



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

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 516**

**GÊNESE DAS BAUXITAS NODULARES DO PLATÔ  
MILTÔNIA-3, PARAGOMINAS - PA**

**Dissertação apresentada por:**

**WALDIRNEY MANFREDI CALADO**

**Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica (UFPA)**

---

**BELÉM  
2017**

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

---

Calado, Waldirney Manfredi 1974 -

As bauxitas nodulares do Platô Miltônia-3, Paragominas-PA. /  
Waldirney Manfredi Calado. – 2017.

xix, 70 f : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Rômulo Simões Angélica

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de  
Geociências, Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2017.

1. Bauxita – Paragominas (PA). 2. Mineralogia. 3. Laterita –  
Paragominas (PA). I. Título.

---

CDD 22. ed.: 549.53098115

Elaborada por  
Lucia de Fátima Imbiriba de Sousa  
CRB-2/652



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

**GÊNESE DAS BAUXITAS NODULARES DO PLATÔ  
MILTÔNIA-3, PARAGOMINAS - PA**


**DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR:**

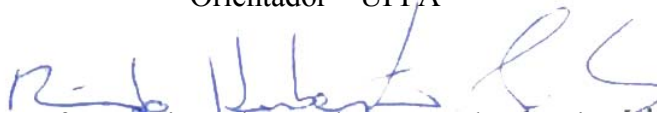
**WALDIRNEY MANFREDI CALADO**


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

**Data de Aprovação: 12 / 12 / 2017**

Banca Examinadora:

  
Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica  
Orientador – UFPA

  
Prof. Dr. Raimundo Humberto Cavalcante Lima  
Membro – UFAM

  
Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa  
Membro – UFPA

*Aos meus amados filhos Júlia, Manuela, Saulo e Felipe.  
A minha incentivadora e esposa, Larissa.  
Aos meus Pais Waldir e Hermelina.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que por sua infinita misericórdia me permitiu alcançar este objetivo. Glória ao Senhor!

A Larissa minha esposa, mãe dedicada, profissional competente, minha maior incentivadora e maior credora de paciência, pois sem seu precioso apoio não seria possível alcançar este objetivo.

As minhas amadas filhas Júlia e Manuela, aos meus filhos amados Saulo e Felipe por serem a razão de melhoria contínua, pessoal e profissional.

Aos meus pais, Waldir e Hermelina, que fizeram todo o possível para dar a mim e minhas irmãs educação, exemplo de virtudes e valores que balizam minha vida.

Ao Prof. Dr. Daniel Lima Sousa, pela amizade, tempo dedicado e precioso no apoio de revisão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica, pela confiança, cobranças, oportunidade de aprendizagem e desenvolvimento acadêmico e profissional.

A todos os amigos e colegas que compartilharam este período de aprendizagem no programa de pós-graduação do Instituto de Geociências da UFPA.

Aos amigos geólogos contemporâneos de 1994, ano em que ingressei na UFPA para estudar Geologia, com alguns dos quais tive o privilégio de trabalhar e conviver profissionalmente, além de compartilhar, até os dias atuais, bons momentos de amizade, apoio e coleguismo: Klabin Almeida, Walber Carvalho, Davis Carvalho, Leonardo Brazil, Francisco Costa e a todos que, mesmo não sendo citados aqui, não foram esquecidos.

A empresa Hydro Paragominas S.A. pelo aprendizado e crescimento profissional no período em que trabalhei, além da base de dados cedida para o desenvolvimento deste trabalho.

*“Eu calço é 37,  
meu pai me dá 36,  
dói, mas no dia seguinte  
aperto o meu pé outra vez.  
Eu aperto o meu pé outra vez!...”*

*Sapato 36 - Raul Seixas - 1977*

## RESUMO

Existem dois níveis de bauxitas distintos no platô Miltônia-3 localizado na Província Bauxitífera de Paragominas-PA. Estes níveis estão separados por um horizonte de laterita ferruginosa (LF) pseudopsolítica a concrecionária que marca um hiato entre dois ciclos distintos de formação do perfil bauxítico atual. As bauxitas do nível superior (2° ciclo de formação) possuem características nodulares a concrecionárias e as do nível basal (1° ciclo de formação) composto por uma bauxita concrecionária (BC) mais íntegra fisicamente somado a outro nível de bauxita mais friável com porções argilosas para a sua base (BCBA). Percebeu-se tratar da Bauxita Nodular Concrecionária (BNC) localizada no nível superior, de horizonte enriquecido em gibbsita, com baixos teores de sílica reativa e ferro, teores esses muito semelhantes àqueles encontrados no horizonte do principal minério de bauxita (BC) do perfil. Em observações de campo, nas frentes de lavra e nos testemunhos de sondagem constatou-se que esta BNC é uma gradação do horizonte de Bauxita Nodular (BN) acima. Essa gradação é observada pelo aumento do tamanho dos nódulos bauxíticos, onde os seus pseudopisólitos Fe-gibbsíticos intercrescem por coalescência, diminuindo os teores de ferro e sílica disseminados marcados pela mudança de coloração, passando de amarelo-lilás, até atingir uma coloração vermelho-alaranjado a ocre, à medida que se avança na profundidade. Nota-se também marcante diminuição até o completo desaparecimento dos pseudopisólitos Al-ferruginosos, além da diminuição do volume de argila gibbsítica-caulinítica neste nível. Com base nos estudos como petrografia macroscópica e microscópica, MEV/EDS, DRX e análises químicas, além de Análise de Componentes Principal (ACP) e estatística descritiva, foram desenvolvidas duas propostas de modelos de evolução sobre a gênese do nível superior de bauxitas nodulares deste depósito laterítico-bauxítico, considerando: Modelo (1) - Origem a partir da degradação das bauxitas originais (1° Ciclo), relacionadas a um 2° Ciclo de Lateritização que consiste na preexistência da bauxita matura (BC), sobreposto pela LF, que foi recoberto por “Argila de Belterra”. Este novo nível nodular imposto (BN), ocorre pelo processo de coalescência onde houve a junção da fase aluminosa residual, resultante da migração do Fe e Si em solução para fora deste nível e pela migração do Al dos níveis vizinhos acima do capeamento (CAP) e abaixo deste de LF e BC, formando e concentrando em larga escala a gibbsita preferencialmente e secundariamente a caulinita. Com a contínua evolução deste nível de BN, observa-se um amadurecimento da porção basal deste nível, formando a BNC cujos nódulos estão intercrescidos, se conectando localmente, consumindo os níveis vizinhos acima da BN e os níveis abaixo de LF e BC, até o total consumo destes;

Modelo (2) - Sua origem a partir de um 2º Ciclo de Lateritização, porém a partir de uma deposição sedimentar posterior sobre o perfil laterítico do 1º Ciclo. Com a exposição de uma rocha fonte como um plúton granitóide (Granito Cantão, Japiim, Jonasa, Ourém e Ney Peixoto do Neoproterozóico), gnaiss (embasamento cristalino arqueano) ou sedimentos siliciclásticos (Formações Itapecuru e Ipixuna do Cretáceo Superior), cuja degradação intempérica possibilitou a geração de sedimentos de natureza argilosa preferencialmente caulínica durante o Paleógeno até o início do Oligoceno?. Houve a migração de Fe, Si, Ca, Na, etc. para fora deste nível, preservando e concentrando *in situ* o Al e O, além do Si residual. O processo de coalescência permitiu a junção da fase aluminosa residual, concentrando preferencialmente gibbsita e secundariamente caulinita, fechando o primeiro ciclo de formação de bauxita. Em seguida houve um soerguimento regional, seguido por processos erosivos que possibilitaram a exposição deste perfil bauxítico anteriormente formado, sob clima sazonal, com abundância de água meteórica e intensa insolação se intercalando, onde se desenvolveu a LF, de ocorrência regional marcando um hiato entre os ciclos de formação destas bauxitas. Nova movimentação regional de rebaixamento, que possibilitou a deposição de sedimentos de origem siliciclástica, que serviram de rocha fonte para um novo ciclo de formação de bauxita durante o Mioceno Superior. Podem ser as mesmas rochas cuja degradação física e química forneceram os sedimentos para o 1º ciclo de formação de bauxitas. Repetindo o processo de coalescência da fase aluminosa residual, com o desenvolvimento em larga escala preferencialmente da gibbsita e secundariamente caulinita, fechando o segundo ciclo de formação de BN e BNC.

Palavras-chave: Bauxita. Concreções. Evolução. Lateritização. Amazônia.



## ABSTRACT

There are two distinct levels of bauxites on the Miltônia-3 plateau located at the Bauxite Province of Paragominas-PA. These levels are separated by a pseudopsolitic to concretionary ferruginous laterite (FL) horizon, marking a hiatus between two distinct cycles of the current bauxite profile formation. The bauxites of the upper level (2nd cycle of formation) have nodular to concrete characteristics whereas those of the basal level (1st cycle of formation) are composed by a more physically complete concrete bauxite (CB) added by another level of a more friable bauxite with clayey portions for its base (concrete bauxite with clayey bauxite - CBCB). It was noticeable the CNB located at the upper level of gibbsite-enriched horizon with low reactive silica and iron contents, which are very similar to those found on the horizon of the main bauxite ore (CB) of the profile. In field observations, on the survey fronts and in the drill holes it was found that this CNB is a gradation of the above Nodular Bauxite (NB) horizon. This gradation is observed by the increase in the size of the bauxite nodules, where their Fe-gibbsite pseudopsolites grows up by coalescence, decreasing the diffused iron and silica contents marked by the change in color from lilac-yellow to a red-orange color, to ocher, in higher depths. It is also noticeable a decrease until the complete disappearance of the Al-ferruginous pseudopsolites, in addition to the decrease of the volume of gibsytic-kaolinite clay at this level. Based on this study using macroscopic and microscopic petrography, SEM/EDS, XRD and chemical analysis, as well as Principal Component Analysis (PCA) and descriptive statistics, two evolution model proposals were developed on the genesis of the upper level of nodular bauxites of this lateritic-bauxite deposit, considering: Model (1) - Origin from the degradation of the original bauxites (1st Cycle), related to a 2nd Lateritization Cycle which consists of the preexistence of mature bauxite (CB), overlapped by FL, which was covered by "Belterra Clay". This new nodular level (NB) occurs through the coalescence process whereby the residual aluminous phase junction occurred, resulting from the migration of Fe and Si in solution out of this level and by the migration of the neighboring levels above the clayey overburden (CAP) and below that of FL and CB, forming and concentrating large scale gibbsite preferably and secondarily to kaolinite. With the continuous evolution of this level of NB, a maturation of the basal portion of this level is observed, forming the CNB whose nodules are interincreased, connecting locally, consuming neighboring levels above NB and levels below FL and CB, up to the total consumption of these; Model (2) - Its origin from a 2nd Lateritization Cycle, however from a later sedimentary deposition on the lateritic profile of the 1st Cycle. With the exposure of a source rock as a granitoid pluton (Cantão,

Japiim, Jonasa, Ourém and Ney Peixoto of Neoproterozoic granites), gneiss (Archaean crystalline basement) or siliciclastic sediments (Itapecuru and Ipixuna Formations of the Upper Cretaceous), whose weathering degradation made it possible the generation of sediments of clayey nature preferentially kaolinite during the Paleogene until the beginning of the Oligocene. Migration of Fe, Si, Ca, Na, etc. occurred outside this level, preserving and concentrating the Al and O *in situ*, in addition to the residual Si. The process of coalescence allowed for the addition of the residual aluminous phase, preferentially concentrating the gibbsite and secondarily kaolinite, closing the first cycle of bauxite formation. Thereafter, there was a regional upwelling, followed by erosive processes that allowed for the exposure of this previously formed bauxite profile, under a seasonal climate, with an abundance of meteoric water and intense intercalated insolation, where the FL developed, of regional occurrence marking a hiatus between the formation cycles of these bauxites. New regional retraction movement, which allowed for the deposition of sediments of siliciclastic origin, which served as source rock for a new bauxite formation cycle during the Upper Miocene. They may be the same rocks from which physical and chemical degradation provided sediments for the 1st cycle of bauxite formation. Repeating the coalescence process of the residual aluminous phase, with the large scale development preferably of the gibbsite and secondarily kaolinite, closing the second cycle of NB and CNB formation.

Key words: Bauxite. Concretions. Evolution. Lateritization. Amazônia.

## ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 –	Perfil laterítico típico do depósito Miltônia-3, com a separação dos ciclos de formação da bauxita. ....	03
Figura 1.2 –	Mapa de localização do Platô Miltônia-3, Fonte Hydro Paragominas S.A. .	04
Figura 2.1 –	Estratigrafia do Grupo Itapecuru. ....	11
Figura 2.2 –	Mapa geológico das bacias do Parnaíba e São Luiz-Grajaú, com a localização da Formação Itapecuru / Ipixuna (Kit) .....	13
Figura 2.3 –	Mapa geológico com o domínio da Bacia do Grajaú com os principais platôs de ocorrências de bauxita. ....	14
Figura 2.4 –	Mapa com a extensão da Província Bauxitífera de Paragominas. ....	15
Figura 2.5 -	Mapa de distribuição areal e respectiva espessura de Bauxita Nodular Concrecionária no platô Miltônia-3 e adjacências. ....	17
Figura 3.1 –	Foto da frente de lavra da Mina-4 com exposição de um horizonte espesso de Bauxita Nodular Concrecionária delimitada pela linha tracejada em amarelo. ....	18
Figura 3.2 –	Mapa de localização dos furos de sondagem executados em 2014 na Mina-4 do platô Miltônia-3 em Paragominas – PA. ....	19
Figura 3.3 –	Gráfico com o percentual das amostras analisadas por litologias. ....	25
Figura 3.4 –	Distribuição das amostras rejeitadas. ....	26
Figura 3.5 –	Frequência dos teores $Al_2O_3$ versus frequência amostral por horizonte litológico de bauxita. ....	29
Figura 3.6 –	Frequência dos teores $SiO_2$ versus frequência amostral por horizonte litológico de bauxita. ....	29
Figura 3.7 –	Frequência dos teores $Fe_2O_3$ versus frequência amostral por horizonte litológico de bauxita. ....	30
Figura 3.8 –	Frequência dos teores $TiO_2$ versus frequência amostral por horizonte litológico de bauxita. ....	30
Figura 3.9 –	Frequência dos teores Alap versus frequência amostral por horizonte litológico de bauxita. ....	31
Figura 3.10 –	Frequência dos teores Sire versus frequência amostral por horizonte litológico de bauxita. ....	31

Figura 4.1 –	A – Horizontes bauxíticos nas frentes de Lavra (1 – CAP, 2 – BN, 3 – BNC); B e C - Amostragem de canaletas para o controle de qualidade na frente de lavra, com a exposição do talude da próxima frente de lavra na mina. ....	33
Figura 4.2	– Perfil laterítico – bauxítico evidenciando o contorno irregular em amarelo dos níveis de BN, BNC, LF e parte do topo da BC e suas espessuras médias. ....	34
Figura 4.3 –	Bauxita Nodular <i>in natura</i> : nódulos de gibbsita em matriz de argila caulínica a gibbsítica. ....	35
Figura 4.4 –	(A) Nódulo de bauxita em matriz gibbsítica luz natural-LN; (B) Mesma imagem de A com luz polarizada-NX evidenciando a recristalização de bauxita; (C) Matriz gibbsítica compactada em LN; (D) Mesma imagem de C com NX, evidenciando a recristalização de gibbsita em microcristais; (E) Minerais opacos dispersos em matriz gibbsítica em LN; (F) Imagem de E com NX evidenciando a recristalização da gibbsita em <i>cutans</i> e fissuras. ....	36
Figura 4.5 –	Imagem de parte de um nódulo de bauxita e respectivas análises EDS apresentando microcristais de gibbsita, ilmenita e hematita associada a goethita, limonita e gibbsita, dispersos em matriz gibbsítica e <i>cutans</i> preenchidos por cimento gibbsítico recristalizado. ....	37
Figura 4.6 –	Imagem de parte de um nódulo de bauxita e respectivas análises EDS apresentando microcristais de gibbsita e zircão dispersos em matriz gibbsítica. ....	38
Figura 4.7 –	Difratograma de Raio-X de amostra total de BN, com a gibbsita (Gbs) como mineral dominante, além de caulinita (Kln), hematita (Hem) e anatásio (Ant) como acessórios. ....	39
Figura 4.8 –	Bauxita nodular concrecionária preservando a argila caulínica a gibbsítica nos bolsões. ....	40
Figura 4.9 –	(A) Matriz gibbsítica-caulínica; (B) – Imagem de A com NX evidenciando recristalização de gibbsita; (C) Matriz gibbsítica compactada; (D) Imagem de C com NX evidenciando a gibbsita em microcristais; (E) Nódulos de gibbsita em matriz gibbsítica; (F) Imagem de E com NX evidenciando um fragmento pretérito de gibbsita. ....	41

Figura 4.10 – Imagem de fragmento de BNC com análises EDS em microcristais de ilmenita com gibbsita e hematita associada com goethita e limonita dispersos em matriz gibbsítica e <i>cutans</i> preenchidos por cimento gibbsítico. ....	42
Figura 4.11 – Imagem de agregado de ilmenita com análises EDS em microcristais de gibbsita, ilmenita além de hematita associada a goethita, limonita e gibbsita, envoltos por plasma de ilmenita. Cimento gibbsítico preenchendo pseudos vazios. ....	43
Figura 4.12 – Imagem com análises EDS em detalhe de um micronódulo de bauxita (linha em contorno amarelo) com seu núcleo preservando internamente microcristais de gibbsita e caulinita pretéritos, envoltos por uma massa de hematita associada a goethita, limonita, gibbsita e apatita?, entre micronódulos gibbsíticos, cimento gibbsítico. ....	44
Figura 4.13 – Imagem com análises EDS de um cristal de zircão com microcristais dispersos de zircão e ilmenita em matriz gibbsítica com hematita e caulinita. ....	45
Figura 4.14 – DRX de amostra total de BNC, com a gibbsita (Gbs) como mineral dominante, além de caulinita (Kln) e anatásio (Ant) como acessórios. ....	46
Figura 4.15 – Laterita Ferruginosa - LF com nódulos ferruginosos angulosos a arredondados dispersos em matriz gibbsítica - caulínica. ....	47
Figura 4.16 – (A) Contato do nódulo ferruginoso com a matriz gibbsítica-caulínica; (B) Imagem de A com NX evidenciando a recristalização de bauxita. ....	47
Figura 4.17 – Imagem e respectivas análises EDS de um fragmento de LF com microcristais de gibbsita, ilmenita e zircão dispersos em matriz gibbsítica. ....	48
Figura 4.18 – Fotomicrografia com respectivas análises EDS de um fragmento de LF em seção de um microcristal de ilmenita com inclusões de microcristais de gibbsita e hematita, além de zircão disperso em matriz gibbsítica. ....	49
Figura 4.19 – DRX de amostra total de LF, com gibbsita (Gbs) como mineral dominante, além de hematita (Hem) e caulinita (Kln) como acessórios. ....	50
Figura 4.20 – Perfil com a distribuição dos teores médios dos óxidos maiores, PPC e Rec 20# das amostras lavadas de bauxita por horizontes litológicos (n = 864). ....	53

Figura 4.21 – Perfil do FM-0012 e as fotos dos intervalos amostrados para análise química. ....	54
Figura 5.1 – Correlações das espessuras dos horizontes litológicos. ....	57
Figura 5.2 – Projeções das variáveis considerando os planos da correlação entre o Fator 1 <i>versus</i> Fator 3. ....	59
Figura 5.3 – Biplot Fator 1 versus Fator 3 com as componentes BNC e BC sobre suas variáveis litoquímicas. ....	59
Figura 5.4 – Modelo de Evolução das Bauxitas I da região de Paragominas – PA, em três etapas evolutivas, onde as setas indicam o sentido do aumento dos teores de $Al_2O_3$ , $Fe_2O_3$ e $SiO_2$ , a partir dos horizontes de BN/BNC e LF. .	61
Figura 5.5 – Modelo de Evolução das Bauxitas II da região de Paragominas-PA. ....	65

**ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 3.1 – Estatística univariada da litologia BN. ....	26
Tabela 3.2 – Estatística univariada da litologia BNC. ....	27
Tabela 3.3 – Estatística univariada da litologia LF. ....	27
Tabela 3.4 – Estatística univariada da litologia BC. ....	27
Tabela 3.5 – Estatística univariada da litologia BCBA. ....	28
Tabela 3.6 – Estatística univariada da litologia BA. ....	28
Tabela 4.1 – Concentração química dos elementos maiores, PPC, Alap, Sire, REC a #20 mesh em porcentagem e umidade. ....	52
Tabela 4.2 – Concentração química dos óxidos maiores, PPC, Alap, Sire, Rec a #20 mesh em porcentagem e umidade do FM- 0012. ....	54
Tabela 5.1 – Fatores gerados a partir dos dados litoquímicos das amostras de bauxita. ....	58

