,22	0,26	0,29	0,65	0,48	0,62	0,53
P.F.	0,21	-0,01	0,50	0,74	0,03	-0,35	0,08	0,40	-0,04	0,40	0,37	0,37	0,38	0,36	0,42	0,36	0,36	0,24	0,24	0,05	0,11	-0,04	0,01
Ag	-0,12	0,14	-0,37	-0,28	-0,07	0,16	0,19	0,06	0,05	-0,02	-0,10	-0,10	-0,09	-0,03	0,01	0,09	0,03	0,08	-0,03	0,04	-0,01	0,09	0,21
As	-0,48	-0,04	0,05	-0,73	0,35	0,10	-0,39	-0,71	-0,13	-0,59	-0,63	-0,66	-0,66	-0,58	-0,48	-0,42	-0,29	-0,18	-0,38	-0,19	-0,31	-0,20	-0,22
Ba	0,78	-0,11	0,40	0,65	0,13	-0,43	-0,30	0,10	-0,08	0,83	0,67	0,72	0,64	0,53	0,34	0,24	0,11	-0,13	-0,20	-0,41	-0,19	-0,23	-0,21
Co	0,31	0,38	-0,15	0,39	-0,10	0,44	0,81	0,94	0,39	0,29	0,48	0,47	0,54	0,70	0,71	0,69	0,67	0,62	0,72	0,70	0,65	0,64	0,61
Cr	0,14	0,15	0,80	0,14	0,83	-0,34	-0,05	-0,22	0,05	-0,03	0,05	0,04	0,10	0,18	0,26	0,31	0,37	0,37	0,30	0,00	0,06	-0,06	-0,09
Cu	0,25	0,34	-0,28	0,02	-0,31	0,57	0,48	0,57	0,41	0,11	0,33	0,30	0,36	0,46	0,49	0,38	0,38	0,32	0,40	0,68	0,54	0,63	0,50
Ga	0,33	0,77	0,47	-0,23	0,69	0,47	0,22	-0,01	0,72	-0,06	0,23	0,16	0,24	0,34	0,32	0,23	0,33	0,15	0,33	0,41	0,60	0,58	0,54
Hf	0,47	0,95	0,01	-0,06	0,34	0,63	0,46	0,32	0,98	0,19	0,47	0,42	0,48	0,48	0,45	0,31	0,30	0,08	0,45	0,60	0,87	0,86	0,90
Hg	-0,18	0,19	0,56	-0,31	0,60	-0,02	-0,18	-0,52	0,06	-0,42	-0,37	-0,35	-0,30	-0,25	-0,10	-0,03	0,03	0,13	0,12	0,00	-0,07	-0,13	-0,17
Mo	-0,38	0,13	0,57	-0,42	0,54	0,19	-0,20	-0,57	0,02	-0,60	-0,55	-0,57	-0,54	-0,39	-0,22	-0,18	0,02	0,05	-0,01	0,02	-0,09	-0,12	-0,17
Nb	0,23	0,96	-0,06	-0,33	0,38	0,70	0,46	0,22	0,97	-0,08	0,26	0,18	0,26	0,31	0,30	0,21	0,25	0,09	0,44	0,68	0,88	0,90	0,92
Ni	0,35	0,48	-0,16	0,39	-0,19	0,51	0,78	0,95	0,50	0,32	0,54	0,51	0,58	0,69	0,68	0,61	0,59	0,47	0,66	0,70	0,73	0,70	0,70
Pb	-0,25	0,33	0,12	-0,58	0,45	0,48	0,35	-0,15	0,30	-0,54	-0,32	-0,38	-0,28	-0,02	0,17	0,23	0,39	0,45	0,36	0,53	0,33	0,41	0,31
Sb	-0,08	0,50	0,66	-0,19	0,71	0,20	0,19	-0,18	0,39	-0,31	-0,14	-0,19	-0,11	0,08	0,27	0,29	0,44	0,37	0,38	0,37	0,35	0,28	0,29