**ABREVIACÕES**

ACP	Análise de Componentes Principais
Alap	Alumina Aproveitável
Ant	Anatásio
ARV	Argila Variegada
AT	Alumina Total
BA	Bauxita Argilosa
BCBA	Bauxita Concrecionária com Bauxita Argilosa
BC	Bauxita Concrecionária
BN	Bauxita Nodular
BNC	Bauxita Nodular Concrecionária
CAP	Capeamento Argiloso
DRX	Difracção de Raios-X
EDS	<i>Energy Dispersive System</i>
FM	Furo de Mina
Gbs	Gibbisita
Hem	Hematta
ICP	<i>Inductively-Coupled Plasma Spectroscopy</i>
Kln	Caulinita
PPC	Perda por Calcinação
LF	Laterita Ferruginosa
LN	Luz Natural
MEV	Microscopia Eletronica de Varredura
NX	Nicóis Cruzados
Rec	Recuperação
Sire	Sílica Reativa
UFPA	Universidade Federal do Pará
Vs.	<i>Versus</i>



**SUMÁRIO**

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>EPÍGRAFE</b> .....	vi
<b>RESUMO</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	xi
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	xiv
<b>ABREVIACÕES</b> .....	xv
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	01
1.1 PROBLEMÁTICA .....	01
1.2 OBJETIVOS .....	03
1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO .....	04
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	05
2.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS .....	05
2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL .....	11
<b>2.2.1 Grupo Itapecuru</b> .....	11
<b>2.2.2 Formação Ipixuna</b> .....	12
2.3 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL .....	14
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	18
3.1 TRABALHO DE CAMPO E AMOSTRAGEM .....	18
3.2 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS .....	20

<b>3.2.1</b>	<b>Preparação das Amostras</b> .....	20
<b>3.2.2</b>	<b>Petrografia</b> .....	20
<b>3.2.3</b>	<b>Análise por Difratomia de Raios-X (DRX)</b> .....	21
<b>3.2.4</b>	<b>Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (Energy Dispersive Spectroscopy – EDS)</b> .....	22
<b>3.2.5</b>	<b>Análises Químicas</b> .....	22
<b>3.3</b>	<b>ESTATÍSTICA DESCRITIVA</b> .....	24
<b>3.3.1</b>	<b>Verificações de Inconsistência Lógica</b> .....	24
<b>3.3.2</b>	<b>Definição dos testes e limites</b> .....	25
<b>3.3.3</b>	<b>Estatística Descritiva</b> .....	25
<b>3.4</b>	<b>ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP)</b> .....	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	33
<b>4.1</b>	<b>PERFIL LATERÍTICO – BAUXÍTICO</b> .....	33
<b>4.2</b>	<b>COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA</b> .....	34
<b>4.2.1</b>	<b>Bauxita Nodular – BN</b> .....	34
<b>4.2.2</b>	<b>Bauxita Nodular Concrecionária – BNC</b> .....	39
<b>4.2.3</b>	<b>Laterita Ferruginosa – LF</b> .....	46
<b>4.3</b>	<b>GEOQUÍMICA</b> .....	50
<b>5</b>	<b>DISCUSSÕES</b> .....	57
<b>5.1</b>	<b>CORRELAÇÕES DE ESPESSURAS LITOLÓGICAS</b> .....	57
<b>5.2</b>	<b>ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP)</b> .....	58
<b>5.3</b>	<b>PROPOSTA DO MODELO DE EVOLUÇÃO DAS BAUXITAS I</b> .....	61
<b>5.4</b>	<b>PROPOSTA DO MODELO DE EVOLUÇÃO DAS BAUXITAS II</b> .....	63

<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>66</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>68</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMÁTICA

O horizonte bauxítico do perfil laterítico da mina de Miltônia-3 da Hydro Paragominas S.A. exibe níveis com espessuras que variam localmente de poucos centímetros a métricos. Os corpos lateríticos se apresentam como extensos platôs com topo ligeiramente inclinado para NNE segundo Kotschoubey, *et al.* (1997).

O perfil laterítico-bauxítico é constituído por seis horizontes distintos que apresentam variações de texturas e na dominância de óxidos/hidróxidos de alumínio e de ferro. Em geral são lenticulares e muitas vezes ocorrem ausência de um ou mais horizontes no perfil, segundo Kotschoubey, *et al.* (1997).

Por observações de campo os contatos são bastantes irregulares e as variações nas espessuras causam modificações na geometria dos níveis bauxíticos, principalmente no corpo de minério, por ser um horizonte preferencialmente contínuo ao longo do platô.

No platô Miltônia-3 são evidenciados dois horizontes superiores de bauxita nodular no perfil bauxítico, um com caráter pseudopisolítico (Bauxita Nodular - BN) e outro com caráter concrecionário (Bauxita Nodular Concrecionária - BNC). Estes dois horizontes estão sobrepostos aos horizontes principais de minério, composto por uma camada de bauxita concrecionária mais íntegra fisicamente e outra de bauxita com maior variação de grau de cristalinidade e integridade física, sendo mais friável e com porções argilosas como descrito por Kotschoubey, *et al.* 2005.

Estas litologias estão individualizadas em dois grupos distintos de bauxita de acordo com sua maturidade cristalina, tendo ainda uma camada de laterita ferruginosa (LF) pseudopisolítica a concrecionária, por vezes com matriz de cimento bauxítico, separando esses dois grupos e que seria um hiato no período de formação destes horizontes.

Na retomada dos trabalhos de pesquisa geológica na região de Paragominas – PA, pela então Companhia Vale do Rio Doce em 2002 no Platô Miltônia-3, o horizonte superficial de BNC foi descrito simplesmente como uma variação da BN, não sendo possível a distinção deste horizonte no banco de dados de longo prazo, utilizado para gerar os modelos geológico e de blocos do minério lavrável nos anos iniciais das pesquisas na região.

Com as descrições dos furos de sondagem da época da pesquisa de avaliação de minério de bauxita por geólogos de campo, associado aos resultados das análises dos óxidos totais presentes no horizonte de BNC, percebeu-se tratar de um nível enriquecido em gibbsita, com baixos teores de sílica reativa e ferro, cujos teores são semelhantes àqueles encontrados nos horizontes de minério de bauxita concrecionária (BC), atualmente o principal minério explotado pela Hydro Paragominas SA.

Segundo o levantamento dos dados das campanhas de sondagens realizadas de 2002 até 2014, cerca de 90% dos furos de sondagem realizados, apresentam o horizonte de BC. Os 10% dos furos de sondagem que não ocorrem este horizonte estão localizados preferencialmente em zonas de bordas do platô Miltônia-3.

Observações realizadas nas frentes de lavra e em testemunhos de sondagem permitiram verificar que o horizonte de BNC é uma gradação do horizonte de BN. Essa gradação é observada pelo aumento gradativo do tamanho dos nódulos de bauxita, por coalescência da fase aluminosa e intercrescimento de seus pseudospisólitos, concomitantemente aumentando o tamanho dos cristais de gibbsita, diminuindo o teor de ferro disseminado nos nódulos existentes neste horizonte (BNC).

Há uma marcante mudança de coloração, passando de nódulos com bordas amareladas e internamente vermelho-lilás até atingir concreções de uma coloração laranja-avermelhada, à medida que se avança na profundidade. Nota-se também a diminuição, até o completo desaparecimento dos pseudospisólitos ferruginosos, comum no primeiro horizonte nodular e, uma diminuição da quantidade de argila neste nível.

As principais dificuldades para o aproveitamento da BNC como minério decorrem de: sua geometria lenticular; ocorrência da laterita ferruginosa logo abaixo deste horizonte, com maiores teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ ; sua natureza friável e argilosa, no contato com o horizonte acima de BN.

A natureza friável da BNC é um desafio ao decapeamento do material estéril, de modo a expor e conformar a superfície do topo do minério e executar uma lavra seletiva eficiente com equipamentos como o minerador contínuo, de grande porte como escavadeiras hidráulicas, tratores de esteiras e pás carregadeiras. O corpo de BNC ao longo do platô não se comporta de forma contínua, sendo os locais de suas ocorrências, como “ilhas” e exigem um maior controle do curto-prazo na frente de lavra na mina.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é contribuir para o entendimento da gênese dos dois horizontes superiores de bauxitas nodulares (BN / BNC) do depósito laterítico-bauxítico do platô Miltônia-3, no distrito bauxítico de Paragominas - PA, como observado na Figura 1.1, a partir destas duas principais hipóteses:

- 1) Origem a partir da degradação das bauxitas originais (1º Ciclo), relacionadas a um 2º Ciclo de Lateritização - Bauxitas degradadas (Millot, 1964; Boulangé *et al.* 1997);
- 2) Originadas em um 2º Ciclo de Lateritização, porém a partir de novo depósito sedimentar sobre o perfil laterítico do 1º Ciclo (Kotschoubey & Truckenbrodt, 1981; Kotschoubey, *et al.* 2005).

### Perfil Laterítico Típico - Platô Miltônia 3

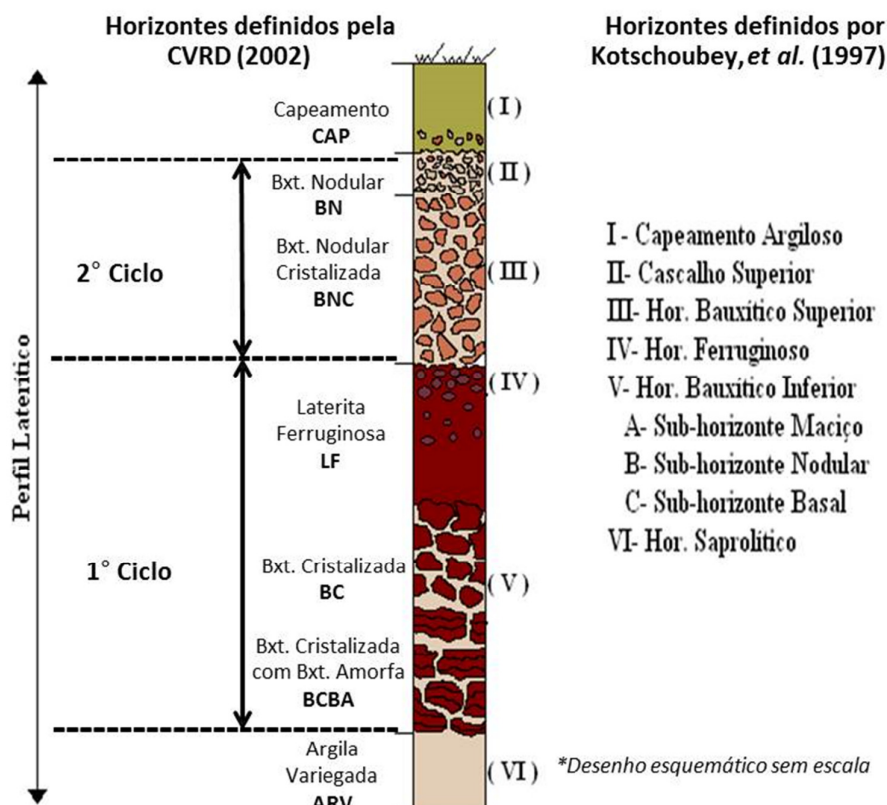


Figura 1.1 – Perfil laterítico típico do depósito Miltônia-3, com a separação dos ciclos de formação da bauxita.

Fonte: Adaptado de Kotschoubey, *et al.* (1997) e CVRD (2002).

### 1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A Mina de Miltônia-3 está localizada a 76 km a SW da cidade de Paragominas – PA, que por sua vez está situada a SE do estado do Pará, a aproximadamente 300 km a S-SE da capital Belém. As coordenadas geográficas que centralizam a área são: 3°16'49.72"S / 47°41'57.91"O (Figura 1.2).

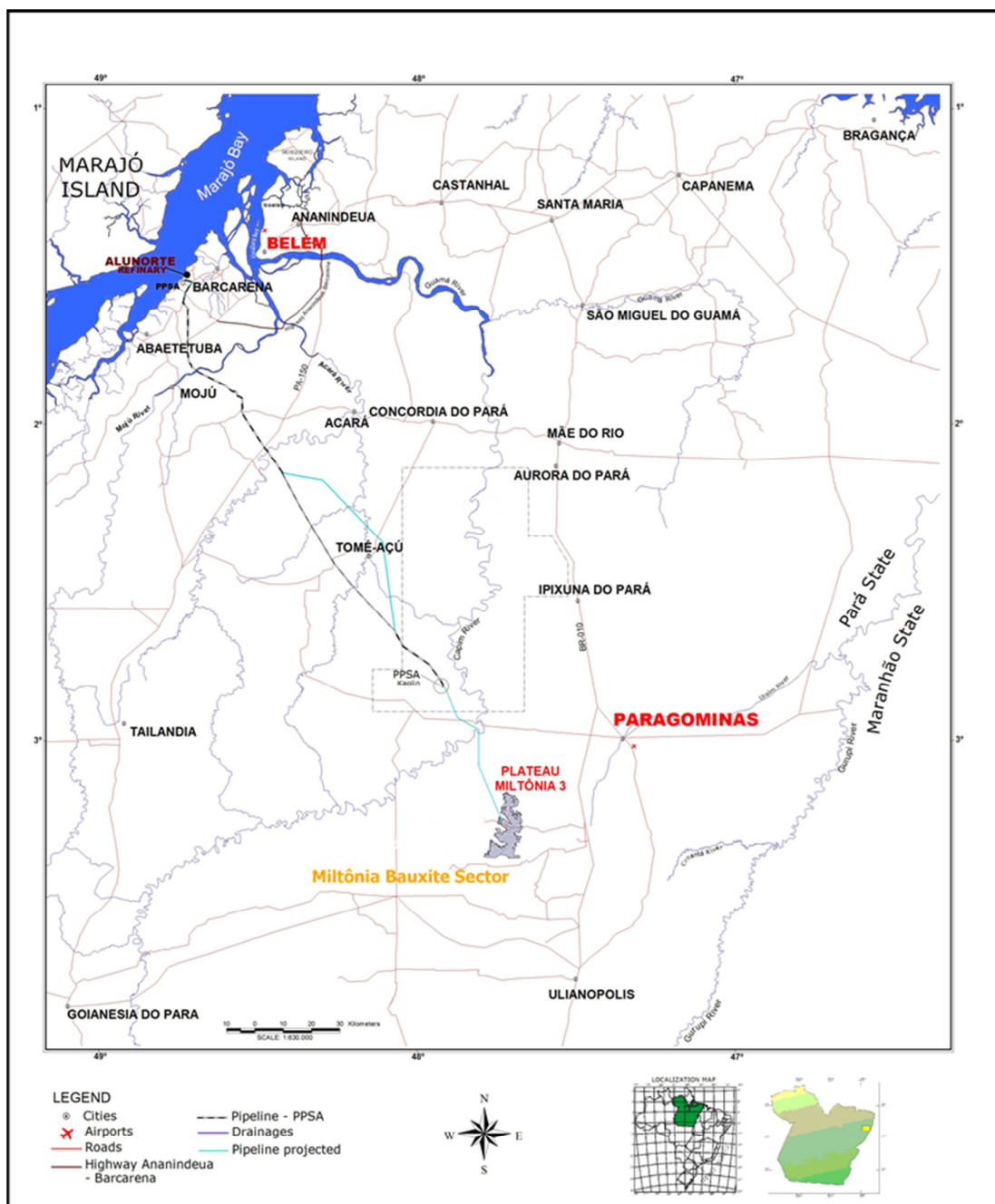


Figura 1.2 - Mapa de localização do Platô Miltônia-3.  
Fonte: Hydro Paragominas S.A. (2014).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS

A Província Bauxitífera de Paragominas, situada a SE do estado do Pará e W do estado do Maranhão, na Amazônia Oriental, segundo Kotschoubey *et al.* (2005), representa um dos mais importantes, extenso e denso agrupamento de depósitos de bauxita do Brasil, com potencial de dois bilhões de toneladas de minério metalúrgico, cerca de 60% das reservas brasileiras de bauxita.

Estes depósitos estão distribuídos geograficamente entre os rios Capim a NW e Gurupi a SE, estendendo-se pelos distritos conhecidos como Jabuti, Futuro, Miltônia, Vera-Cruz, Gurupi, Rondon e Camoai no Pará e o distrito Tiracambú no estado do Maranhão.

As primeiras citações sobre os depósitos expressivos de lateritas aluminosas nos platôs terciários Amazônicos foram através dos geólogos da Companhia Kaiser Aluminium Company na região do Baixo Amazonas e pela Rio Tinto Zinc Company em Paragominas, sendo estes os mais relevantes registros regionais da época sobre as lateritas aluminosas de Paragominas e foram divulgados por Towse & Vinson (1959) como citado por Costa (1991) e Kotschoubey *et al.* (2005).

Segundo Kotschoubey *et al.* (2005) o distrito de Paragominas é evidenciado por um relevo de tabuleiros e platôs dissecados e isolados, com cobertura de argilas amarelas (Argila de Belterra) e crostas ferroaluminosas. A formação destes depósitos foi originada pela alteração laterítica de depósitos siliciclásticos do Cretáceo, no caso, sedimentos do Grupo Itapecuru e da Formação Ipixuna, durante o Paleogéno.

Os platôs são geralmente constituídos por rochas sedimentares do Terciário, que cobrem a maior parte da bacia amazônica, que se estendem para norte e para sul da região de Paragominas, apresentam diferenças de nível do topo dos platôs ao leito da drenagem principal, como interpretado por Assad (1978).

O horizonte bauxítico está inserido abaixo de um pacote argiloso essencialmente caulínico de até 20m de espessura (Argila de Belterra) e possui contato brusco entre eles (Kotschoubey, *et al.* 2005). Este manto argiloso caulínico constitui o capeamento dos platôs da região de Paragominas.



O horizonte argiloso que recobre o perfil bauxítico, denominado de “Argila de Belterra”, foi identificado primeiramente no município homônimo da região do Baixo Amazonas próximo a Santarém-PA. As formações lateríticas residuais na Amazônia foram identificadas e classificadas em várias categorias por Sombroek (1966), sem observar a ocorrência de bauxita.

O manto laterítico/bauxítico de estrutura “acamadada” é devido à alternância de horizontes ricos em Al e Fe e o zoneamento regional. Evoluíram controlados por variações climáticas no tempo e no espaço, além de fatores geomorfológicos, geotectônicos e sedimentológicos (Kotschoubey, *et al.* 2005).

Após o dismantelamento parcial do manto residual, um novo período de intenso intemperismo permitiu a formação de uma cobertura bauxítica superimposta a vestígios da primeira (Kotschoubey, *et al.* 2005). Segundo os autores, o manto residual mais recente foi formado no Mioceno Superior sobre os sedimentos areno-argilosos cronocorrelatos com as formações Pirabas e Barreiras do Mioceno Inferior e Médio.

Este manto residual mais recente é preferencialmente Al-ferruginoso e o processo de bauxitização ocorreu em ciclos distintos, sendo o primeiro ciclo restringindo a períodos do Paleogeno até o início do Oligoceno e o segundo ciclo no final do Oligoceno - início do Mioceno (Kotschoubey, *et al.* 2005).

Devido à existência de níveis gibbsíticos separados por um nível oxi-hidróxido de ferro, a evolução do manto bauxítico residual não seria considerada resultante de um processo monofásico, pois teria sido mais complexa do que a ideia destas bauxitas formadas em rochas siliciclásticas da Bacia do Amazônas, como apresentado por Dennen & Norton (1977).

Segundo Góes (1981) o manto ferro-aluminoso foi formado a partir de sedimentos siliciclásticos das formações Itapecuru e Ipixuna do Cretáceo Superior e que a gibssitização se intensifica na Província Bauxitífera de Paragominas de sul para norte como citado por Kotschoubey & Truckenbrodt (1981).

A cobertura laterítica/bauxítica além de toda a evolução controlada por fenômenos primeiramente químicos e posteriormente físicos, devido a influencia do intemperismo ocasionado pelo clima local da época de sua formação, teria também influencia relevante do fator biológico como ação de raízes, o acúmulo e transformação da matéria orgânica, ação de

cupins, etc., como citado por Kotschoubey & Truckenbrodt (1981) e Kotschoubey, *et al.* (1989, 1997).

Em uma extensão de 300 km na direção sul-norte, Kotschoubey, *et al.* (1987) propuseram sete zonas regionais, cada uma apresentando fácies distintas da cobertura laterítica/bauxítica, onde a zona meridional comporta uma espessa crosta ferruginosa e nas zonas setentrionais cede espaço a bauxita, sendo sua expressão máxima no entorno de Paragominas. A norte o manto laterítico/bauxítico sofre drástica mudança de facies.

O zoneamento faciológico regional reflete o zoneamento climático, marcado pelo encurtamento dessas zonas, onde pode ser atualmente percebidos em varias regiões intertropicais e na África Ocidental (Kotschoubey, *et al.* 1989, 1997). Na porção meridional da região de Paragominas (fácies I) não teria condições propícias para bauxitização, enquanto que nas porções setentrionais o clima permitiu o desenvolvimento do manto bauxítico, crescente em intensidade de sul para o norte, segundo os autores.

Na porção setentrional desta província onde se localiza o platô Miltonia-3, a cobertura bauxítica/laterítica do Paleogeno e os depósitos argilo-arenosos tardios sofreram ferralitização e lixiviação *in situ* da sílica alterando a matriz argilo-arenosa para laterita aluminosa rica em caulinita e oxi-hidróxidos de Fe, nem sempre correspondendo ao conceito de bauxita (Kotschoubey, *et al.* 1989, 1997). Esta cobertura bauxítica/laterítica sofreu forte degradação regional com intensa erosão e dissecação durante o Neógeno e o Quaternário. Os resquícios da sequencia laterítica-sedimentar do Cenozóico é que sustentam os platôs dominantes na região.

Uma divisão em quatro zonas da província bauxitífera de Paragominas, com base no grau de bauxitização da cobertura laterítica e no progressivo enriquecimento em Al de sul para norte, foi proposto por Kotschoubey, *et al.* (1997). Segundo esses autores, a evolução teria sido polifásica, envolvendo retrabalhamento físico, remobilização e redistribuição de elementos em solução. Primeiro teria havido acumulação de depósitos psolíticos resultantes do desmantelamento da crosta laterítica pretélica, e logo abaixo desses depósitos a formação de crosta ferruginosa a partir de sedimentos siliciclásticos. E por fim, os depósitos psolíticos superficiais foram afetados por bauxitização de intensidade variável.

O perfil laterítico que comporta os depósitos de bauxita do distrito de Paragominas foi definido por Kotschoubey, *et al.* (1997), sendo composto por horizontes litológicos distintos:

formado pelo saprólito espesso, crosta ferruginosa, horizonte bauxítico nodular a maciço, bauxita nodular passando a um pseudopisólito ferruginoso, e no topo pela argila de Belterra (Figura 1.1).

Quanto ao período de formação, segundo Truckenbrodt *et al.* (1982) estas bauxitas foram formadas no Terciário Inferior, no mesmo período da formação das bauxitas da Guiana e Suriname como apresentado por Krook (1979) e não no Terciário Superior ou Quaternário como proposto anteriormente por Wolf & Silva (1973), Assad (1973 e 1978), Dennen & Norton (1977), Grubb (1979) e Aleva (1981).

Os primeiros a interpretarem às sequências bauxíticas das regiões de Rio Trombetas e Paragominas como formações residuais geradas *in situ* a partir de sedimentos da Formação Barreiras do Terciário Superior foram Wolf (1972) e Wolf & Silva (1973).

Grubb (1979) foi quem apresentou a ideia de um modelo genético polifásico para as bauxitas da Bacia Amazônica e da planície costeira das Guianas, devido o Al proveniente da dissolução da caulinita e dos processos físicos, além da migração de Fe. Ocorreram em dois períodos de gibbsitização, separados no tempo e por uma fase de deposição de material arenoso que sofreu ferruginização em ambiente podzólico. Este mesmo modelo foi novamente proposto por Kronberg *et al.* (1979, 1982), envolvendo transporte lateral de alumina e sua acumulação abaixo de espesso pacote argiloso sob a forma de bauxita.

O modelo poligenético das formações bauxíticas de Paragominas e Açailândia foi proposto por Kotschoubey & Truckenbrodt (1981), sendo distribuído em cinco fases distintas: 1) laterização inicial do saprólito; 2) formação da crosta ferro-aluminosa e seu retrabalhamento parcial; 3) primeira e principal fase de gibsitização da crosta: formação do horizonte bauxítico inferior; 4) segunda fase de retrabalhamento da crosta e formação do cascalho ferruginoso do topo do perfil; e 5) segunda fase de gibsitização e bauxitização da parte superior da crosta.

Dennen & Norton (1977) e Kronberg *et al.* (1979 e 1982), constataram enriquecimento em V, P, Ga, Mn nas lateritas e um empobrecimento de Pb, Sr e Ba no saprólito, e concluem que eles estão associados com óxidos de ferro e caulinita e não com a gibbsita.

Estas bauxitas e lateritas são resultados de processos endógenos, devido ao intemperismo atuante em uma grande variedade de rochas sedimentares, metamórficas e

ígneas, sendo expostas a um clima tropical e húmido da região amazônica (Bocquier *et al.*, 1984).

A parte inferior da crosta ferruginosa e o topo do saprólito foram bauxitizados pelo rebaixamento do nível da base, sendo o mecanismo da aluminização relevante no processo, e finalizando com a deposição dos sedimentos argilo-arenosos, que sofreram alterações pedogenéticas para latossolo, conhecidas regionalmente como “Argila de Belterra” (Truckenbrodt *et al.* 1995).

Uma evolução em três fases para as bauxitas da região do Baixo Amazonas, foi apresentado por Lucas (1989, 1997) e Lucas *et al.* (1989), distinguindo uma ferruginização inicial de sedimentos siliciclásticos; uma fase de bauxitização intermediária da couraça resultante; e por final, uma fase atual de um novo perfil às custas do perfil antigo, marcada pela ressilicificação por cima e por baixo do perfil original, levando a individualização do capeamento argiloso.

Os eventos de bauxitização de rochas parentais, provenientes de processos distintos, conduziram a formação de horizontes aluminosos chamados de “bauxitas originais”, enquanto que “bauxitas degradadas” seriam formadas pela exposição destas, sofrendo nova transformação estrutural, mineralógica e química, foram citados primeiramente por Millot (1964), nos estudos das lateritas Terciárias da Europa Ocidental.

Segundo Boulangé & Carvalho (1989, 1997) e Bardossy & Aleva (1989) o perfil laterítico evolui *in situ* por meio da redistribuição de Fe e Al pelas águas percolantes, sem aporte lateral desses elementos, de forma vertical e progressiva, individualizando composicionalmente e estruturalmente os níveis bauxíticos, sendo o capeamento argiloso mais um produto desta diferenciação.

As bauxitas são originadas pelo intemperismo de rochas parentais e sua degradação ocorre de acordo com sua composição química e mineralógica, sob condições climáticas e associadas a um sistema de drenagem favorável a remoção total dos elementos álcalis, enquanto que o Si é parcialmente ou totalmente lixiviado (Boulangé *et al.* 1997). Primeiro a gibsitita é formada pelo Al remanescente e por ultimo o Si residual combina com o Al formando caulinita, segundo o autor.

O intenso ambiente ácido e húmico oriundos das atividades de raízes, ocasionando a alta mobilidade do Fe e baixa mobilidade do Al livre, formam goethita a partir da hidratação da hematita e concentram  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em nódulos (Costa *et al.* 2014). Segundo os autores a presença de grãos de quartzo límpidos e quebradiços nesta zona, indicam ambiente ácido que envolveu ferrólise e para as ocorrências bauxíticas da região de Paragominas esta ferrólise ocasionou a modificação pedogenética do perfil laterítico anterior, onde a dissolução da hematita ocorreu antes do estabelecimento da cobertura laterítica.

A cobertura argilosa formada por nódulos de bauxita e argila amarela possui composição mineralógica distinta, considerando os principais minerais (caulinita e Al-goetita) além de alta  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , que devido a atividade de raízes permitiu a formação destes minerais em depressões topográficas durante o ambiente semiárido (Costa *et al.* 2014). Segundo os autores, os nódulos bauxíticos podem representar um evento incompleto de formação de bauxita da cobertura laterítica durante o Mioceno.

Os depósitos brasileiros de bauxita, segundo Kotschoubey (1988) são 97% formados a partir de rochas sedimentares e os 3% restantes incluem depósitos desenvolvidos a partir de rochas cristalinas do Pré-cambriano. Observa-se que a região amazônica apresenta um ambiente natural para a ocorrência de bauxita, devido a grande exposição de rochas sedimentares distintas associadas à bacia amazônica, pelas condições morfológicas (ocorrências de platôs) e o ambiente de clima quente e úmido, de temperaturas elevadas e de grande índice pluviométrico.

## 2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Distrito Bauxitífero de Paragominas (DBP) foi definido por Kotschoubey *et al.* (2005). Está localizado na porção meridional nos sedimentos do Grupo Itapecuru do Cretáceo (Góes 1995, Rossetti & Truckenbrodt 1999, Anaisse *et al.* 2001, *apud in* Kotschoubey *et al.* 2005) e em sua porção norte nos sedimentos da Formação Ipixuna do Cretáceo Superior (Santos Jr. & Rossetti 2002, *apud in* Kotschoubey *et al.* 2005), pertencentes a Bacia do Grajaú (Rossetti, 2001), como observado na Figura 2.1.

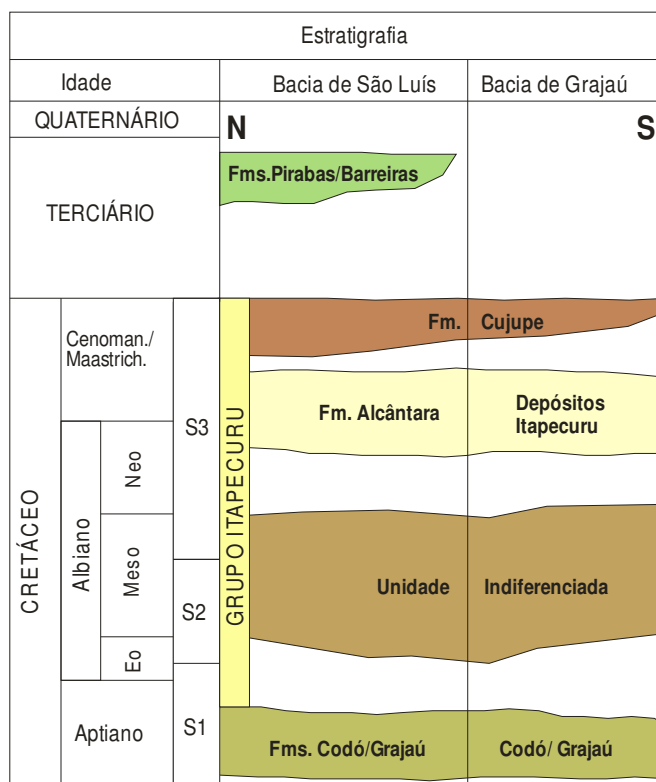


Figura 2.1 – Estratigrafia do Grupo Itapecuru.  
Fonte: Adaptado de Góes e Coimbra (1996).

### 2.2.1 Grupo Itapecuru

A Formação Itapecuru passou a ser denominada de Grupo Itapecuru para os arenitos cinza esbranquiçados, esverdeados ou vermelhos-castanhos, podendo haver intercalações destes (Rossetti & Truckenbrodt, 1997).

As litologias predominantes são arenitos em camadas métricas ou em corpos lenticulares e camadas de pelitos (folhelhos). Seu ambiente deposicional está relacionado a

deltas de marés e tempestades. São encontradas nestas rochas deformações sinsedimentares relacionadas a sismos (Rossetti, 2001).

### **2.2.2 Formação Ipixuna**

Essa formação ocorre predominantemente a leste do estado do Pará e é considerada como uma fácies da Formação Itapecuru (Petri & Fúlfaro, 1983). Datada no Eoceno é associada à sucessão de argilas brancas, caulínicas e arenitos finos a grossos, com espessura média de 50 metros (Figura 2.2).

Os depósitos caulínicos da Formação Ipixuna na região do Rio Capim, possuem grande importância econômica devido a sua excepcional qualidade, sendo composto por argilitos, arenitos fino a médio, moderadamente selecionados e essencialmente caulínicos (caulim *soft*), provindos de ambiente deposicional típico de complexo fluvial na base e gradando verticalmente para complexo estuarino no topo de acordo com Kotschoubey, *et al.* (1996), Santos Jr. & Rossetti (2003) e Rossetti (2004).

Segundo Nascimento & Góes (2005) a ação de forte intemperismo químico nos sedimentos da Formação Ipixuna formaram os depósitos de caulim *soft* e *semi-flint*, os arenitos arcoseanos que deram origem ao caulim são oriundos da porção oeste/sudoeste da Faixa Araguaia e parte de seu embasamento cristalino, formado principalmente por rochas metamórficas além de contribuições graníticas. A presença de estauroлита, cianita, micas (biotita e muscovita) e fragmentos líticos neste depósito caulínico são associados a rochas metamórficas pertencentes ao Supergrupo Baixo Araguaia.

Segundo Kotschoubey, *et al.* (2005), estes depósitos caulínicos da Formação Ipixuna, sustentam o espesso manto laterítico/ferruginoso, predominantemente aluminoso da Província Bauxitífera de Paragominas.

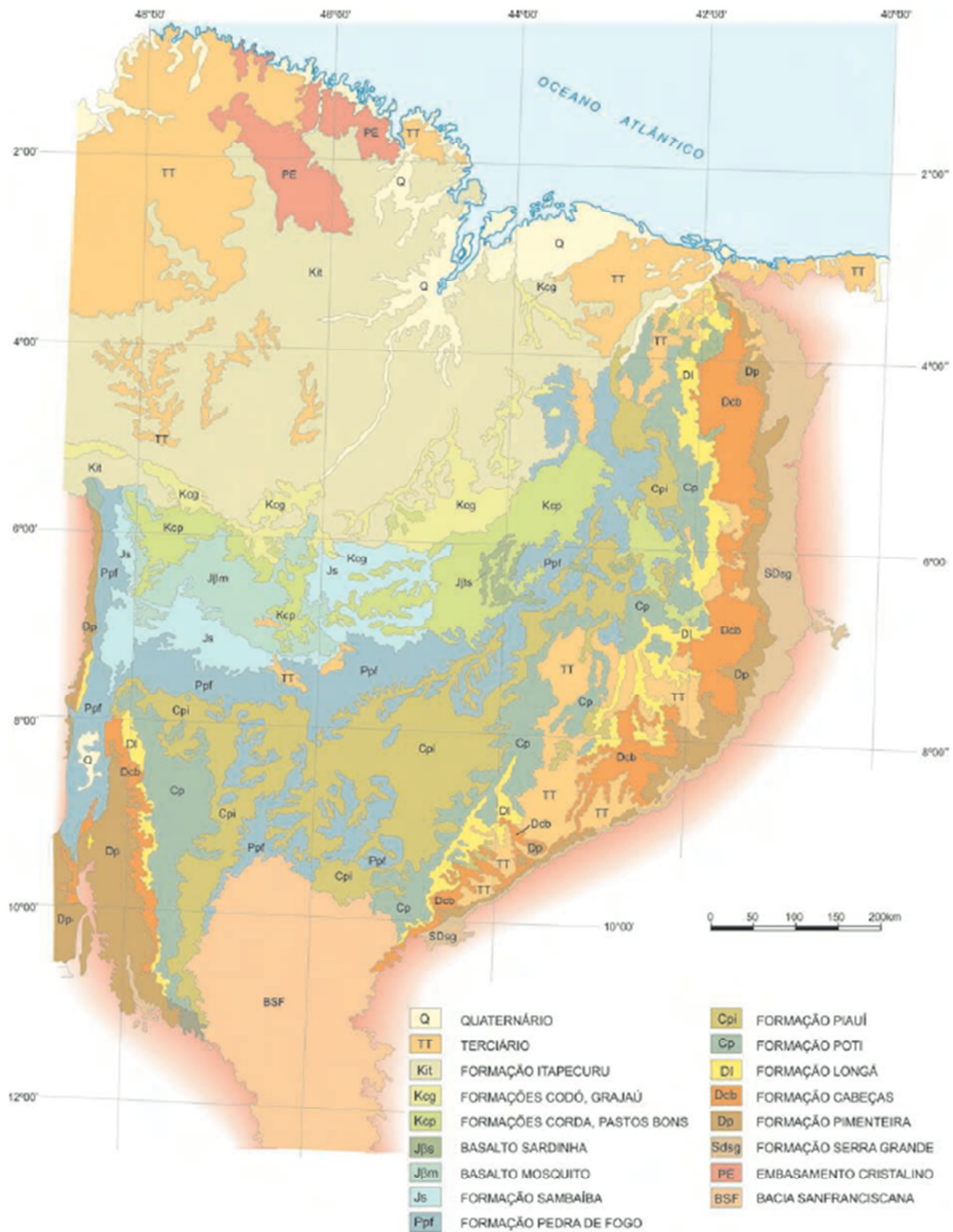


Figura 2.2 – Mapa geológico das bacias do Parnaíba e São Luiz-Grajaú, com a localização da Formação Itapecuru / Ipixuna (Kit).  
Fonte: Santos & Carvalho, 2009.



## 2.3 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

A Província Bauxitífera de Paragominas compreende a sul da cidade homônima, os depósitos Miltônia, Vera Cruz, Tiracambu e Camoá e ao norte os depósitos Jabuti e Futuro (Figura 2.4). Possui área de aproximadamente 50.000 Km<sup>2</sup>, suas dimensões são de cerca de 300 Km de extensão norte-sul por até 200 Km na direção leste-oeste (Figura 2.3 e 2.4). Está localizada nas porções leste do Estado do Pará e oeste do Estado do Maranhão (Kotschoubey *et al.* 2005).

Suas reservas de minério são de aproximadamente 2.000 Mt, que corresponde a cerca de 60% das reservas brasileiras de bauxita (Kotschoubey, *et al.*, 1997).

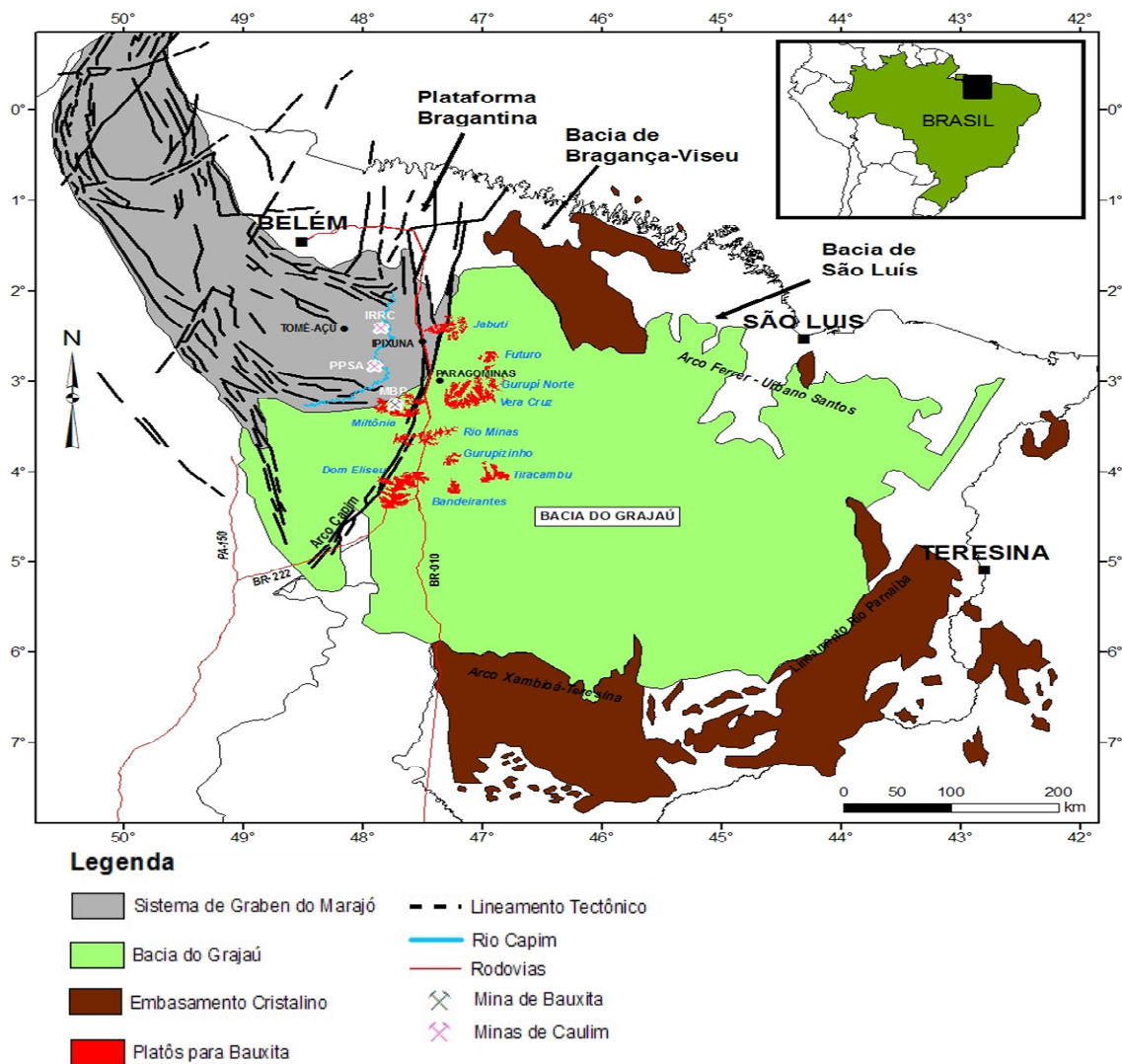


Figura 2.3 – Mapa geológico com o domínio da Bacia do Grajaú com os principais platôs de ocorrências de bauxita.