Sc	0,69	0,47	-0,39	0,20	-0,27	0,40	0,46	0,68	0,59	0,56	0,78	0,74	0,77	0,74	0,58	0,43	0,31	0,12	0,31	0,51	0,63	0,71	0,66
Sn	0,41	0,82	-0,19	-0,19	0,30	0,58	0,58	0,42	0,86	0,10	0,44	0,38	0,44	0,51	0,42	0,37	0,34	0,21	0,53	0,67	0,84	0,87	0,87
Sr	1,00	0,35	0,15	0,53	0,05	0,00	0,09	0,47	0,40	0,88	0,94	0,96	0,93	0,84	0,60	0,45	0,27	0,00	0,12	0,06	0,30	0,30	0,29
Ta		1,00	0,09	-0,17	0,47	0,68	0,48	0,31	0,96	0,04	0,36	0,29	0,38	0,42	0,40	0,30	0,33	0,15	0,48	0,62	0,87	0,86	0,89
Th			1,00	0,38	0,68	-0,20	-0,08	-0,06	-0,05	0,05	0,06	0,07	0,12	0,22	0,32	0,31	0,42	0,36	0,26	-0,05	-0,02	-0,17	-0,22
U				1,00	-0,06	-0,33	0,12	0,59	-0,18	0,75	0,59	0,66	0,62	0,61	0,57	0,51	0,42	0,29	0,23	-0,10	-0,03	-0,15	-0,12
V					1,00	0,12	0,02	-0,19	0,32	-0,16	-0,07	-0,08	-0,04	0,09	0,15	0,18	0,31	0,27	0,29	0,11	0,25	0,17	0,17
W						1,00	0,54	0,29	0,68	-0,25	-0,04	-0,07	-0,01	0,15	0,20	0,13	0,25	0,16	0,39	0,65	0,66	0,72	0,68
Y							1,00	0,67	0,51	-0,03	0,20	0,18	0,31	0,53	0,72	0,76	0,79	0,77	0,91	0,88	0,76	0,73	0,70
Zn								1,00	0,31	0,50	0,64	0,63	0,68	0,78	0,73	0,67	0,62	0,49	0,59	0,54	0,55	0,52	0,51
Zr									1,00	0,09	0,41	0,35	0,43	0,44	0,42	0,30	0,30	0,11	0,48	0,67	0,91	0,92	0,93
La										1,00	0,88	0,93	0,85	0,72	0,50	0,38	0,17	-0,07	-0,06	-0,19	0,03	0,02	0,08
Ce											1,00	0,99	0,98	0,88	0,64	0,49	0,31	0,05	0,20	0,16	0,41	0,39	0,40
Pr												1,00	0,98	0,88	0,65	0,51	0,31	0,06	0,18	0,10	0,34	0,32	0,33
Nd													1,00	0,92	0,74	0,60	0,42	0,18	0,33	0,24	0,46	0,43	0,41
Sm														1,00	0,91	0,82	0,71	0,49	0,56	0,46	0,55	0,52	0,48
Eu															1,00	0,96	0,91	0,76	0,78	0,65	0,60	0,54	0,50
Gd																1,00	0,96	0,87	0,83	0,64	0,51	0,45	0,42
Tb																	1,00	0,94	0,88	0,71	0,54	0,48	0,42
Dy																		1,00	0,89	0,69	0,41	0,35	0,27
Ho																			1,00	0,86	0,74	0,65	0,59
Er																				1,00	0,86	0,86	0,79
Tm																					1,00	0,98	0,95
Yb																						1,00	0,97

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os elementos maiores, Fe_2O_3 e SiO_2 apresentam boa correlação negativa. Este comportamento inverso é típico de perfis lateríticos (COSTA, 2008). Fe_2O_3 e Al_2O_3 também apresentam boa correlação negativa (figura 26a, b). Porém, ferro e alumínio não apresentam correlação com o titânio (figura 26c, d). Ferro e vanádio apresentam correlação moderada (figura 26e) e o alumínio não apresenta correlação com o gálio (figura 26f).

Figura 26 - Correlações geoquímicas no perfil laterítico da Serra do Piriá.



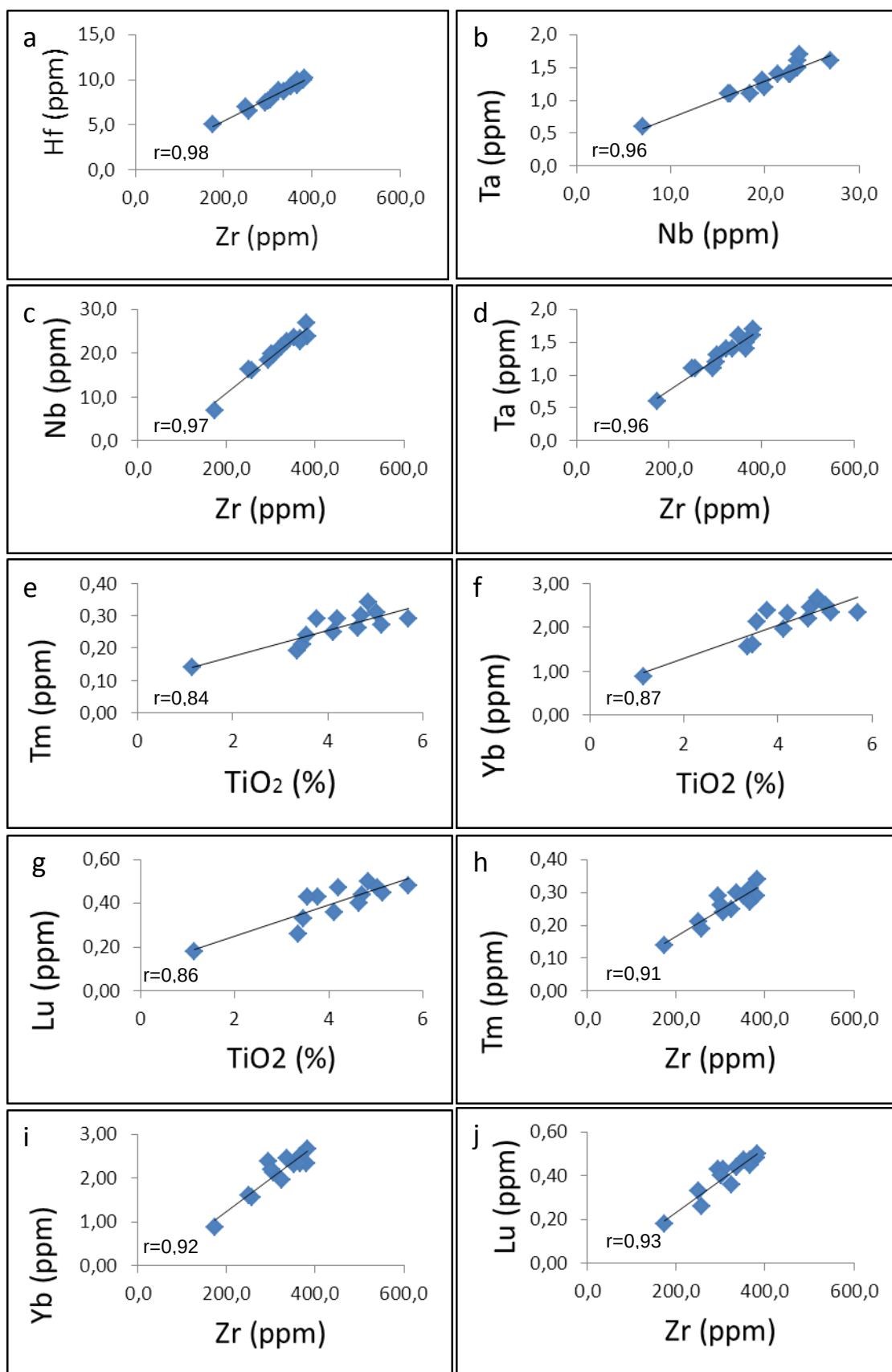
Fonte: Elaborado pelo autor.