Fonte: Adaptado de Góes e Coimbra (1996).

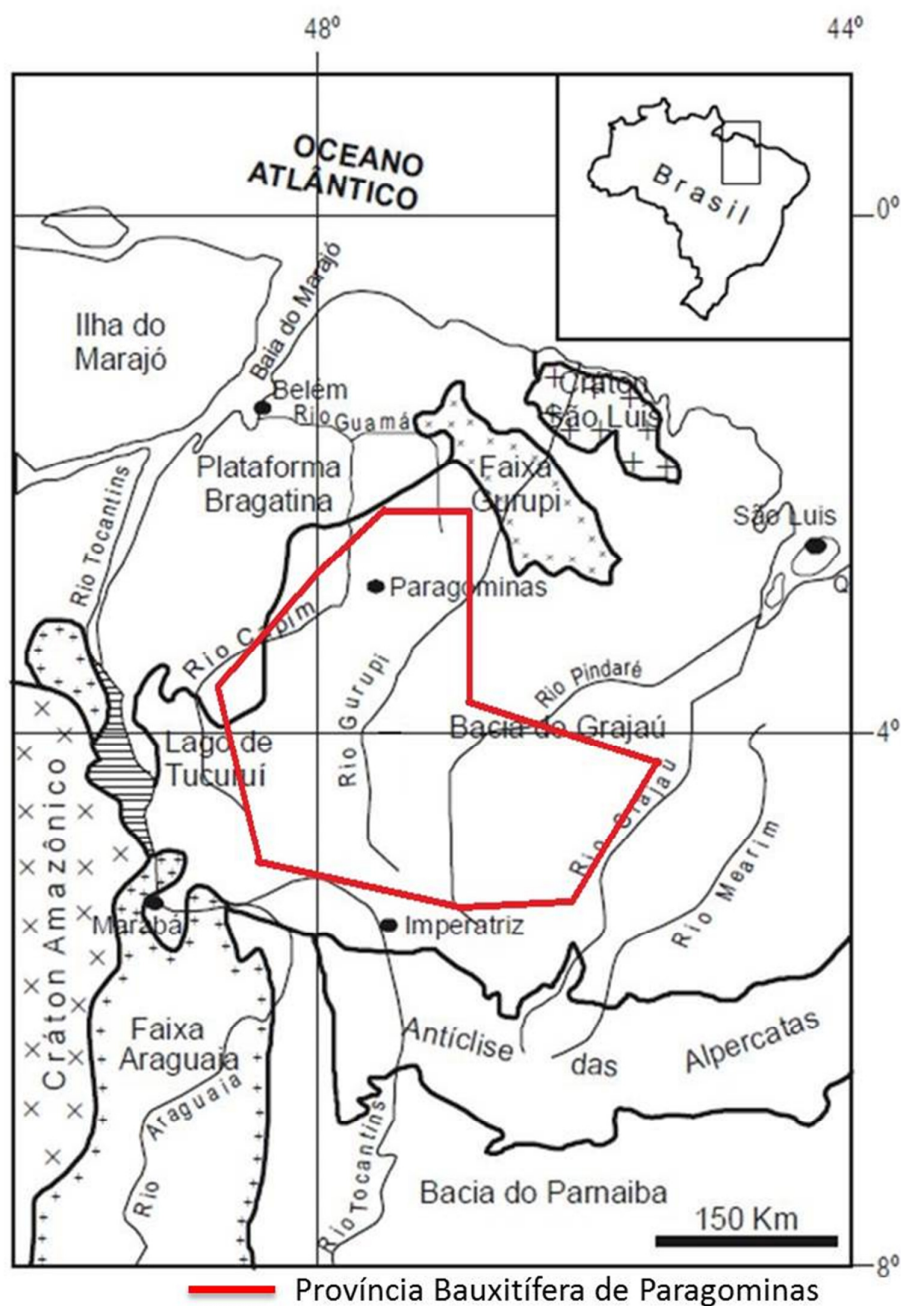


Figura 2.4 – Mapa com a extensão da Província Bauxítica de Paragominas.  
 Fonte: Adaptado de Kotschoubey *et al.* (2005).

O perfil bauxítico típico do platô Miltônia-3 é constituído por um perfil bauxítico maduro (Costa, 1991), sendo descrito pelos geólogos da então CVRD em 2002 da base para o topo como horizontes: Argila Variiegada (ARV); Bauxita “Amorfa” (BA); Bauxita Cristalizada com Bauxita “Amorfa” (BCBA); Bauxita Cristalizada (BC); Laterita Ferruginosa

(LF); Bauxita Nodular Cristalizada (BNC), Bauxita Nodular (BN) e Capeamento Argiloso (CAP).

O termo “bauxita amorfa” é utilizado para identificar os nódulos de bauxita de feições porcelanadas microcristalizadas de coloração branca a amarelo claro. É um termo descritivo genérico utilizado em campo para diferenciar dos cristais de gibbsita visível a “olho nu” de maior tamanho, utilizado primeiramente pela CVRD e permanecendo até os dias atuais na Hydro Paragominas S.A.

A Bauxita Nodular é equivalente ao Horizonte Cascalho Superior e a Bauxita Concrecionária ao Horizonte Bauxítico Superior, definidos por Kotschoubey *et al.* (1997).

O horizonte de Bauxita Nodular no platô Miltônia-3 é contínuo em toda a sua extensão, porém o horizonte de Bauxita Nodular Cristalizada ou Bauxita Nodular Concrecionária, terminologia usada neste trabalho, ocorre em zonas centrais do platô com maiores expressões em espessura, chegando a 2,5 metros, mas ausente nas bordas dos platôs (Figura 2.5).

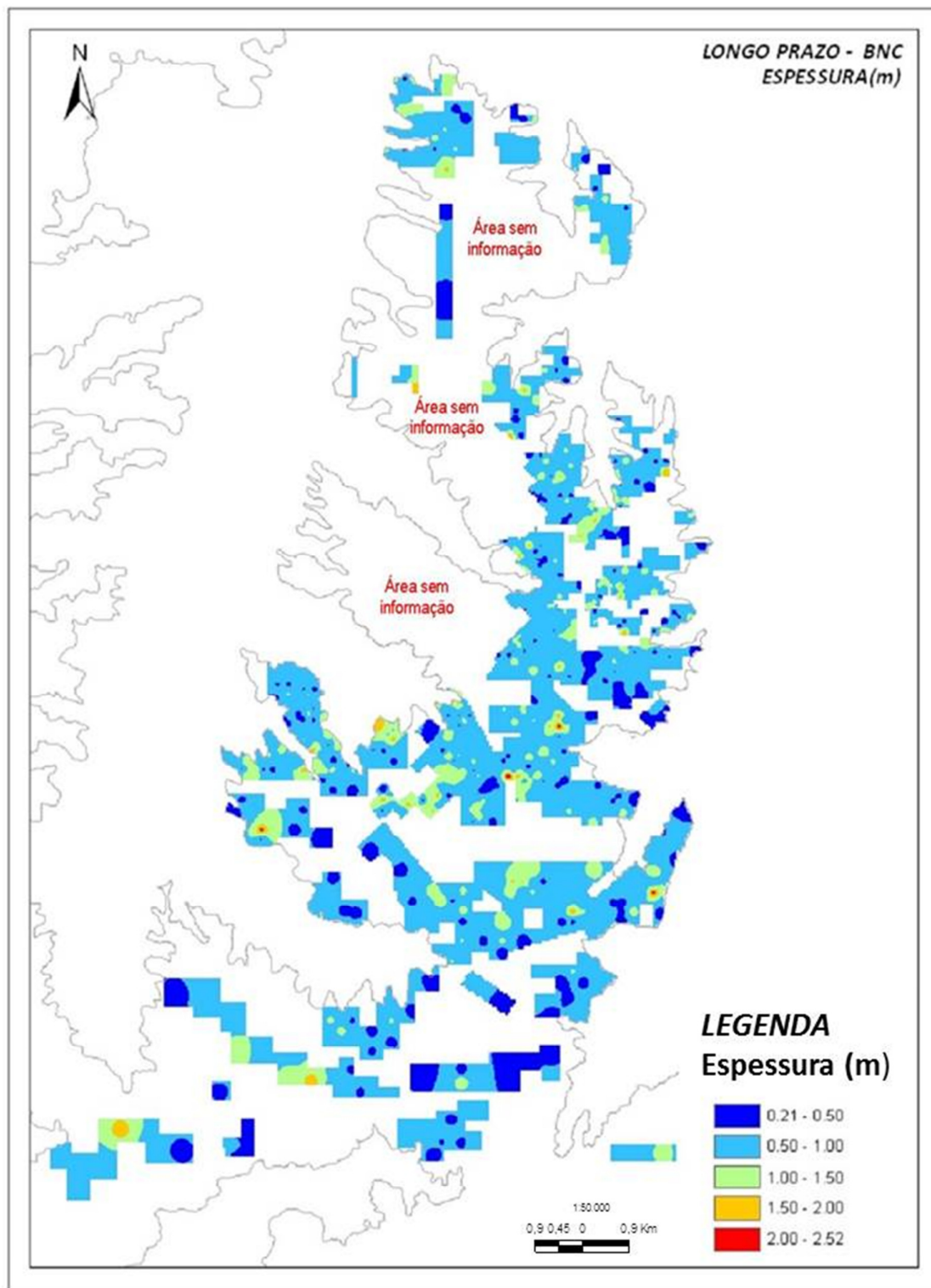


Figura 2.5 - Mapa de distribuição areal e respectiva espessura de Bauxita Nodular Concrecionária no platô Miltônia-3 e adjacências.  
Fonte: Hydro Paragominas (2014).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 TRABALHO DE CAMPO E AMOSTRAGEM

A etapa de campo e coleta de amostras foi realizada como parte de uma rotina de trabalho em que o autor trabalhava na empresa Hydro Paragominas SA, em constantes idas a mina para acompanhamento de amostragens de canaletas, sondagens e visitas de rotina com a equipe do controle de qualidade da mina e do controle do minério exposto para a lavra (Figura 3.1).

As doze amostras de “mão” de Bauxita Nodular e Laterita Ferruginosa coletadas na mina para caracterização mineralógica e confecções de lâminas petrográficas são oriundas da porção centro-leste da Mina-4, conforme mapa de amostragem (Figura 3.2), buscando uma representatividade diversificada de ocorrências desta litologia no mesmo horizonte, além de possíveis relações mineralógicas, texturais e composicional.

Estas amostras foram acondicionadas em sacos de prolipopileno, identificadas e encaminhadas para a laminação, cominuição, análises petrográficas, DRX, e MEV.



Figura 3.1 – Foto da frente de lavra da Mina-4 com exposição de um horizonte espesso de Bauxita Nodular Concrecionária delimitada pela linha tracejada em amarelo.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado também 864 análises de 107 furos de sondagem realizados na Mina-4 em 2014 no platô Miltônia-3, conforme apresentado no mapa de localização. Esta base de dados foi disponibilizada pela empresa Hydro Paragominas (Figura 3.2).

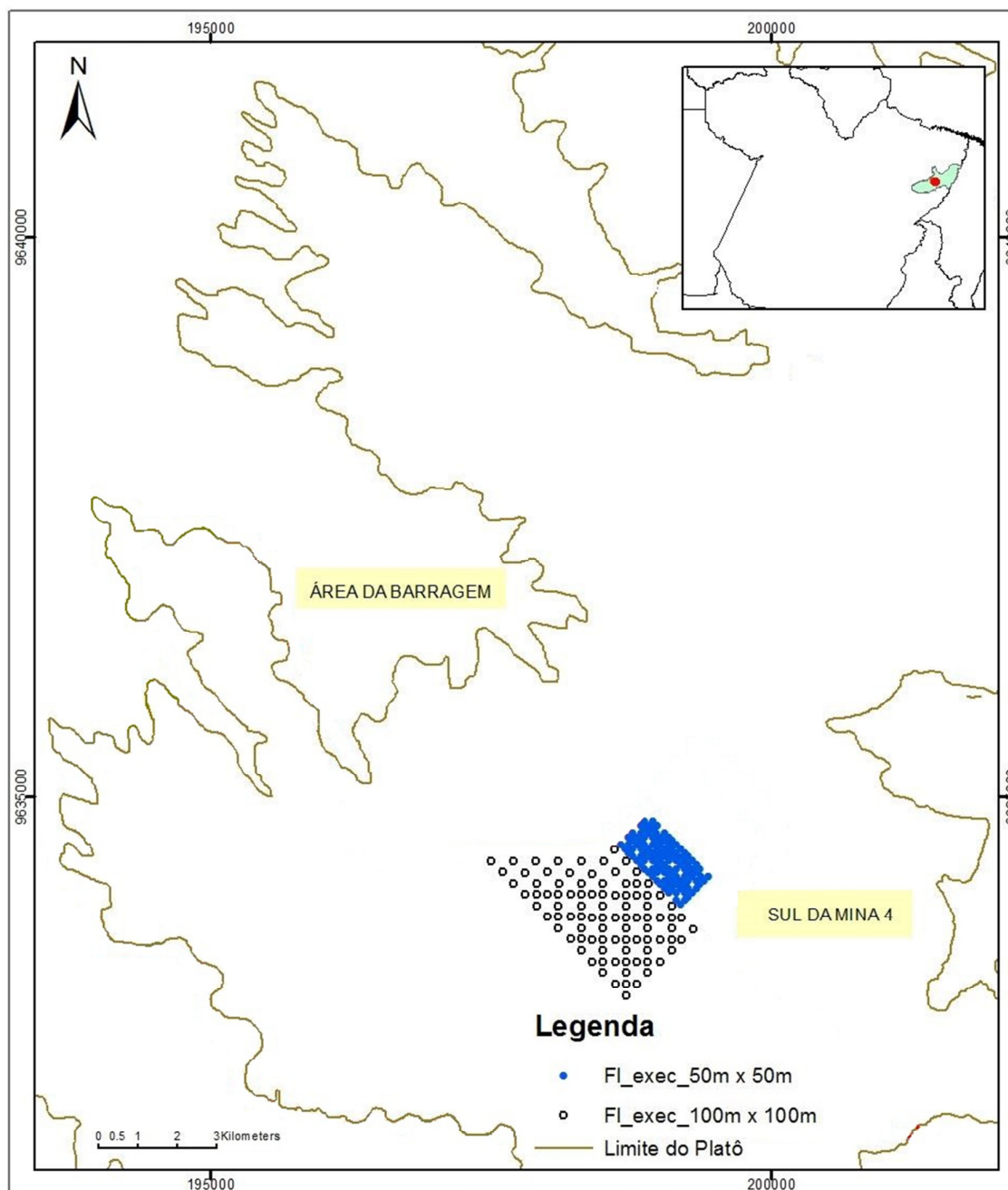


Figura 3.2 – Mapa de localização dos furos de sondagem executados em 2014 na Mina-4 do platô Miltônia-3 em Paragominas – PA.  
Fonte: Hydro Paragominas (2014).

As terminologias apresentadas neste trabalho serão atualizadas com o intuito de melhorar a caracterização para os níveis litológicos, onde CAP é capeamento argiloso, BN é bauxita nodular, BNC é bauxita nodular concrecionária, LF é laterita ferruginosa, BC é bauxita concrecionária, BCBA é bauxita concrecionária com bauxita argilosa, BA é bauxita argilosa e ARV é argila variegada.

## 3.2 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS

### 3.2.1 Preparação das Amostras

Nas amostras de Bauxita Nodulares coletadas o excesso de argila foi eliminado com um enxague superficial e secas naturalmente ao ar livre, sob o sol, descritas, fotografadas, cominuídas e separado uma fração representativa de cada amostra. A pulverização foi feita manualmente em grau de ágata com frações de amostras menores que 0.105mm, para os métodos do pó total.

Uma fração centimétrica representativa foi separada de cada amostra e encaminhada para a confecção de lâminas com seções polidas (sem lamínula) para os estudos petrográficos e análises de MEV.

Os dados químicos apresentados neste trabalho são da base dos modelos de blocos e geológico, gerados a partir da validação dos dados geoquímicos da sondagem realizada em 2014 e utilizados nos banco de dados (BD) na mina pela empresa. A preparação química e o tratamento de seus dados analíticos estão descritas mais à frente.

As amostras provenientes da sondagem passam por um processo de lavagem prévia para retirada da fração argila do material *in situ* inferior a #200 mesh, posteriormente seco em estufa para perda da umidade a 100°C, quarteados, cominuídos e pulverizados em uma sequência de moinhos até a granulometria de #150 mesh.

### 3.2.2 Petrografia

Para esta etapa foram confeccionadas 15 lâminas sem lamínula no Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências da UFPA, sendo destas 9 de Bauxitas Nodulares e 6

de Lateritas Ferruginosas. As amostras friáveis foram impregnadas com resina epoxilica BR-837 e endurecedor GY-951 deixando o material coeso necessário para a confecção das lâminas.

As amostras foram descritas em suas respectivas lâminas ao microscópio óptico da marca Zeiss, com uma câmera digital da marca Leica acoplada, utilizando luz transmitida e refletida, com o intuito de identificar e registrar sua composição mineralógica, feições texturais e estruturais, além de suas relações de contato entre as fases minerais presentes.

### 3.2.3 Análise por Difratoimetria de Raios-X (DRX)

As análises de Difratoimetria de Raios-X foram realizadas no Laboratório de Caracterização Mineral (LCM) do Instituto de Geociências da UFPA.

A caracterização mineralógica foi realizada a partir do pó em rocha total das amostras pulverizadas em grau de ágata até a granulometria de #120 a #150 mesh. Para esta etapa foi realizada a técnica da micropreparação de amostras, onde se separa manualmente um ponto escolhido da amostra, para obter uma melhor representação mineral.

Foi utilizada a técnica do *back-loading*, onde se pulveriza inicialmente uma alíquota de 5 gramas de amostra no gral de ágata, posteriormente são prensadas nos porta amostras de Si sem orientação preferencial e armazenadas em magazine para realização das análises.

Para a técnica da micropreparação é utilizado um mini drill (modelo Dremel 3000 EZ) que consiste no uso de pequenas quantidades de amostras, sem prensagem e configurações da análise convencional ao método do pó total.

Empregou-se o difratômetro modelo X'Pert Pro MPD (PW 3040/60) da PANalytical, goniômetro PW 3050/60 (teta/teta) e tubo de Raios-X de ânodo cerâmico de Cu ( $K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$ ), modelo PW 3373/00, foco fino longo, filtro  $K\beta$  de Ni, detector X'Celerator RTMS (Real Time Multiple Scanning) no modo *scanning* e com *activelenght*  $2,122^\circ$ , passo angular  $0,033^\circ$ .

Os difratogramas das distintas fases minerais presentes nas amostras, foram interpretados com o auxílio do *Software X'Pert HighScore Plus 3.0*, comparando os padrões do



banco de dados *Power Diffraction File* (PDF) fornecido pelo *International Center for Diffraction Data* (ICCD), (2003).

Com base na comparação entre as intensidades das reflexões distintas de cada fase mineral nos difratogramas é possível estimar, relativamente, a abundância dos minerais constituintes maiores, menores e traços, se existentes na amostra.

#### **3.2.4 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (Energy Dispersive Spectroscopy – EDS)**

Utilizou-se da Microscopia Eletrônica de Varredura para caracterizar as transformações minerais ocorridas diretamente nas amostras, marcado pela mudança composicional devido à alteração de material gipsítico para caulínico e vice-versa, sendo possível a observação devido à análise da superfície das amostras através de imagens tridimensionais de alta resolução de até 30Å e maior profundidade de foco da ordem de 300 vezes melhor que a do microscópio ótico.

As imagens foram processadas no microscópio eletrônico modelo LEO-1430 do Laboratório de Microanálises - LABMEV – do Instituto de Geociências da UFPA. As amostras (Laminas) foram metalizadas com ouro e o tempo de recobrimento foi de 1,5 minutos. As condições de operação para imageamento em elétrons retroespalhados foram: corrente do feixe de elétrons 90  $\mu$ A, voltagem de aceleração constante 20 kv, distância de trabalho 15 mm; com EDS Sirius-Gresham acoplado. As condições para as análises de EDS (energydispersivespectroscopy) foram: corrente do feixe de elétrons 90  $\mu$ A, voltagem de aceleração constante 20 kv, distância de trabalho 15 mm. Tempo de contagem para análise dos elementos foram de 30 s.