Zr e Hf apresentam excelente correlação linear positiva (figura 27a), um fato muito comum, que retrata a presença do mineral zircão, até porque a razão Zr/Hf na ordem de 38 se enquadra na faixa de variação da razão neste mineral (BARROS, NARDI; DILLENBURGS, 2005). A correlação Nb-Ta também é altamente significativa (figura 27b), e sua razão Nb/Ta de 15,25 é observada também no zircão

(BARROS; NARDI; DILLENBURGS, 2005), como mostram as correlações Zr-Nb e Zr-Ta (figura 27c, d).

As correlações positivas TiO_2 -ETRP (figura 27e, f, g) sugerem o zircão como resistato e anatásio (neoformado e portanto estável) acumulando de igual forma ao longo do perfil laterítico, excluindo a possibilidade de anatásio ser o principal portador de ETR. O zircão se apresenta assim como o principal carreador de ETR, demonstrada pela correlação positiva e significativa Zr-ETRP (figura 27h, i, j).

Figura 27 - Correlações geoquímicas no perfil laterítico da Serra do Piriá.

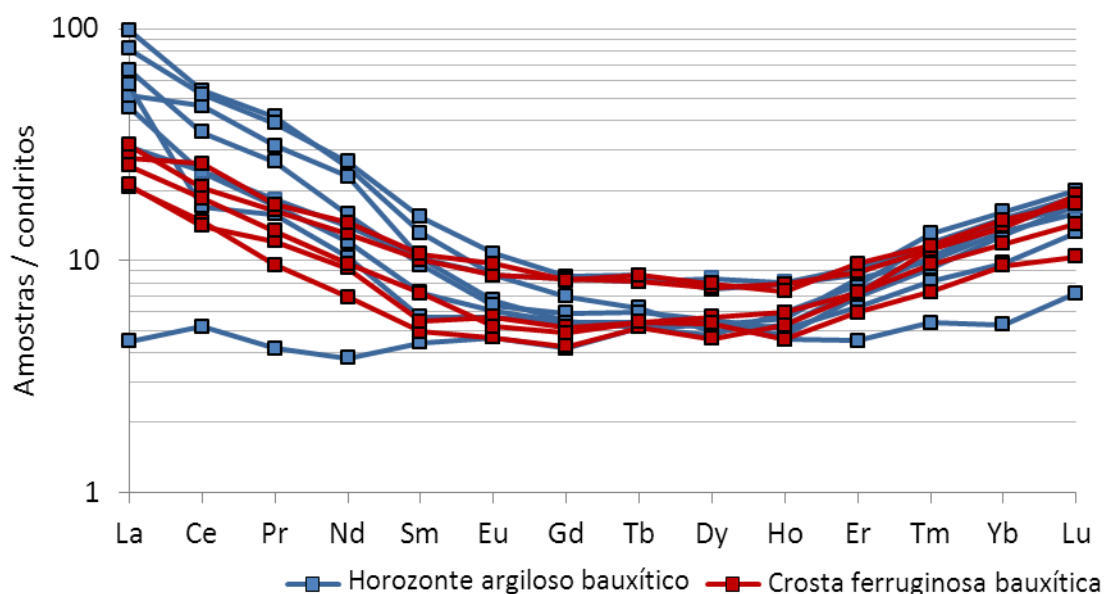


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os teores dos ETR estão nitidamente abaixo da média crustal e na ordem da maioria dos perfis lateríticos bauxíticos derivados de rochas sedimentares (HORBE; COSTA, 1999; KOTSCHOUBEY et al., 2007) e granitóides (DU; RATE; GEE., 2012; GIORGIS et al., 2014). Embora o padrão de distribuição dos ETR normalizados aos condritos sejam semelhantes para os dois horizontes, os valores de Σ ETR são mais elevados no horizonte argiloso bauxítico, onde Σ ETR de 53,3 ppm, enquanto na crosta é de 33,7 ppm. Ao contrário do que normalmente se observa em perfis lateríticos (HORBE; COSTA, 1997, 1999; DU; RATE; GEE., 2012; GIORGIS et al., 2014) não se observou anomalias por exemplo positiva de Ce e nem a negativa de Eu.