As análises por EDS auxiliaram na identificação das fases minerais presentes nas amostras de bauxita nodulares e de laterita ferruginosa.

#### **3.2.5 Análises Químicas**

Para o desenvolvimento deste estudo foram disponibilizadas pela empresa Hydro Paragominas SA. as análises químicas de 864 amostras lavadas de bauxita provenientes de

107 furos de sondagem da campanha de 2014, sendo realizadas em seu laboratório no *site* da Mina de Miltônia-3 seguindo os procedimentos padrões de controle de minério e estéril.

A determinação dos óxidos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{TiO}_2$  foi realizada no laboratório da empresa Hydro Paragominas S.A. por Espectrometria de Massa com Fonte de Plasma (*Inductively-Coupled Plasma Spectroscopy* - ICP-MS), após digestão ácida e perda por calcinação (PPC) por gravimetria.

A determinação de sílica reativa (Sire) e alumina aproveitável (Alap), utilizada para o controle do fator de corte de minério/estéril de bauxita na mina de Miltônia-3, foi realizada através de digestão alcalina (via úmida) pelo método ALCAN.

Abaixo, segue um resumo do procedimento de preparação da amostra (digestão ácida) para leitura no espectrômetro ICP-MS:

- Secar a amostra em estufa a  $100 \pm 10^\circ\text{C}$  por um período não inferior a 1 hora. Retirar a amostra da estufa e esfriar em dessecador;
- Pesar 0,10g da amostra e transferir para um cadinho de platina;
- Adicionar 0,4g de  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  e 0,8g de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ao cadinho de platina;
- Homogeneizar a amostra e fundentes com auxílio de uma espátula;
- Iniciar fusão em bico de Bunsen;
- Transferir o cadinho para mufla a  $1.000 \pm 10^\circ\text{C}$ ;
- Fundir por um período entre 10 e 15 minutos;
- Retirar o cadinho da mufla;
- Distribuir a massa fundida nas laterais do cadinho com movimentos circulares e deixar esfriar até temperatura ambiente;
- Lavar o cadinho externamente com HCl 25% quente e transferi-lo para um béquer.
- Colocar uma barra magnética dentro do cadinho;
- Adicionar 80ml de HCl 25% quente dentro do cadinho;
- Colocar um bastão de vidro no béquer e tampá-lo com “vidro de relógio”;

- Transferir o béquer para uma chapa de aquecimento a  $110 \pm 10^{\circ}\text{C}$ , até a completa dissolução da massa fundida;
- Inclinarm o conjunto, “vidro de relógio”, béquer, cadinho de platina e bastão de vidro de forma que ocorra a mistura da solução ácida de dentro do cadinho com a solução ácida do béquer;
- Retirar o béquer da chapa;
- Retirar o vidro de relógio lavando-o com água deionizada morna;
- Verter a solução ácida mais o cadinho com o auxílio de um bastão de vidro para um conjunto de funil mais balão volumétrico de 200ml;
- Lavar o béquer, o bastão de vidro e o cadinho com água deionizada morna;
- Agitar o balão e esfriar em água corrente;
- Transferir o balão para uma sala climatizada, completar o volume com água deionizada e homogeneizar;
- Análise via ICP-MS.

### 3.3 ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Este procedimento é parte de um processo maior de *Quality Assurance and Quality Control* (QAQC), para validar o banco de dados dos modelos geológicos e de blocos utilizados na cubagem do minério de bauxita e posterior dimensionamento da lavra na mina. Neste trabalho este processo é apresentado para reforçar a qualidade das análises químicas disponibilizadas pela empresa Hydro Paragominas S.A.

#### 3.3.1 Verificações de Inconsistência Lógica

A verificação de consistência lógica da tabela dos dados químicos das amostras analisadas foi conduzida em 100% do total das análises da base de dados cedida.

A verificação de consistência lógica dos dados envolveu:

- A presença de registos vazios;
- A presença de registos incompatíveis com a natureza do campo;

### 3.3.2 Definição dos testes e limites

- Soma dos óxidos + PF (fechamento) limite: 0,96 – 1,02  

$$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{PF}$$
- Razão  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Aproveitada/  $\text{Al}_2\text{O}_3$ Total (Alap/AT) limite: 0,40 – 0,99
- Razão  $\text{SiO}_2$  Reativa/  $\text{SiO}_2$ Total (Sire/ST) limite: 0,50 – 0,99
- Razão  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Aproveitada/ Perda ao Fogo (Alap/PF) limite: 0,70 – 2,00
- Razão  $\text{Al}_2\text{O}_3$ Total/ Perda ao Fogo (AT/PF) limite: 1,60 – 2,30

### 3.3.3 Estatística Descritiva

A distribuição litológica das 864 amostras da campanha de sondagem de 2014 da empresa Hydro Paragominas S.A., sendo a BC a que mais ocorreu com 207 amostras e a LF com 102 amostras a que menos ocorreu, representando 23,96% e 11,81% respectivamente (Figura 3.3).

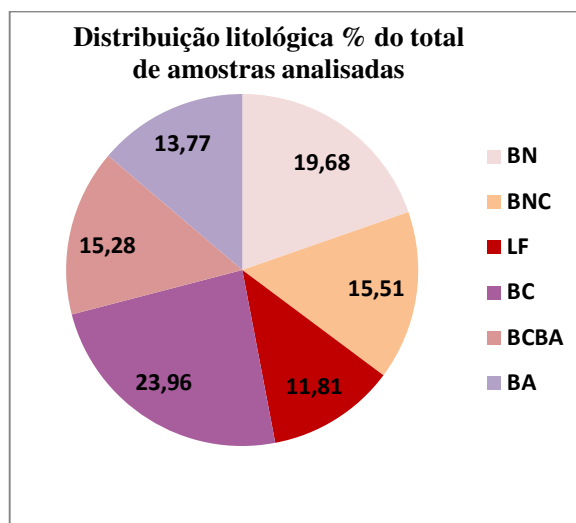


Figura 3.3 – Gráfico com o percentual das amostras analisadas por litologias.

Para o tratamento geoestatístico foram excluídas 62 amostras, ou seja, 7,18% referentes a 40 amostras cujos resultados poderiam interferir como um viés negativo ou positivo na interpretação dos dados, mesmo sendo estas amostras referentes às litologias analisadas e 22 amostras que ficaram fora dos limites de controle aplicados, conforme Figura 3.4.

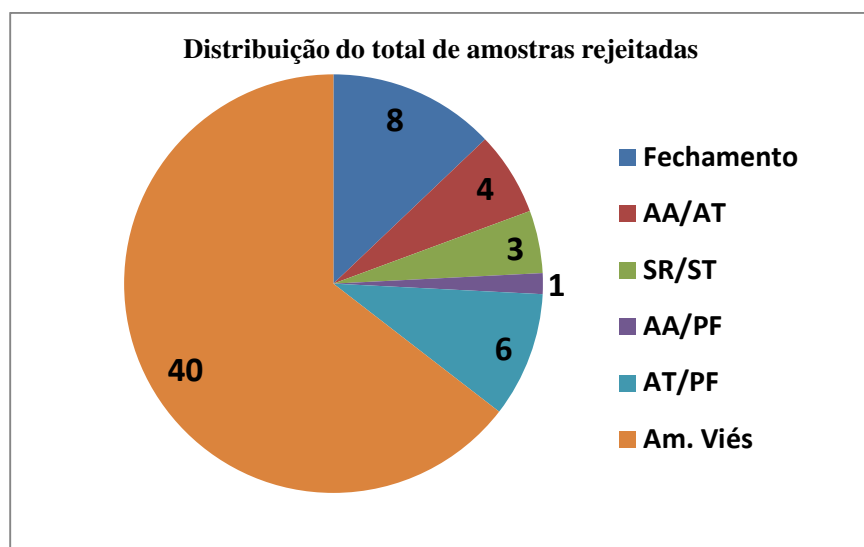


Figura 3.4 – Distribuição das amostras rejeitadas.

A estatística univariada foi realizada por horizontes litológicos distintos, onde o efeito do agrupamento amostral é menor devido à regularidade da malha de sondagem realizada em 50m x 50m entre os furos. Os dados estão apresentados nas tabelas a seguir (Tabela 3.1 a 3.6):

Tabela 3.1 – Estatística univariada da litologia BN.

	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$SiO_2$	$TiO_2$	Alap	Sire
<b>Mínimo</b>	35,26	4,42	4,81	1,00	24,93	3,80
<b>Máximo</b>	59,14	36,37	11,49	1,38	52,58	9,63
<b>Média</b>	48,68	16,40	7,45	1,19	40,99	6,76
<b>Desvio Padrão</b>	5,11	6,80	1,27	0,06	6,20	1,21
<b>Coefficiente de Variância</b>	0,10	0,41	0,17	0,05	0,15	0,18
<b>Variância da Amostra</b>	37,22	5,89	45,47	10,80	6,61	1,16
<b>Contagem</b>	164	164	164	164	164	163

Tabela 3.2 – Estatística univariada da litologia BNC.

	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	Alap	Sire
<b>Mínimo</b>	42,42	4,84	3,19	1,00	33,85	2,96
<b>Máximo</b>	60,32	26,65	8,26	1,58	55,99	8,02
<b>Média</b>	52,82	11,68	5,41	1,36	47,41	4,95
<b>Desvio Padrão</b>	4,31	5,58	1,28	0,12	5,65	1,20
<b>Coefficiente de Variância</b>	0,08	0,48	0,24	0,09	0,12	0,24
<b>Variância da Amostra</b>	49,56	6,32	4,32	1,29	42,61	4,02
<b>Contagem</b>	133	133	133	133	133	133

Tabela 3.3 – Estatística univariada da litologia LF.

	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	Alap	Sire
<b>Mínimo</b>	19,72	7,34	2,60	0,61	14,20	1,82
<b>Máximo</b>	56,04	63,90	7,37	1,38	54,85	7,24
<b>Média</b>	31,56	45,40	4,70	0,82	26,85	3,91
<b>Desvio Padrão</b>	6,49	9,99	1,03	0,12	6,88	1,02
<b>Coefficiente de Variância</b>	0,21	0,22	0,22	0,14	0,26	0,26
<b>Variância da Amostra</b>	28,01	41,80	4,02	0,76	23,03	3,19
<b>Contagem</b>	68	68	68	68	68	68

Tabela 3.4 – Estatística univariada da litologia BC.

	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	Alap	Sire
<b>Mínimo</b>	23,84	3,00	1,88	0,70	21,26	1,26
<b>Máximo</b>	60,20	55,47	7,33	2,30	58,43	6,21
<b>Média</b>	55,99	8,54	3,44	1,32	53,31	2,79
<b>Desvio Padrão</b>	3,22	4,65	0,95	0,25	3,46	0,84
<b>Coefficiente de Variância</b>	0,06	0,54	0,28	0,19	0,06	0,30
<b>Variância da Amostra</b>	54,75	5,66	2,75	1,14	52,24	2,20
<b>Contagem</b>	196	196	196	196	196	196

Tabela 3.5 – Estatística univariada da litologia BCBA.

	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	Alap	Sire
<b>Mínimo</b>	53,96	1,28	3,71	0,53	44,00	2,82
<b>Máximo</b>	60,70	7,65	12,16	1,62	56,67	9,47
<b>Média</b>	57,27	3,79	7,05	0,95	51,33	5,70
<b>Desvio Padrão</b>	1,24	0,99	1,57	0,15	2,39	1,46
<b>Coefficiente de Variância</b>	0,02	0,26	0,22	0,15	0,05	0,26
<b>Variância da Amostra</b>	56,47	3,15	5,98	0,87	49,36	4,48
<b>Contagem</b>	126	126	126	126	126	126

Tabela 3.6 – Estatística univariada da litologia BA.

	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	Alap	Sire
<b>Mínimo</b>	44,71	1,63	5,12	0,60	23,75	4,94
<b>Máximo</b>	57,17	20,46	24,36	1,95	52,81	22,78
<b>Média</b>	54,52	3,60	11,96	0,90	44,17	9,93
<b>Desvio Padrão</b>	2,11	3,07	3,15	0,21	4,13	2,76
<b>Coefficiente de Variância</b>	0,04	0,85	0,26	0,23	0,09	0,28
<b>Variância da Amostra</b>	53,89	2,20	10,49	0,77	42,02	8,39
<b>Contagem</b>	115	115	115	115	115	115

Os histogramas gerados contemplam os teores *versus* a frequência das litologias encontradas, onde se observa suas tendências de acumulações de acordo com a natureza química de cada litologia, tendo um comportamento no geral seguindo um padrão concordante por teores, delineando uma assinatura geoquímica para cada nível bauxítico, como demonstrado nas Figuras 3.5 a 3.10.

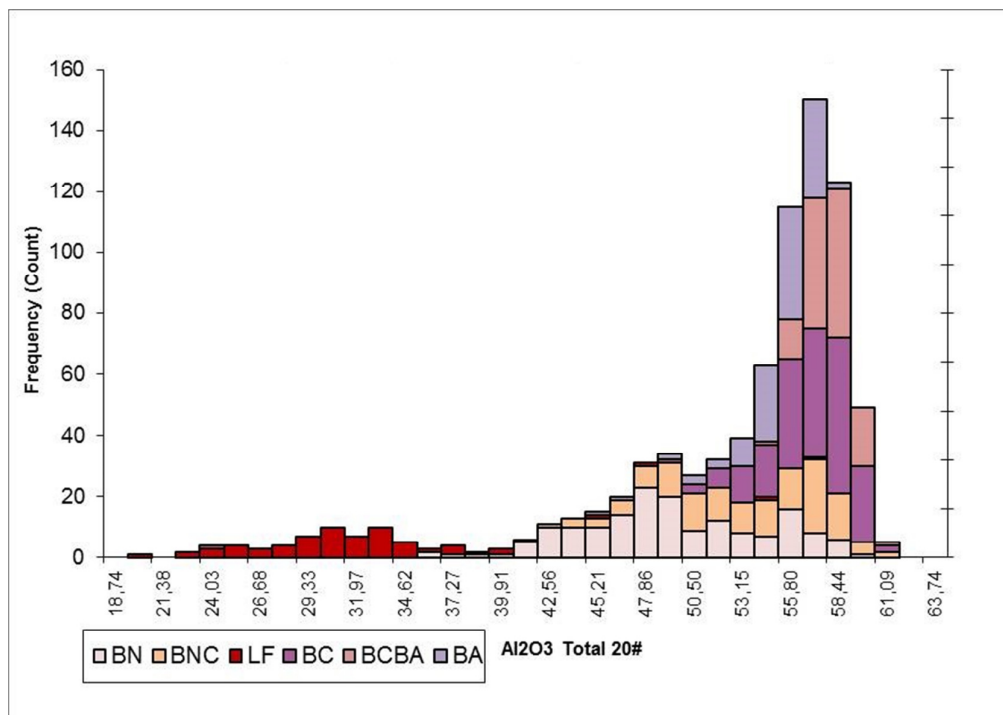


Figura 3.5 – Frequência dos teores  $\text{Al}_2\text{O}_3$  versus frequência amostral por horizonte litológico de bauxita.

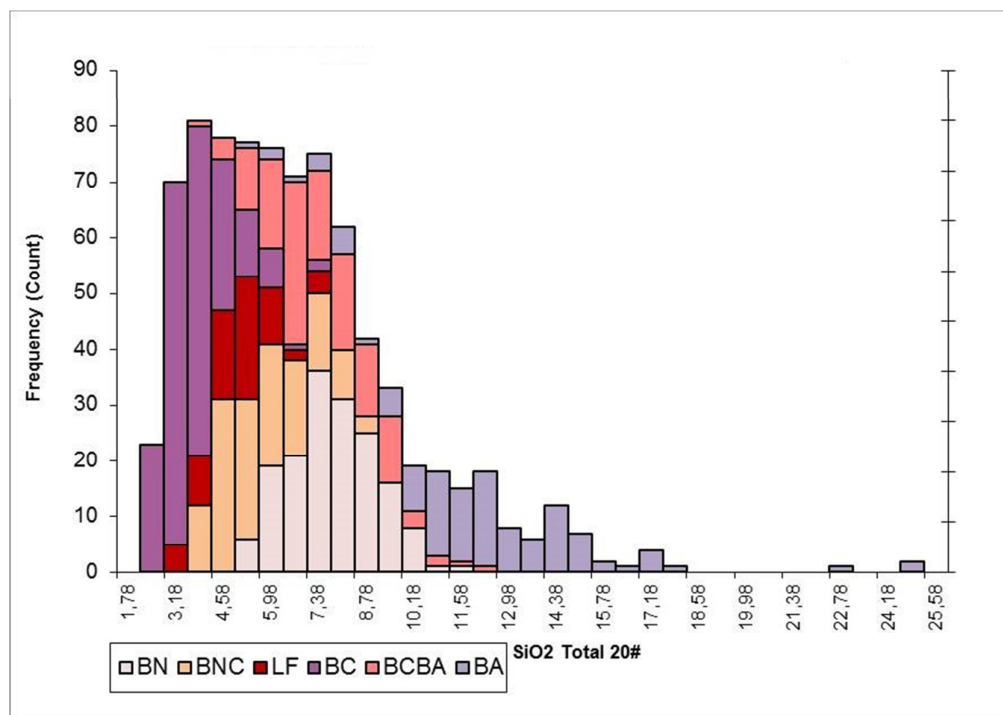


Figura 3.6 – Frequência dos teores  $\text{SiO}_2$  versus frequência amostral por horizonte litológico de bauxita.



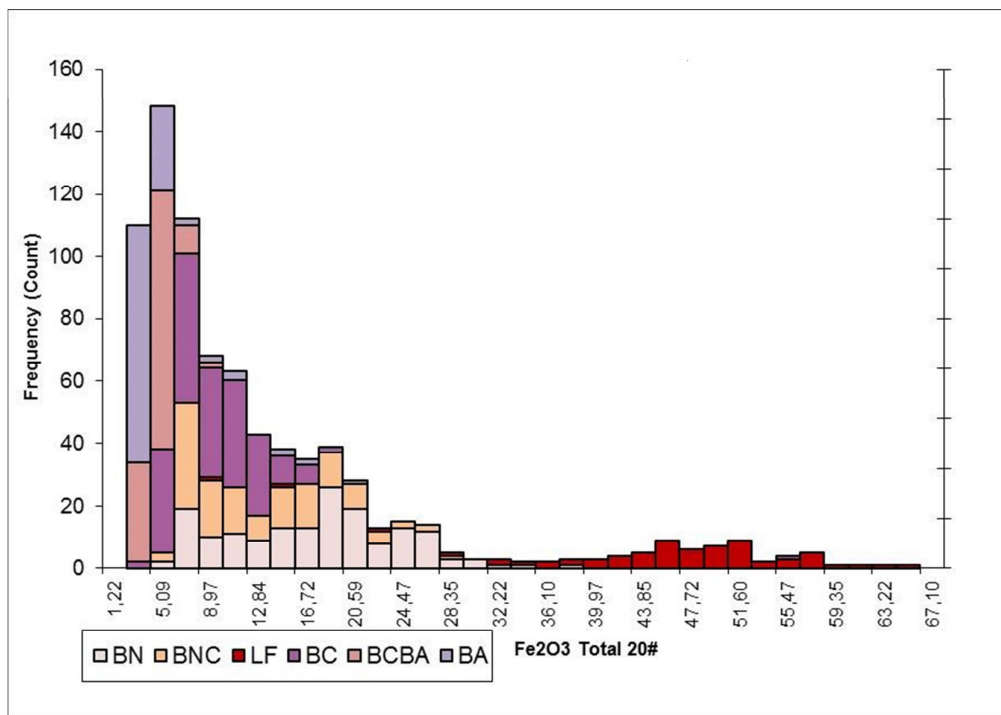


Figura 3.7 – Frequência dos teores  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  versus frequência amostral por horizonte litológico de bauxita.