Porém, o padrão de distribuição mostra uma forma em “U” aberto (figura 28), indicando empobrecimento nos ETRL e ligeiro enriquecimento nos ERTp, é semelhante ao identificado por Kotschoubey et al. (2007) nos diferentes horizontes da província bauxitífera de Paragominas (saprólito, bauxita, horizonte ferruginoso e capeamento argiloso); desenvolvido sobre rochas siliciclásticas.

Figura 28 - Padrão de distribuição dos ETR normalizado aos condritos de Evensen *et al.* (1978).



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÕES

O perfil investigado compreende dois horizontes de alteração intempérica. Na base está o horizonte argiloso bauxítico e sobreposto a ele, a crosta ferruginosa bauxítica. O horizonte argiloso bauxítico é composto por argila bauxítica, bauxita argilosa e bauxita pobre em Fe. Já o horizonte ferruginoso bauxítico é fundamentalmente composto por uma crosta ferroaluminosa. Ao microscópio óptico a trama geral compreende minerais microcristalinos distribuídos em um plasma ferruginoso hematítico, goethítico e gibbsítico (na crosta) e caulínítico/ gibbsítico no horizonte argiloso. Estes plasmas cimentam concreções, nódulos e pisólitos. Os aspectos texturais sugerem rocha-mãe compatível com xistos e/ou filitos aflorantes na porção basal da Serra do Piriá.

O horizonte argiloso bauxítico é composto por caulinita, gibbsita, goethita e anatásio. Já a crosta ferruginosa bauxítica, por hematita, goethita, gibbsita e anatásio. Ambos os horizontes possuem augelita e quartzo como acessórios. As caulinitas do perfil laterítico da Serra do Piriá são compatíveis com as caulinitas de médio grau de ordenamento estrutural. O anatásio se apresenta em cristais nanométricos de 100 e 400nm.

A composição química reforça os dados mineralógicos, confirmando o domínio de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Os teores de sílica variam de 0,48 a 26,78%, mais altos na base e mais baixos no topo. Os teores de Fe_2O_3 apresentam um comportamento inverso ao da sílica, comprovando de fato o perfil como laterítico. Eles variam de 15,6 a 69,3%, mais altos na crosta ferruginosa bauxítica. Os teores de Al_2O_3 oscilam entre 8,53 e 36% e estão associados à maior abundância de gibbsita, e caulinita além de goethita $\{(\text{Fe}, \text{Al})\text{OOH}\}$. A ausência de composições transicionais entre os dois horizontes, especialmente relacionada aos teores de Si e Fe, retrata sua estruturação em zonas bem individualizadas.

O TiO_2 está representado unicamente pelo anatásio e oscila entre 1,14 e 5,7%. Estes são oscilantes e sugerem rocha-mãe de constituição heterogênea. Os teores de P_2O_5 (0,162 a 0,718%) são superiores ao da média crustal e estão representados pela augelita. A Perda ao Fogo (P. F.) varia de 8,46 a 19,05%, refletindo a presença de caulinita, gibbsita e goethita. Parte do alumínio liberado

pela dissolução da caulinita, em vez de se precipitar como gibbsita, foi admitido na estrutura da goethita, em substituição ao Fe, chegando a alcançar 22,25 moles %.