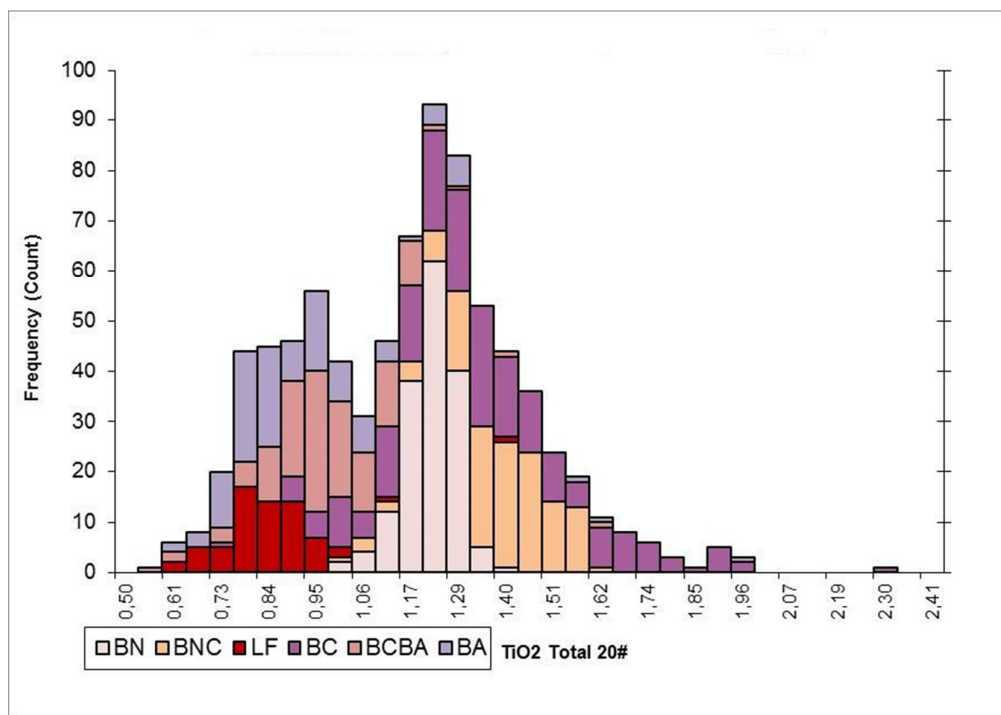


Figura 3.8 – Frequência dos teores  $\text{TiO}_2$  versus frequência amostral por horizonte litológico de bauxita.

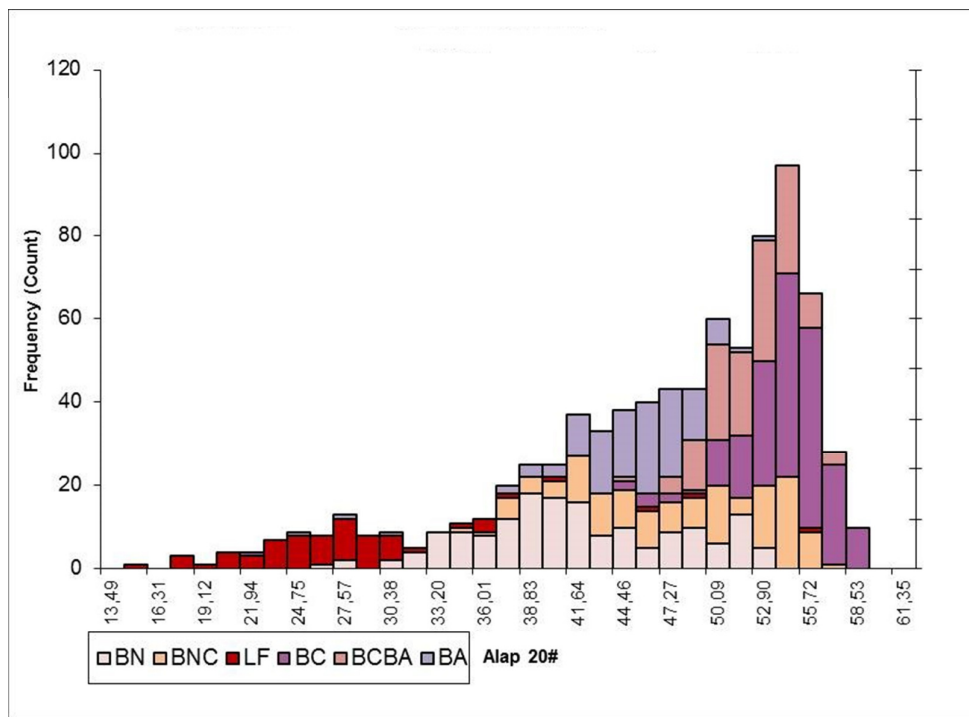


Figura 3.9 – Frequência dos teores Alap *versus* frequência amostral por horizonte litológico de bauxita.

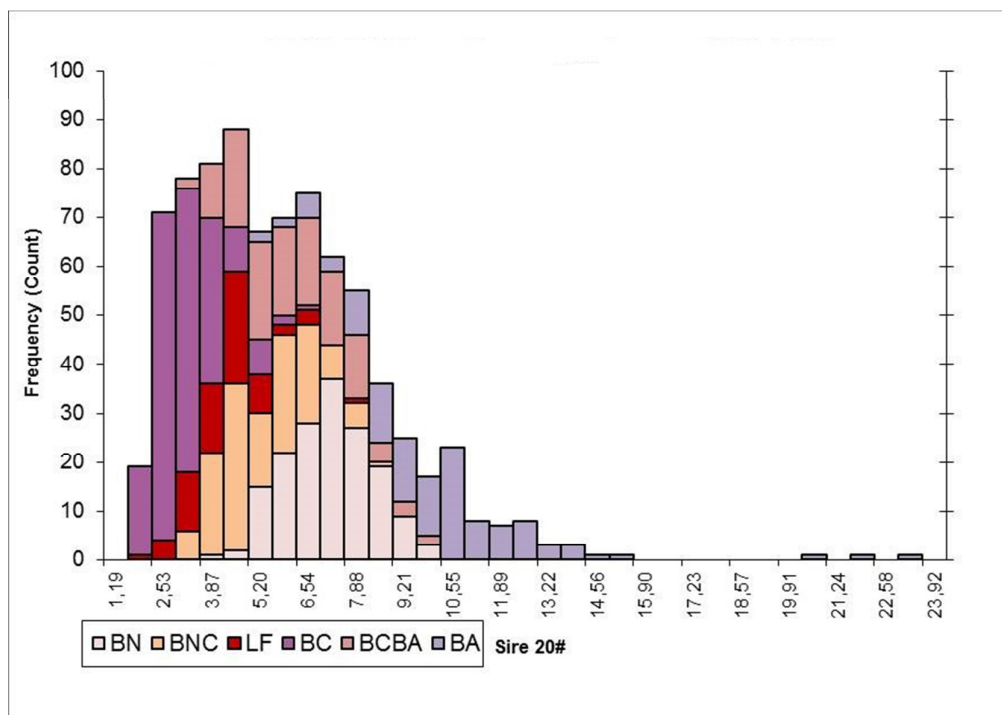


Figura 3.10 – Frequência dos teores Sire *versus* frequência amostral por horizonte litológico de bauxita.

### 3.4 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP)

A ACP está associada à ideia de redução de massa de dados com menor perda possível de informação, onde procura redistribuir a variação nos eixos originais de forma a se obter um conjunto de eixos perpendiculares entre si, não correlacionáveis, como citado em Hongyu *et al.*, 2015.

A ACP segundo Hongyu *et al.* (2015) consiste em transformar um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis de mesma dimensão, denominadas de componentes principais, que por sua vez apresentam propriedades relevantes, onde cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais, são independentes entre si e com o propósito de estimar o máximo de informação contida nos dados. Esta técnica agrupa os indivíduos de uma população segundo a variação de suas características, agrupando estes indivíduos pelas suas similaridades.

Foi utilizado o software Statistica 7 para o processamento do conjunto de dados litoquímicos de bauxita, considerando somente as variáveis: espessura das amostras, teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ .

A obtenção dos componentes principais é um produto da diagonalização de matrizes simétricas positivas semi-definida, onde se busca a definição de fatores devido à repetição e divergência de dados, agrupando ou distanciando semelhanças quando houver, como demonstrado na tabela 4.3 do capítulo correspondente a este assunto.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 PERFIL LATERÍTICO - BAUXÍTICO

Os estudos foram direcionados para os níveis de Bauxita Nodular – BN e Bauxita Nodular Concrecionária – BNC, suas interferências nas litologias sotopostas de Laterita Ferruginosa – LF e Bauxita Concrecionária - BC. O material de bauxita coletado foi oriundo das rotinas de trabalhos na mina de Miltônia-3 dentro do Controle de Qualidade da mina, junto às frentes de lavra abertas e das campanhas de sondagem para os estudos de modelamento geológico e de blocos utilizados na programação dos avanços anuais de lavra (Figura 4.1 e 4.2).



Figura 4.1 – A – Horizontes bauxíticos nas frentes de Lavra (1 – CAP, 2 – BN, 3 – BNC); B e C - Amostragem de canaletas para o controle de qualidade na frente de lavra, com a exposição do talude da próxima frente de lavra na mina.

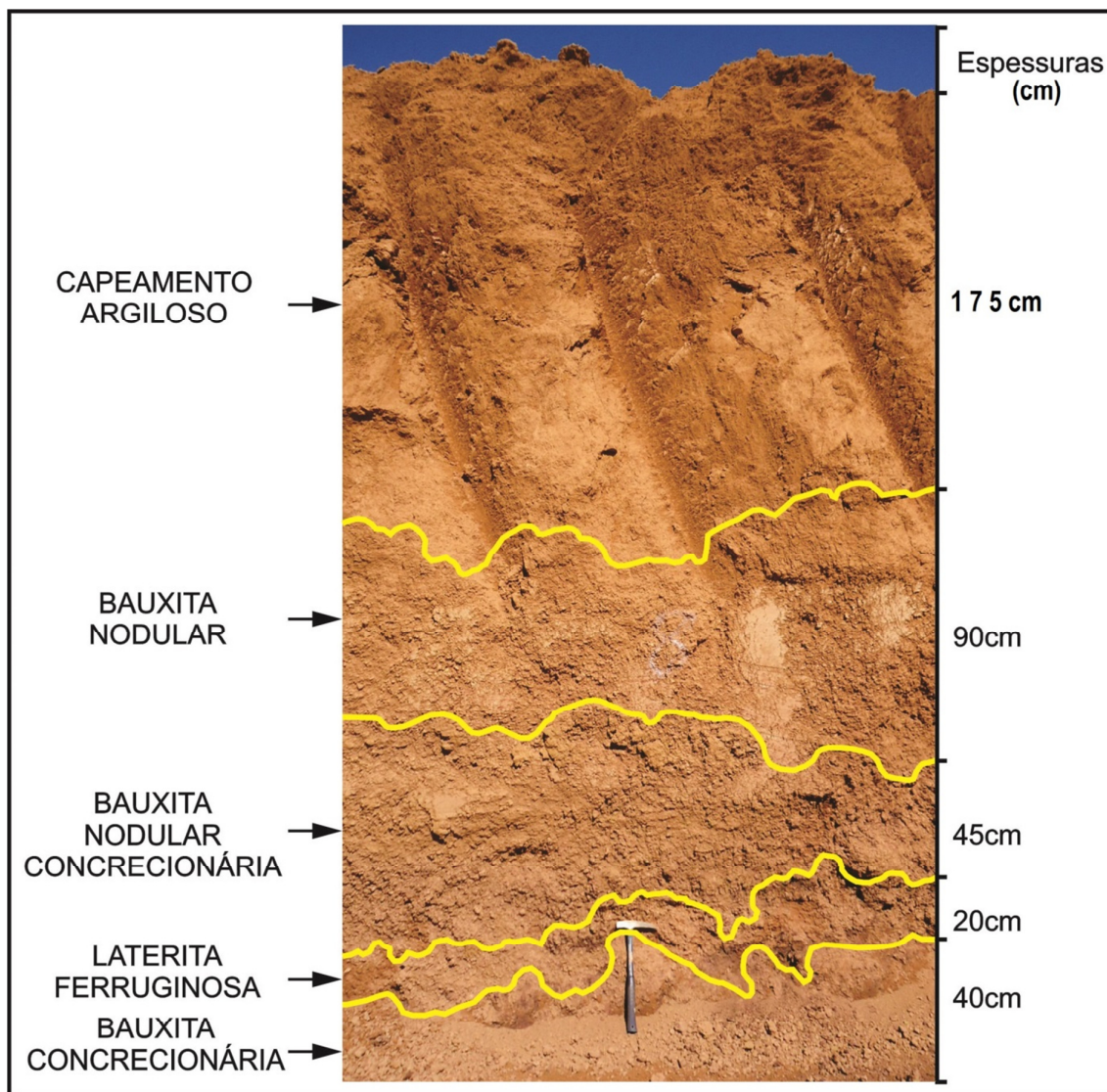


Figura 4.2 – Perfil laterítico – bauxítico evidenciando o contorno irregular em amarelo dos níveis de BN, BNC, LF e parte do topo da BC e suas espessuras médias.

## 4.2 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

### 4.2.1 Bauxita Nodular - BN

O horizonte de Bauxita Nodular – BN é constituído por nódulos concrecionários e pelo intercrescimento de material gibbissíticos por vezes ferruginizados, de dimensões entre 1cm a 2cm, de coloração laranja-vermelho, de contornos angulosos a sub-angulosos, revestidos localmente por película externa de goethita-hematita, fortemente compactados, porém microporosos. Estes nódulos estão por vezes isolados, dispersos, flutuando em matriz

argilosa de composição gibbssítica-caulinítica de fina granulometria ou localmente interconectados (Figura 4.3).

O contato com o capeamento argiloso sobreposto é gradual ocorrendo em poucos centímetros em 10cm a 30cm, porém discordantes em escala métrica. O contato com a BNC sotoposta é gradativo e com menor frequência de argila gibbsítica-caulinítica para a base deste horizonte (Figura 4.2) e abrupta quando ocorre direto com a LF.



Figura 4.3 – Bauxita Nodular *in natura*: nódulos de gibbsita em matriz de argila caulinítica a gibbssítica.

Em laminas petrográficas observam-se nódulos gibbssíticos de coloração marrom a laranja-avermelhado, sub-angulosos a arredondados, de até 1,8mm, envoltos por matriz criptocristalina marrom avermelhada, argilosa, gibbssítica muitas vezes ferruginosa, como um plasma heterogêneo, onde se observa uma recristalização de gibbsita em microcristais preenchendo fissuras, *cutans* e pseudos vazios (Figura 4.4 – F).

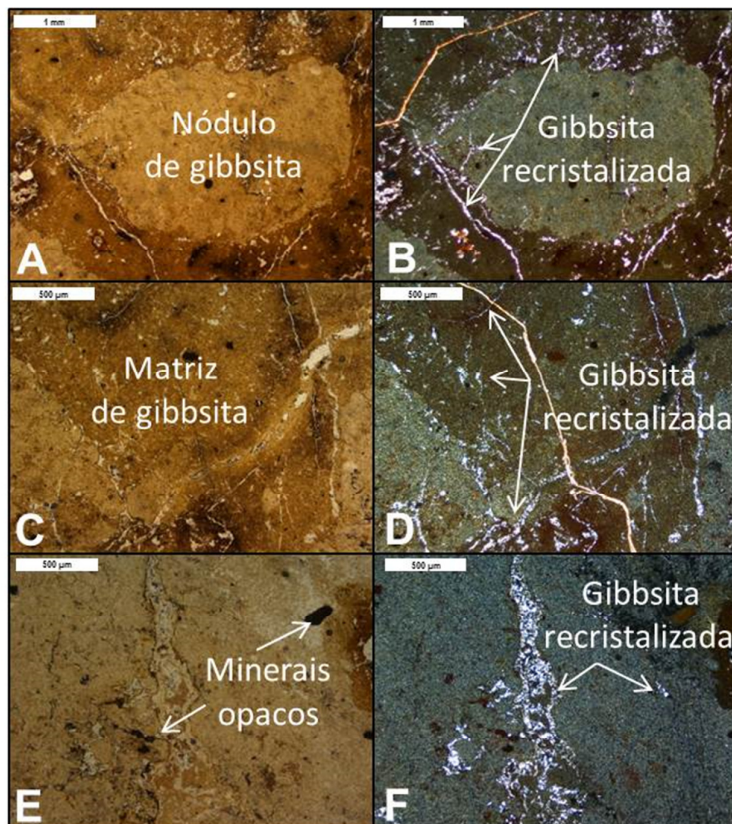


Figura 4.4 – (A) Nódulo de bauxita em matriz gibbsítica luz natural-LN; (B) Mesma imagem de A com luz polarizada-NX evidenciando a recristalização de bauxita; (C) Matriz gibbsítica compactada em LN; (D) Mesma imagem de C com NX, evidenciando a recristalização de gibbsita em microcristais; (E) Minerais opacos dispersos em matriz gibbsítica em LN; (F) Imagem de E com NX evidenciando a recristalização da gibbsita em *cutans* e fissuras.

Na Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV e nas análises pelo Sistema de Energia Dispersiva – EDS (*Energy Dispersive System*) as imagens obtidas mostram uma matriz composicionalmente formada predominantemente por gibbsita, secundariamente caulinita e hematita, onde os microcristais de gibbsita encontram-se dispersos, localmente agregados, preenchendo os pseudos vazios, como poros e por vezes interconectados. Apresentam também minerais opacos e minerais acessórios como anatásio e zircão (Figura – 4.5 e 4.6).

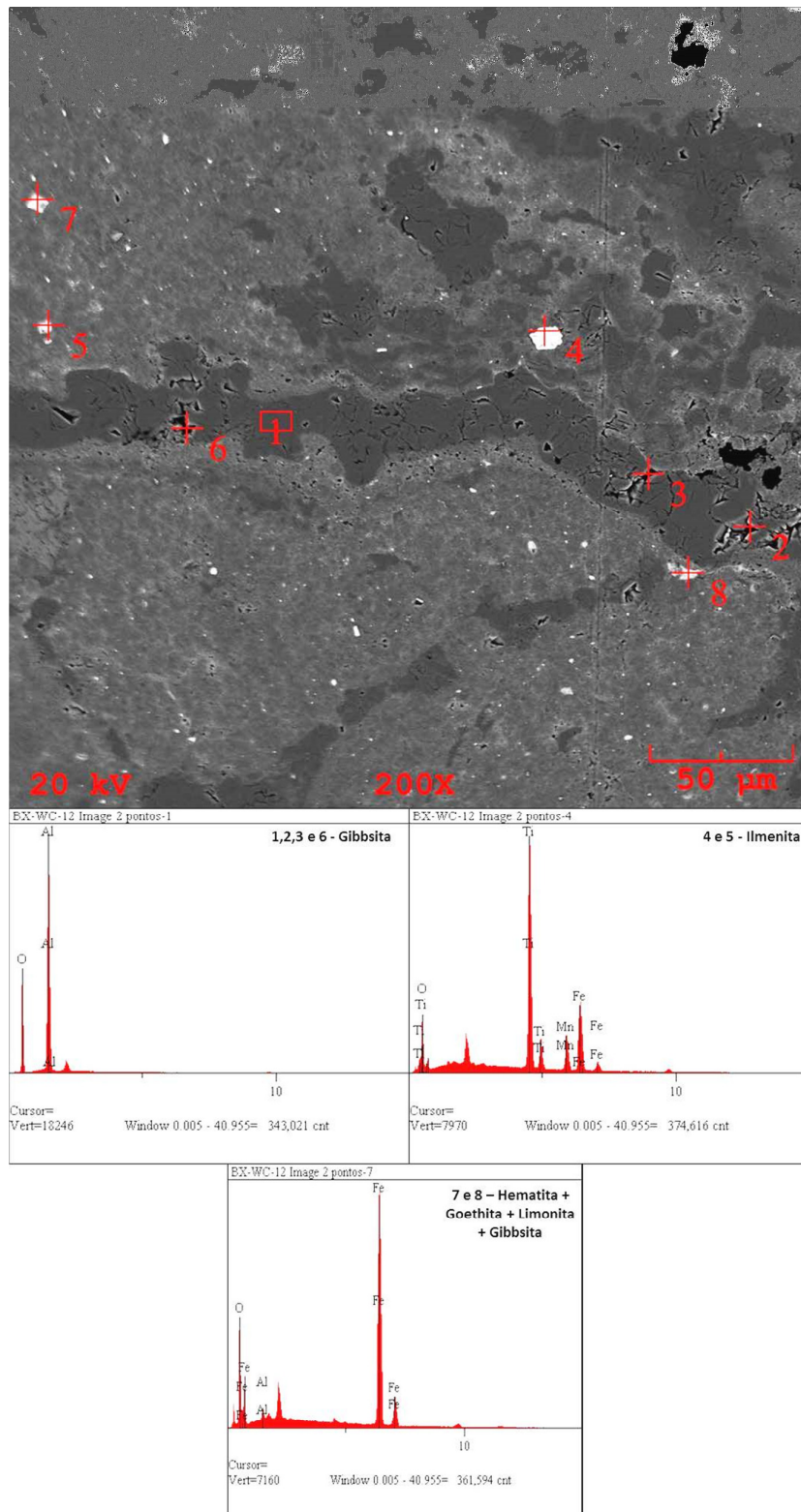


Figura 4.5 – Imagem de parte de um nódulo de bauxita e respectivas análises EDS apresentando microcristais de gibbsite, ilmenita e hematita associada a goethita, limonita e gibbsite, dispersos em matriz gibbsítica e *cutans* preenchidos por cimento gibbsítico recristalizado.