Zr-Hf e Nb-Ta apresentam excelente correlação linear positiva e as razões Zr/Hf e Nb-Ta se enquadram na faixa de variação do zircão. As correlações positivas TiO_2 de e Zr com ETRP sugerem que zircão e anatásio se acumularam de igual forma ao longo do perfil laterítico como mineral resistato e neoformado, respectivamente. A correlações Zr-ETRP sugerem também que o zircão é o principal carreador de ETR.

Os teores dos ETR estão nitidamente abaixo da média Crustal e na ordem da maioria dos perfis lateríticos bauxíticos derivados de rochas sedimentares e granitóides. Estes são mais abundantes na argila bauxítica, onde a média de ΣETR de 53,3 ppm, valor superior ao da crosta (ΣETR de 33,7 ppm).

Portanto, a composição mineralógica e a distribuição dos teores dos componentes químicos principais são compatíveis com a evolução laterítica, equivalente aos perfis lateríticos mais antigos da Amazônia, conhecidos como maduros.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F. A. M.; VILLAS, R. N. N.; HASUI, Y. Esboço estratigráfico do Pré-cambriano da região do Gurupi: estados do Pará e Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., 1980, Camboriú. *Resumos expandidos*. Camboriú : SBG, 1980. v.2, p.647-658.
- ALEVA, G. J. J. *Laterites: concepts, geology, morphology and chemistry*. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands, 1994. 169p.
- AMIGÓ, J. M.; BASTISTA, J.; SANS, A.; SIGNES, M.; SERRANO, J. Crystallinity of Lower Cretaceous kaolinites of Teruel. *Applied Clay science*, v.9, p.51-69, 1994.
- APARICIO, P.; GALÁN, E. Mineralogical Interference on Crystallinity Index Measurements. *Clays and Clay Minerals*, v.47, p.12-27, 1999.
- BARDOSSY, G. *Karst Bauxites*. Amsterdam: Elsevier, 1982. 441p.
- BARROS, A. E.; NARDI, L. V. S.; DILLENBURG, S. R. Geoquímica de minerais detríticos em estudos de proveniência: uma revisão. *Revista Pesquisas em Geociências*, Instituto de Geociências-UFRS, v.32 n.1, p.3-15, 2005.
- BRANDT, F. Ein neuer Typ von Elsen-Tonerde-Phosphat Vorkommen (Maranhão, Nordbrasilien). *Chemle der Erde*, v.7, p.333-425, 1932.
- CALAF, J. M. C. *Evolução geológica no Cenozóico da região entre Açailândia (MA) e Ligação (PA)*. 2000. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2000.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. *Carta Geológica Pinheiro: SA.23.Y-B*, 2001.
- COSTA, J. L. *Programa Grande Carajás: Castanhal, Folha SA.23-V-C, Estado do Pará*. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. CPRM, Belém, 2000.
- COSTA, J. L.; ARAÚJO, A. A. F.; VOLLAS BOAS, J. M.; FARIA, C. A. S.; SILVA NETO, C. S.; WANDERLEY, V. J. R. *Projeto Gurupi: relatório final de etapa*. DNPM/CPRM: Belém, v.3, 1977.
- COSTA, M. L. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 2, p.146-160, 1991.
- CALAF, J. M. C. *Evolução geológica no Cenozóico da região entre Açailândia (MA) e Ligação (PA)*. 2000. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2000.

COSTA, M. L. *Geologia, mineralogia, geoquímica e gênese dos fosfatos de Jandiá, Cansa Perna e Itacupim, no Pará, e Pirocaua e Trauíra, no Maranhão*. 1980. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Geologia, Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas, Universidade federal do Pará, Belém, 1980.

COSTA, M. L. Introdução ao intemperismo laterítico e à lateritização. In: LICHT, O. A. B. *et al.* (Org.). *Prospecção geoquímica de depósitos minerais metálicos, não metálicos, óleo e gás*. [S.l.]: SBGq, 2008.