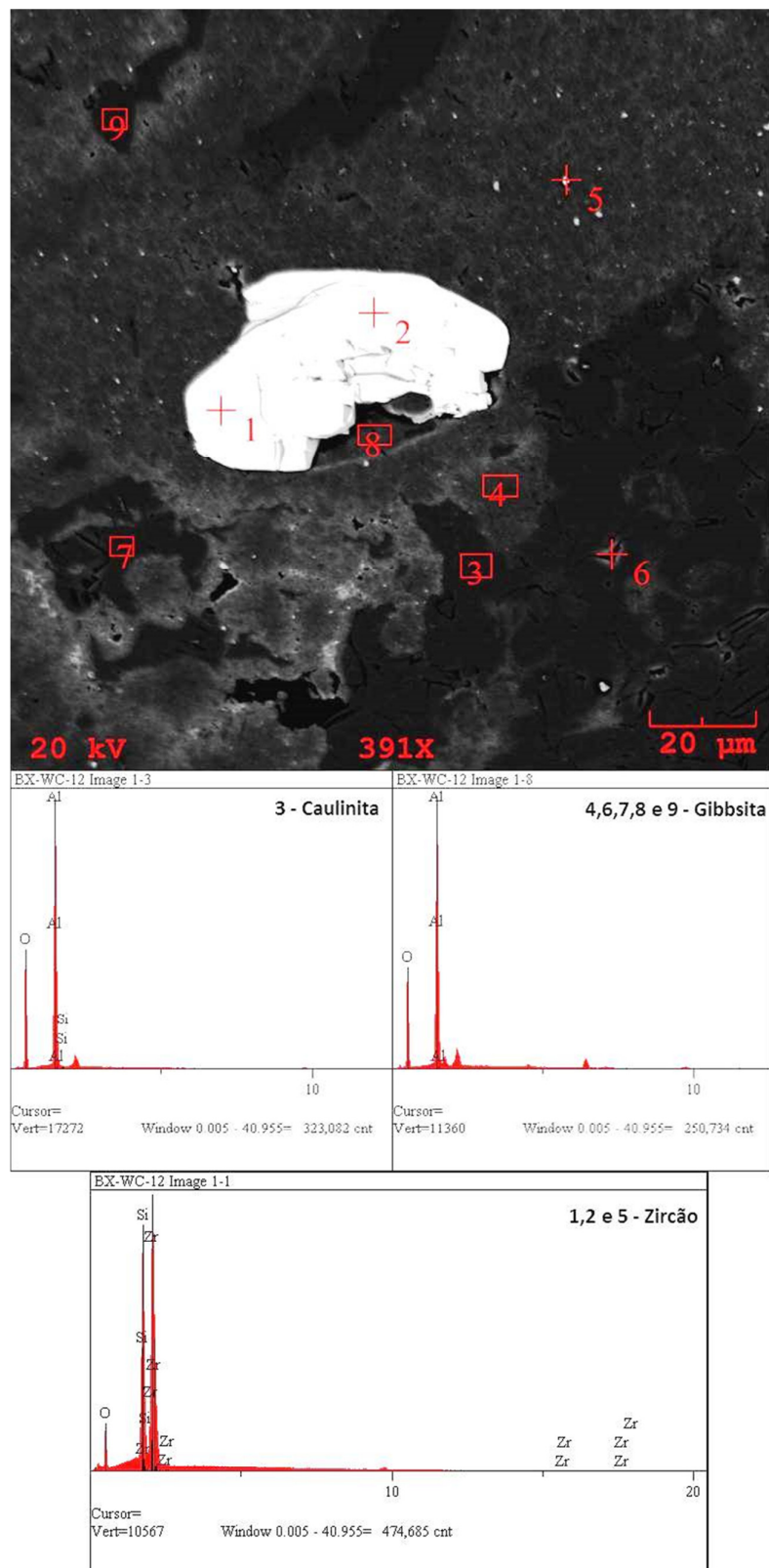


Figura 4.6 – Imagem de parte de um nódulo de bauxita e respectivas análises EDS apresentando microcristais de gibbsita e zircão dispersos em matriz gibbsítica.

A análise por Difratoimetria de Raio-X (DRX) pelo método de amostra total de uma fração representativa do nível de BN demonstrando predominantemente a ocorrência de gibbsita, devido a maior intensidade de seu pico em 4,8Å, além de caulinita, hematita e anatásio secundariamente, com picos de menor intensidade como demonstrado na Figura 4.7.

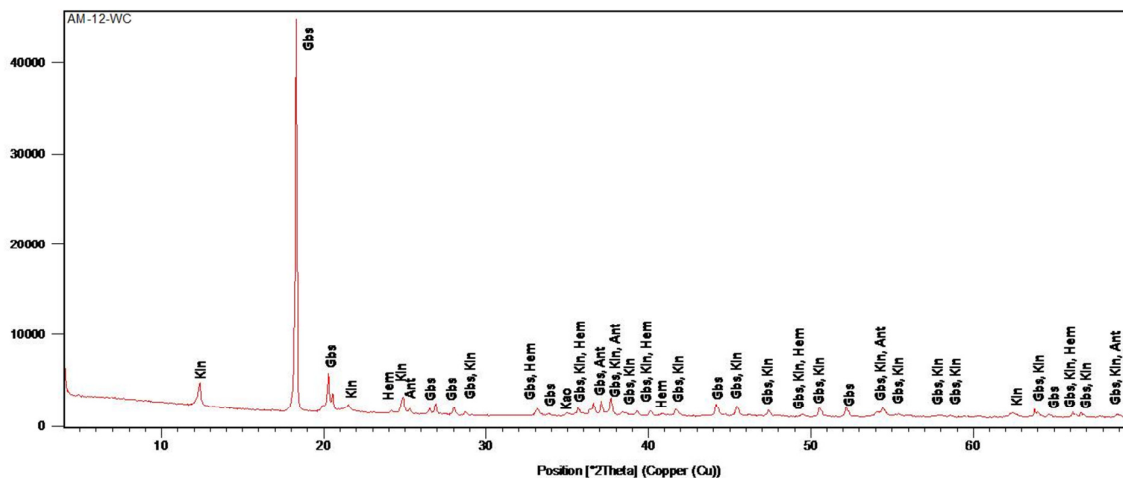


Figura 4.7 – Difratoograma de Raio-X de amostra total de BN, com a gibbsita (Gbs) como mineral dominante, além de caulinita (Kln), hematita (Hem) e anatásio (Ant) como acessórios.

#### 4.2.2 Bauxita Nodular Concrecionária - BNC

O nível de Bauxita Nodular Concrecionária – BNC possui características similares ao nível sobreposto de BN, constituídos predominantemente por nódulos concrecionários de gibbsita, sendo estes de maior tamanho formados pela junção de nódulos menores, por vezes ferruginosos de coloração marrom a laranja-avermelhado, de dimensões variadas (centimétrico a decimétrico) contornos angulosos a subangulosos, sem borda ferruginizada, fortemente compactados, porosos e por vezes são preenchidos por argila gibbsítica-caulinítica, encontram-se sem orientação preferencial, com menor quantidade de argila gibbsítica-caulinítica como matriz em relação a BN, sendo que por vezes estão aprisionados em bolsões decimétricos, observa-se menor quantidade de hematita, goethita e caulinita (Figura 4.8).

O contato com o nível sotoposto de LF é brusco, discordante, por vezes em algumas partes deste nível observa-se um avanço do cimento gibbsítico comum da BNC, consumindo

em parte e degradando a LF, e o contato com o nível litológico sobreposto de BN é gradual (Figura 4.2).



Figura 4.8 – Bauxita nodular concrecionária preservando a argila caulínica a gibbsítica nos bolsões.

Em lâminas delgadas observam-se matriz gibbsítica de coloração marrom a laranja-avermelhado, com microcristais de gibbsita dispersos e flutuantes, sub-angulosos a arredondados, até 0,5mm de diâmetro, envoltos por matriz criptocristalina como um plasma heterogêneo, ferruginizado, onde se observa também gibbsita em microcristais preenchendo fissuras, *cutans* e pseudos vazios (Figura 4.9 – B e F).

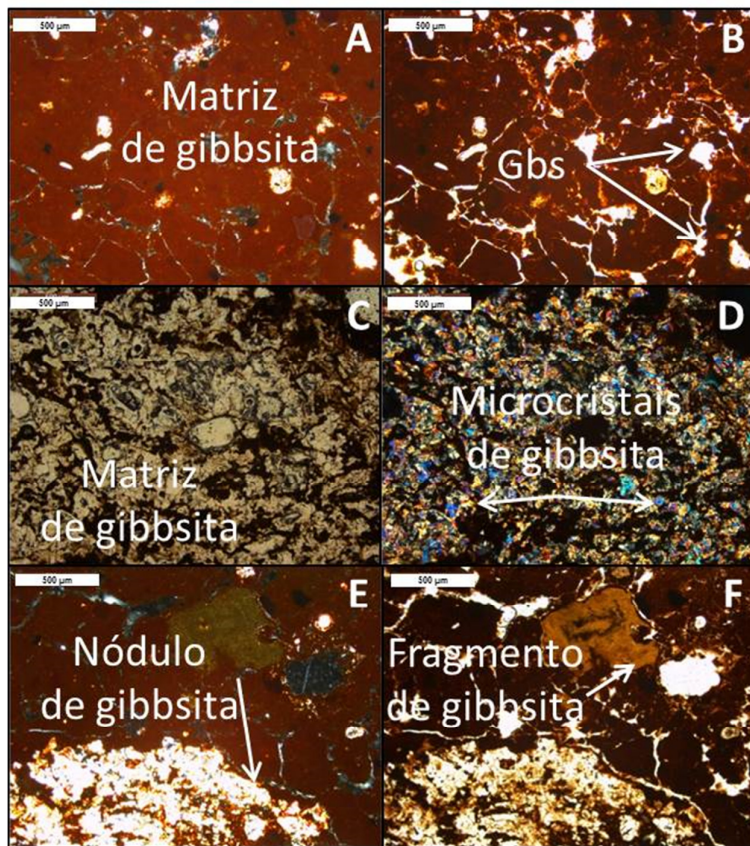


Figura 4.9 – (A) Matriz gibbsítica-caulínica; (B) – Imagem de A com NX evidenciando recrystalização de gibbsita; (C) Matriz gibbsítica compactada; (D) Imagem de C com NX evidenciando a gibbsita em microcristais; (E) Nódulos de gibbsita em matriz gibbsítica; (F) Imagem de E com NX evidenciando um fragmento pretérito de gibbsita.

Ao MEV-EDS as imagens obtidas mostram uma matriz composicionalmente formada por gibbsita, com cristais finos de gibbsita dispersos e localmente agregados preenchendo os pseudos vazios e a ocorrência de poros por vezes interconectados, além de finos cristais angulosos de hematita e minerais acessórios como anatásio e zircão (Figura 4.10, 4.11 e 4.13).

Localmente foi observado o núcleo de um nódulo gibbsítico preservando feições reliquiares de caulinita e de gibbsita pretéritos envolvidos por uma massa de hematita (Figura – 4.12).

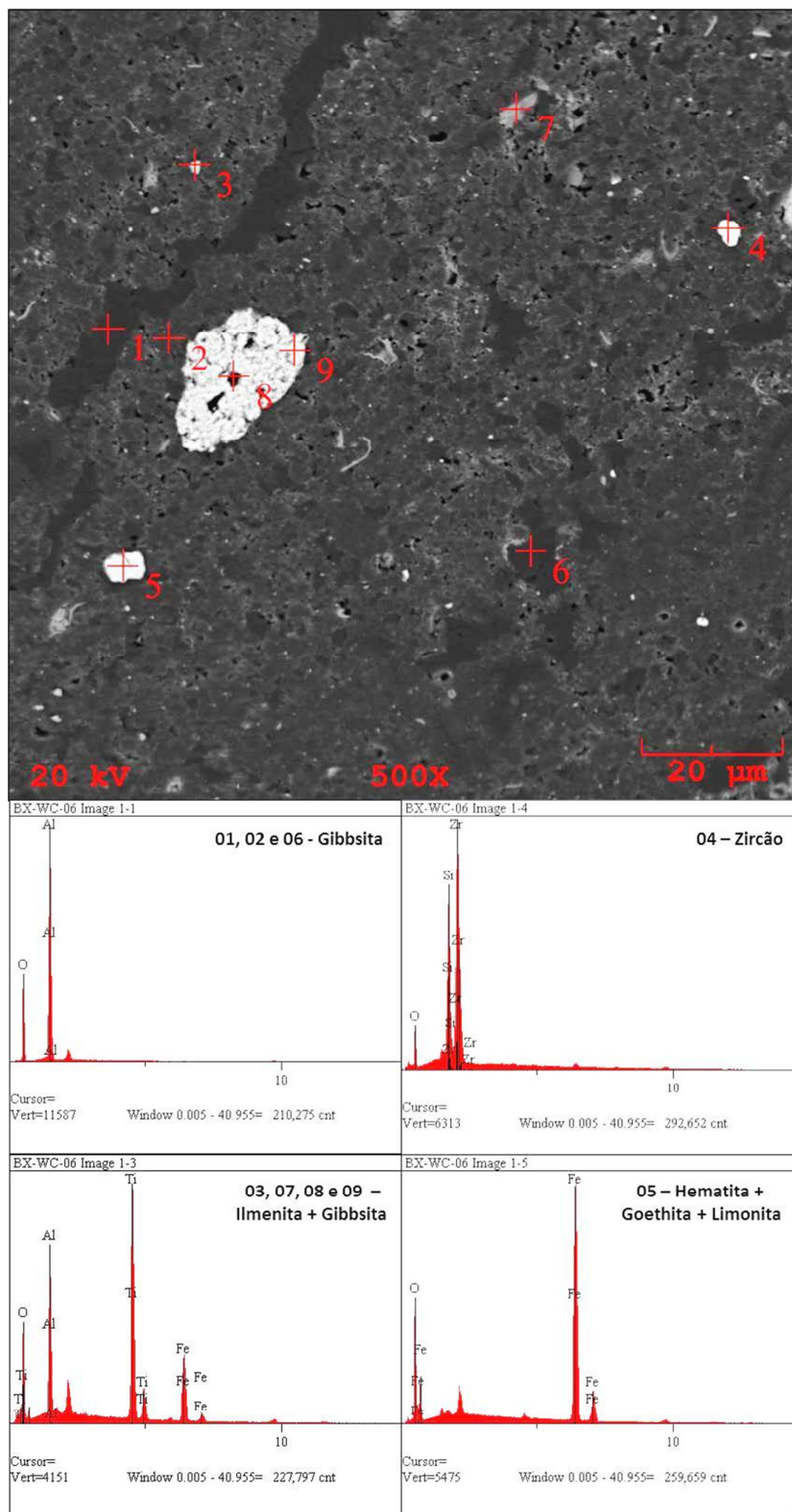


Figura 4.10 – Imagem de fragmento de BNC com análises EDS em microcristais de ilmenita com gibbsita e hematita associada com goethita e limonita dispersos em matriz gibbsítica e *cutans* preenchidos por cimento gibbsítico.

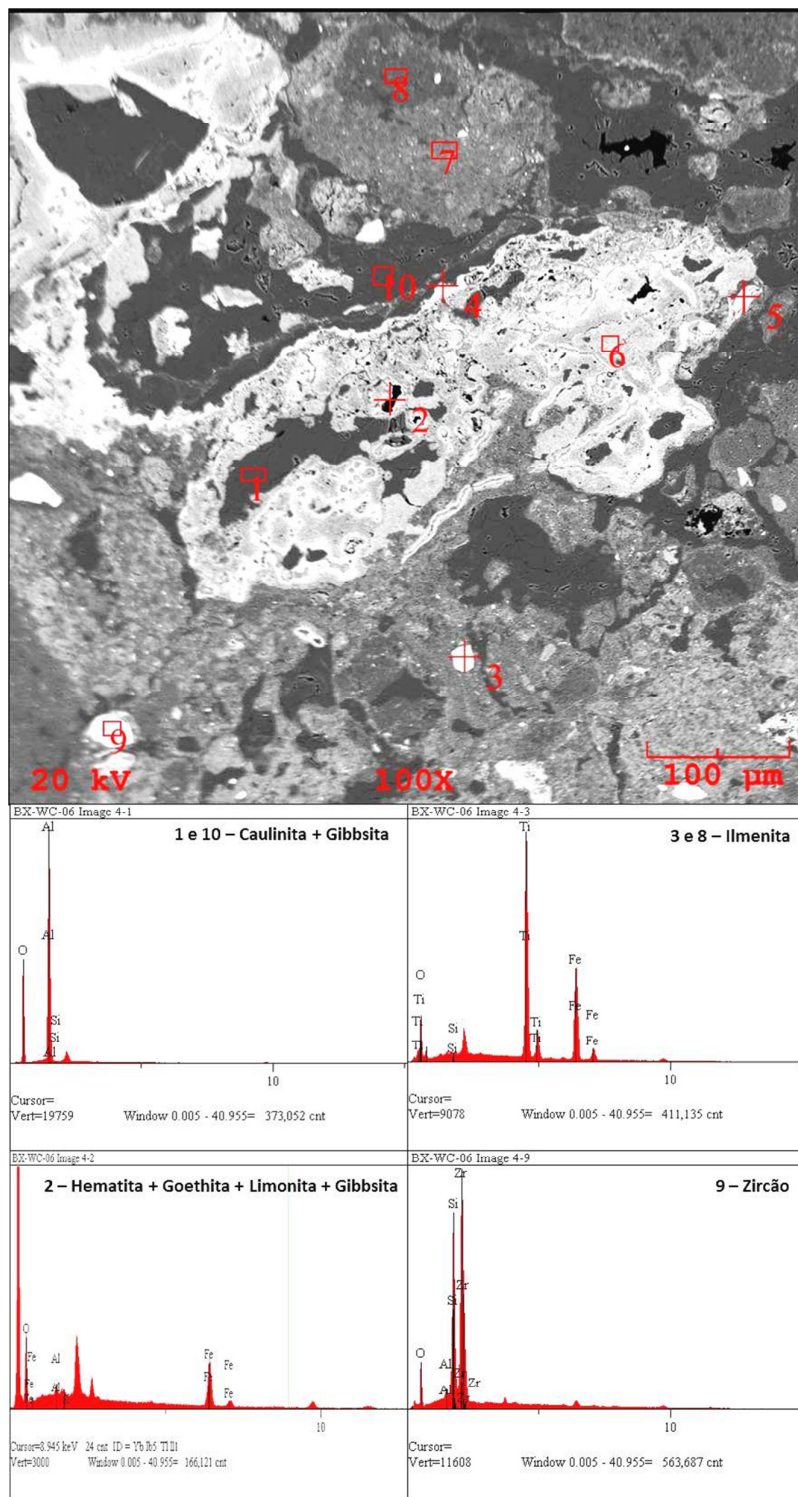


Figura 4.11 – Imagem de agregado de ilmenita com análises EDS em microcristais de gibbsita, ilmenita além de hematita associada a goethita, limonita e gibbsita, envoltos por plasma de ilmenita. Cimento gibbsítico preenchendo pseudos vazios.