COSTA, M. L. Mineralogia, geoquímica, gênese e epigênese dos lateritos fosfáticos de Jandiá, na Região Bragantina (NE do Pará). *Geochimica Brasiliensis*, v. 4, n. 1, p.85-110, 1990.

COSTA, M. L. *Petrologisch-geochemische Untersuchungen zur Genese der Bauxite und Phosphat-Laterite der Region Gurupi (Ost-Amazonien)*. Tese (Doutorado). Universität Erlangen-Nürnberg. Fakultäten der Friedrich Alexander, 1982, 189p.

COSTA, M. L.; CRUZ, G. S. As bauxitas do Jabuti, em Paragominas: mineralogia, geoquímica e gênese. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 46., 2012, Santos-SP. *Resumos simples*. Santos: SBG, 2012.

COSTA, M. L.; SÁ, J. H. S. Os fosfatos lateríticos da Amazônia Oriental: geologia, mineralogia, geoquímica e correlação com as bauxitas da Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., 1980, Santa Catarina. *Resumos expandidos*. SBG. Santa Catarina: SBG, 1980. v. 3, p.1459-1472.

DELVIGNE, J. E. *Atlas of Micromorphology of Mineral Alteration and Weathering*. 3 ed. Mineralogical Association of Canada (in collaboration with ORSTOM, Paris), Ottawa, Ontario, 1999.

DENNEN, W. H.; NORTON, H. A. Geology and geochemistry of bauxite deposits in the lower Amazon Basin. *Economic Geology*, v.72, n.1, p.82-89, 1977.

DU, X.; RATE, A. W.; GEE, M. Redistribution and mobilization of titanium, zirconium and thorium in an intensely weathered lateritic profile in Western Australia. *Chemical Geology*, v. 330-331, p.101-115, 2012.

EVENSEN, N. M.; HAMILTON, P. J.; O'NIONS, R. K. Rare-earth abundance in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica, Acta*, v.49, p.1199-1212, 1978.

FITZPATRICK, R. W.; SCHWERTMANN, O. Al-substitued goethite, an indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. *Geoderma*, v.27, p.335-347, 1982.

GIORGIS, I.; BONETTO, S.; GIUSTETTO, R.; LAWANE, A.; PANTET, A.; ROSSETTI, P.; THOMASSIM, J.; VINAI, R. The lateritic profile of Balkouin, Burkina Faso: Geochemistry, mineralogy and genesis. *Journal of African Earth Sciences*, v.90, p.31-48, 2014.

GÓES, A. M. *Estudo sedimentológico dos sedimentos Barreiras, Ipixuna e Itapecuru, no Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão*. Dissertação (Mestrado). Centro de Geociências, UFPA, 1981, 55p.

GÓES, A. M.; ROSSETTI, D. F. *O Neógeno da Amazônia oriental*. 225p. Museu Paraense Emílio Goeldi. Belém, 2004.

GONCALVES, D. F.; KOTSCHOUBEY, B.; MAURITY, C. W. Cobertura de alteração laterítica-bauxítica da Serra do Piriá e fosfatos associados, NE do estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 7., 2001, Belém. *Resumos expandidos*. Belém: SBG, 2001., v.ST5, p.66-69.

HORBE, A. M. C.; COSTA, M. L. Geoquímica dos ETR no perfil laterítico da Serra do Madeira – Mina do Pitinga, AM. *Geochimica Brasiliensis*, v.11, n.3, p.309-324, 1997.

HORBE, A. M. C.; COSTA, M. L. Relações genéticas entre latossolos e crostas lateríticas aluminosas e alumino-ferruginosas na região de Paragominas, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, v.29, n.4, p.497-504, 1999.

KING, C. L. A geomorfologia do Brasil oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, ano VIII, n. 2, p.147, 1956.

KLEIN E. L.; MOURA, C. A. V. Age constraints on granitoids and metavolcanic rocks of the São Luís Craton and Gurupi Belt, northern Brazil: implications for lithostratigraphy and geological evolution. *Intern. Geol. Review*, v.43, p.237-253, 2001.

KLEIN, E.; MOURA, C. A. V. Síntese Geológica e Geocronológica do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi na Região do Rio Gurupi (NE-Pará / NW- Maranhão). *Revista do instituto de geociências*, São Paulo, v.3, p.97-112, 2003.

KLEIN, E. ; PALHETA, E. S.; PINHEIRO, B. S.; MOURA, C. A. V.; ABREU, F. M. Sistematização da Litoestratigrafia do Cráton são Luís e do cinturão Gurupi. *Revista brasileira de geociências*, v. 35 n.3, p. 415-418, 2005.

KOTSCHOUBEY, B.; CALAF, J. M. C.; LOBATO, A. C. C.; LEITE, A. S.; AZEVEDO, C. H. D. Caracterização e Gênese dos depósitos de Bauxita da Província Bauxitífera de Paragominas, Nordeste da Bacia do Grajaú, Nordeste do Pará, oeste do maranhão. Capítulo XI, [2007?].

LEITE, A. S.; COSTA, M. L. A Jazida de Fosfatos Lateríticos de Sapucaia (Bonito-PA). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 13., 2013. Belém. *Resumos simples*. Belém: SBG, 2013.

LIU, X.; WANG, Q.; ZHANG, Q.; FENG, Y.; CAI, S. Mineralogical characteristics of the superlarge Quaternary bauxite deposits in Jingxi and Debao counties, western Guangxi, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, v.52, p.53-62, 2012.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner*, v. 7, p. 317-327, 1960.

OLIVEIRA, F. S.; VARAJÃO, A. F. D C.; VARAJÃO, C. A. C.; BOULANGÉ, B.; SOARES, C. C. V. Mineralogical, micromorphological and geochemical evolution of the facies from the bauxite deposit of Barro Alto, Central Brazil. *Catena*, v.105, p.29-39, 2013.

OLIVEIRA, N. P.; COSTA, M. L. Os fosfatos aluminosos do Pará e do Maranhão: Estágio atual de conhecimentos e estratégia para o aproveitamento econômico. *Ciências da Terra*, v.10, p.16-19, 1984.

OLIVEIRA, N. P.; SCHWAB, R. G. Um modelo para a gênese dos fosfatos de alumínio da região de Santa Luzia – Nordeste do Estado do Pará. *Revista Brasileira de Geologia*, 1979.

PASTANA, J. M. N. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Turiaçu/Pinheiro, folhas SA.23-V-D/SA.23-Y-B, Estados do Pará e Maranhão*. CPRM, Brasília, 1995, 205p.

PINHEIRO, R. V.; MAURITY, C. W. As Grutas bauxíticas da Serra do Piriá-PA. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. *Ciências da Terra*, v.13, 2001.

ROSSETTI, D. F. *Evolução Sedimentar Miocênica nos Estados do Pará e Maranhão*. IMPE, São Paulo, 2006.

SAYIN, M.; JACKSON, M. L. Anatase and Rutile Determination on Kaolinite Deposits. *Clays and Clay Minerals*, Great Britain, v.23, p.437-443, 1975.

SOUZA, E. L.; KOTSCHOUBEY, B.; LIMA, W. N. Indicadores geoquímicos do intemperismo atual na Serra do Piriá, Nordeste do estado do Pará. *Geochimica Brasiliensis*, v.15, n.1/2, p.49-62, 2001.

SUSZCZYNSKI, E. F. 1975. *Os recursos minerais reais e potenciais do Brasil e sua metalogenia*. Interciencia: Rio de Janeiro, 358p.

TAYLOR, S. R., MCLENNAN, S. M. Chemical composition and element distribution in the earth's crust. *Academic Press*, New York, v.2, p.697-719, 2001.

THIEL, V. R. 1963. Zum System α -FeOOH – α -AlOOH. *Zeitschrift Für anorganische allgemeine Chemie*. Band 326.