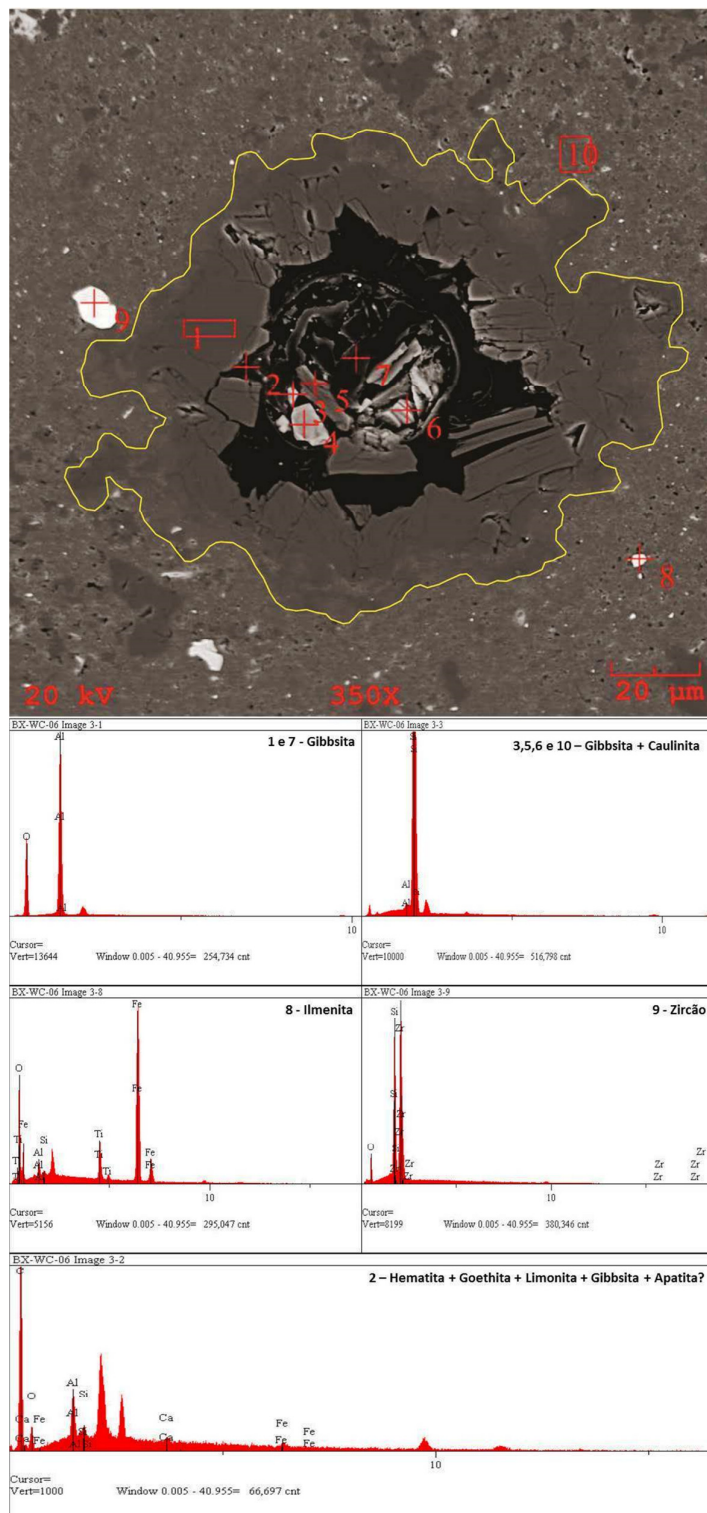


Figura 4.12 – Imagem com análises EDS em detalhe de um micronódulo de bauxita (linha em contorno amarelo) com seu núcleo preservando internamente microcristais de gibbsita e caulinita pretéritos, envoltos por uma massa de hematita associada a goethita, limonita, gibbsita e apatita?, entre micronódulos gibbsíticos, cimento gibbsítico.

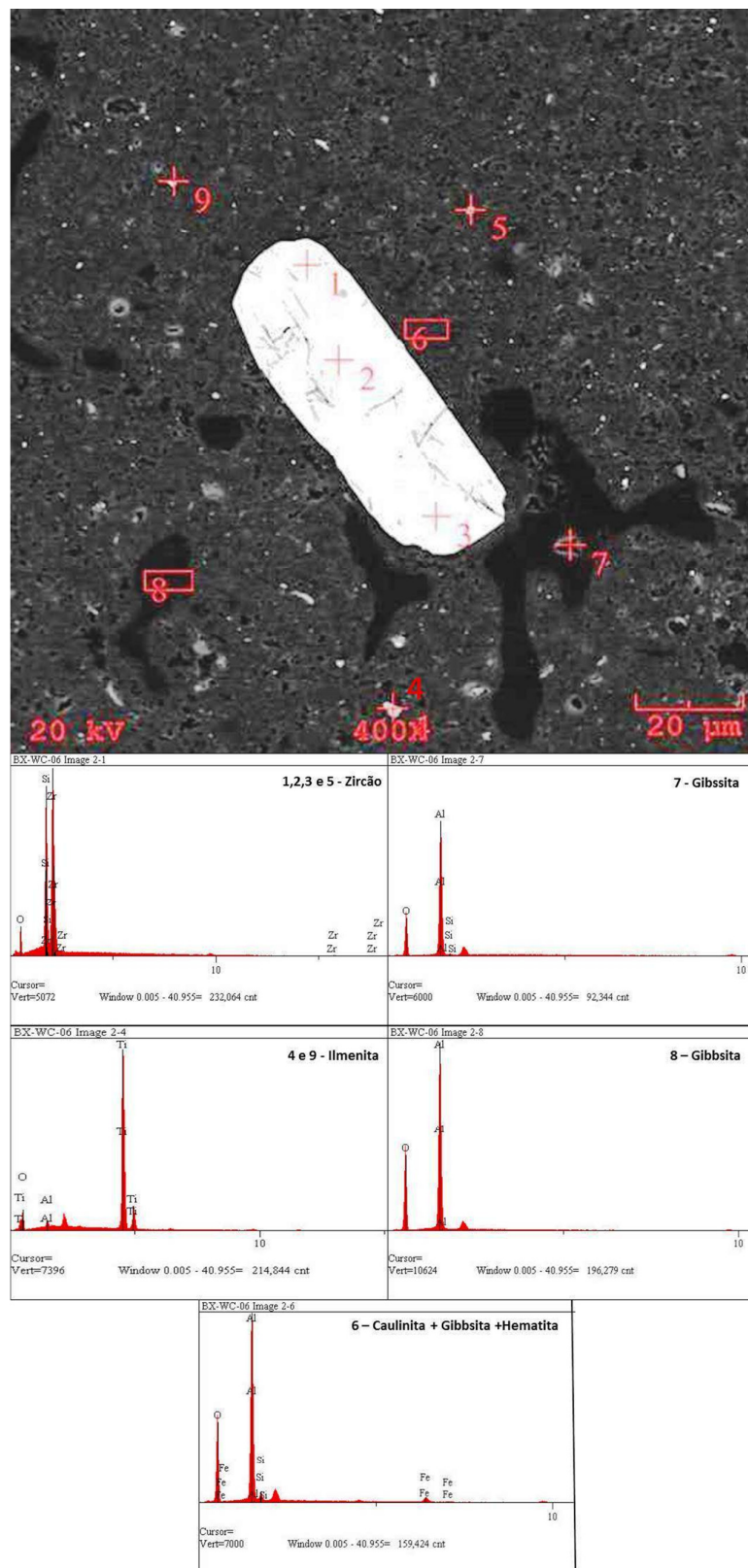


Figura 4.13 – Imagem com análises EDS de um cristal de zircão com microcristais dispersos de zircão e ilmenita em matriz gibbsítica com hematita e caulinita.



Análise por DRX de amostra total de uma porção representativa do nível de BNC que demonstra predominantemente ocorrência de gibbsita, caracterizado pelo pico em 4,8Å, além de caulinita e anatásio secundariamente com picos de menor intensidade (Figura 4.14).

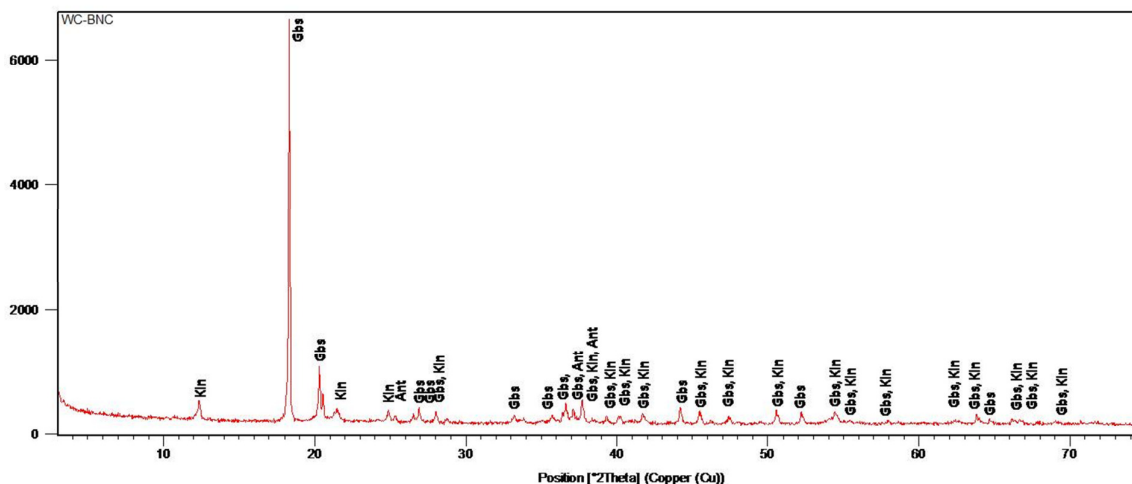


Figura 4.14 – DRX de amostra total de BNC, com a gibbsita (Gbs) como mineral dominante, além de caulinita (Kin) e anatásio (Ant) como acessórios.

### 4.2.3 Laterita Ferruginosa – LF

O horizonte de Laterita Ferruginosa – LF marca o topo do primeiro pacote regional de bauxita, composto por pisólitos ferruginosos revestidos de hematita e goethita, por vezes concrecionário com matriz gibbsítica-caulinítica. Estes pisólitos possuem formas subarredondadas, com dimensões de até 1,5cm e sem orientação preferencial perceptível.

Localmente, em algumas porções deste horizonte litológico estão dispersos em matriz argilosa caulinítica–gibbsítica, onde o nível de BNC não está desenvolvido com maior intensidade ou até mesmo inexistente. Por vezes, a BNC está desenvolvida como matriz de sustentação destes pisólitos, composta por cimento gibbsítico-caulinítico (Figura 4.15).

O contato com o horizonte sotoposto de BC ocorre de forma gradual, em pouca espessura cm a dm a abrupto e com o nível sobreposto de BNC ou diretamente BN de forma discordante e abrupta, como citado anteriormente.

Segundo Tardy (1993) estes pisólitos foram formados pelo acúmulo de material ferruginoso, pela cimentação em condições centrípetas nos poros de pequenas dimensões.

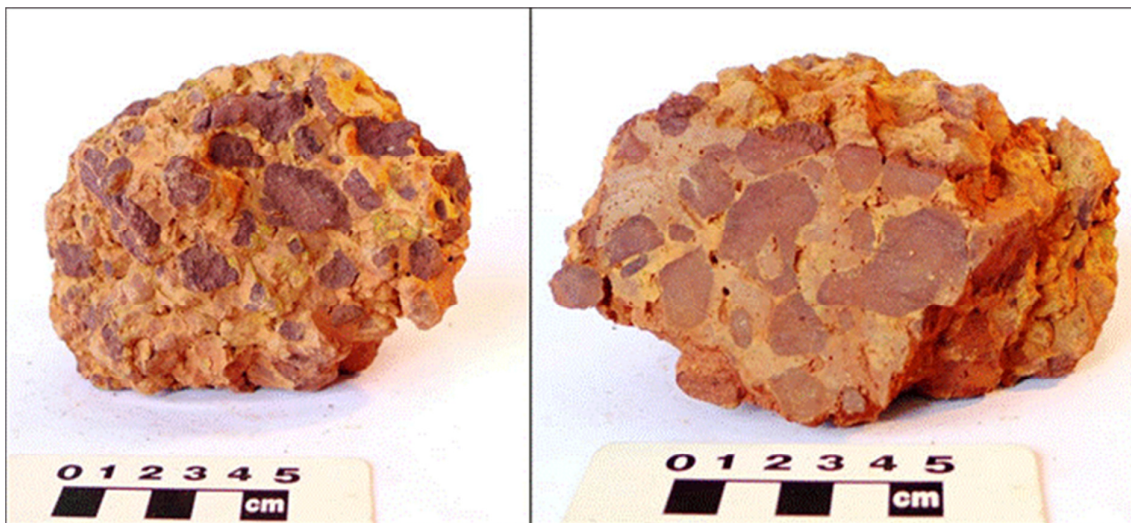


Figura 4.15 – Laterita Ferruginosa - LF com nódulos ferruginosos angulosos a arredondados dispersos em matriz gibbsítica - caulínítica.

Em laminais petrográficas observa-se matriz gibbsítica de coloração marrom a laranja-avermelhado, com microcristais de gibbsita, dispersos em contatos flutuantes, sub-angulosos a arredondados, de até 0,5mm, ferruginizado, criptocristalino como plasma heterogêneo, onde se observa também recristalização de gibbsita em microcristais preenchendo fissuras, *cutans* e pseudos vazios, como observado nos outros horizontes litológicos.

Os nódulos ferruginosos apresentam-se como minerais opacos em lâmina polida devido a sua composição ferruginosa, observa-se pseudos vazios preenchidos por quartzo e gibbsita, além de poros dispersos e localmente interconectados (Figura 4.16 A e B).

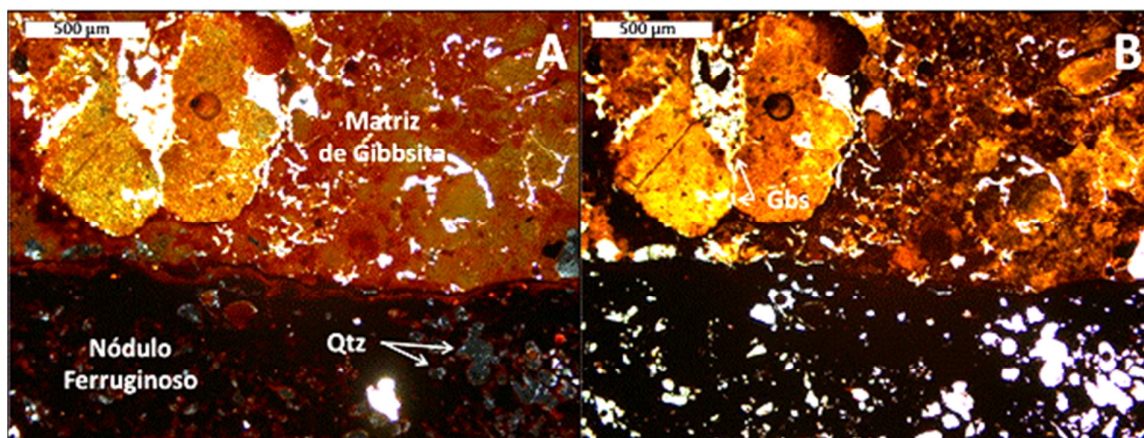


Figura 4.16 – (A) Contato do nódulo ferruginoso com a matriz gibbsítica-caulínítica; (B) Imagem de A com NX evidenciando a recristalização de bauxita.

Ao MEV-EDS as imagens obtidas mostram uma matriz composicionalmente formada por gibbsita, com microcristais recristalizados de gibbsita, microcristais angulosos de anatásio, hematita e zircão dispersos, além da ocorrência de poros por vezes interconectados (Figura 4.17 e 4.18).

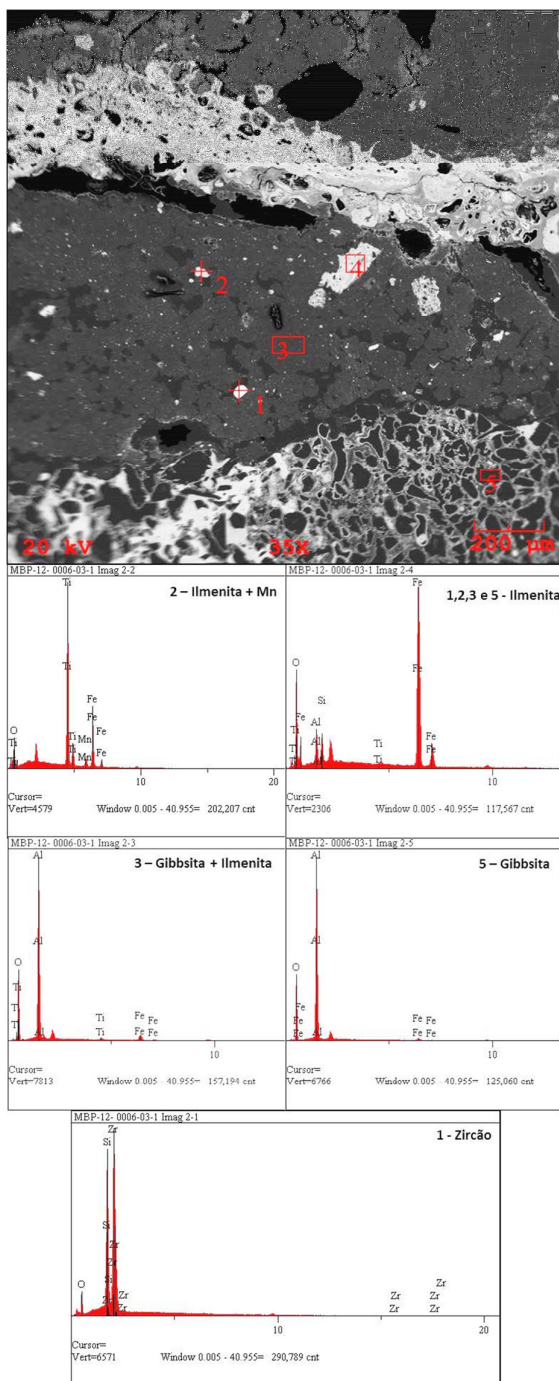


Figura 4.17 – Imagem e respectivas análises EDS de um fragmento de LF com microcristais de gibbsita, ilmenita e zircão dispersos em matriz gibbsítica.

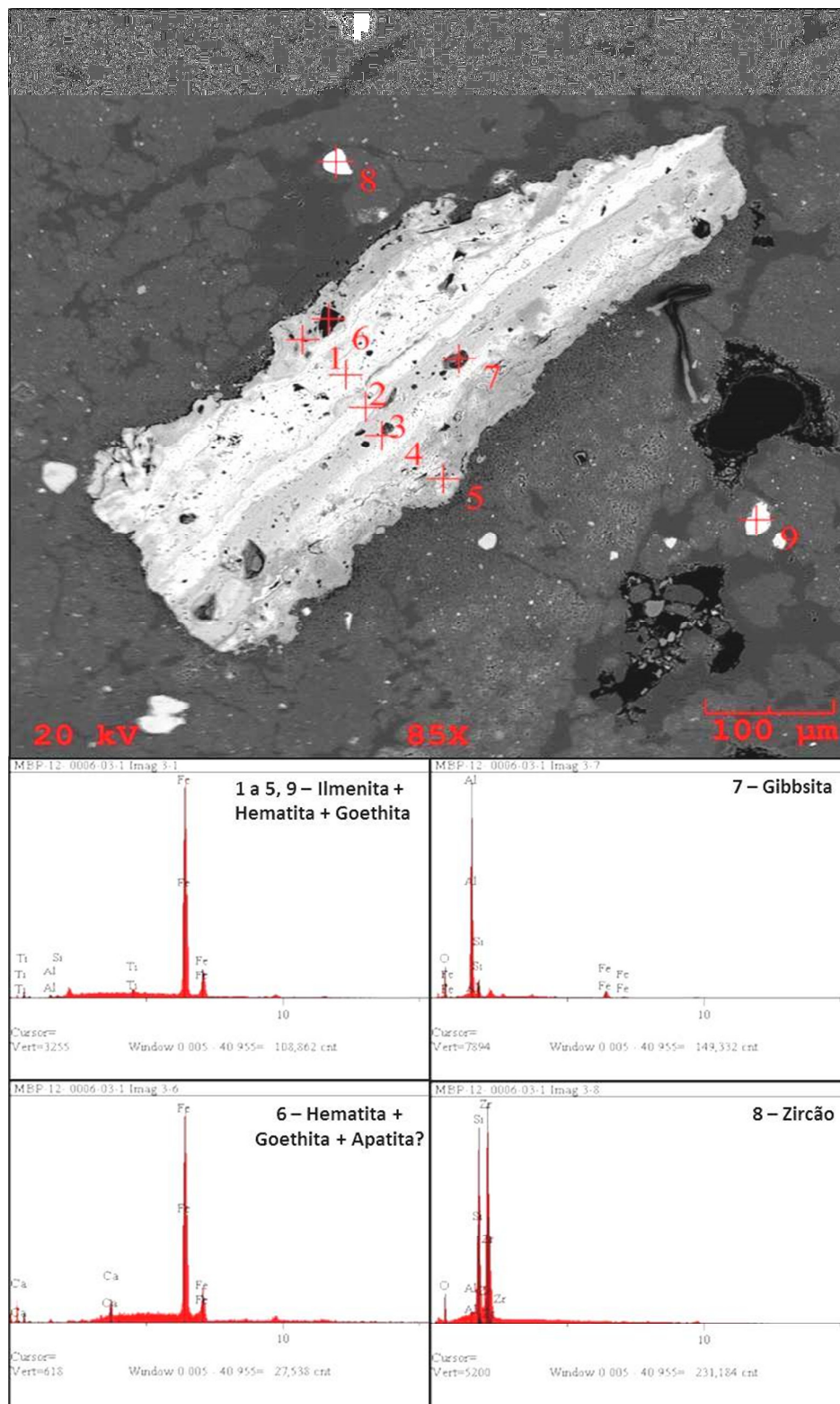


Figura 4.18 – Fotomicrografia com respectivas análises EDS de um fragmento de LF em seção de um microcristal de ilmenita com inclusões de microcristais de gibbsita e hematita, além de zircão disperso em matriz gibbsítica.

Análise por DRX de amostra total de uma porção representativa do horizonte LF, demonstra predominantemente a ocorrência de gibbsita, devido a maior intensidade do pico em 4,8Å, além de hematita e caulinita secundariamente com picos de menor intensidade (Figura 4.19).

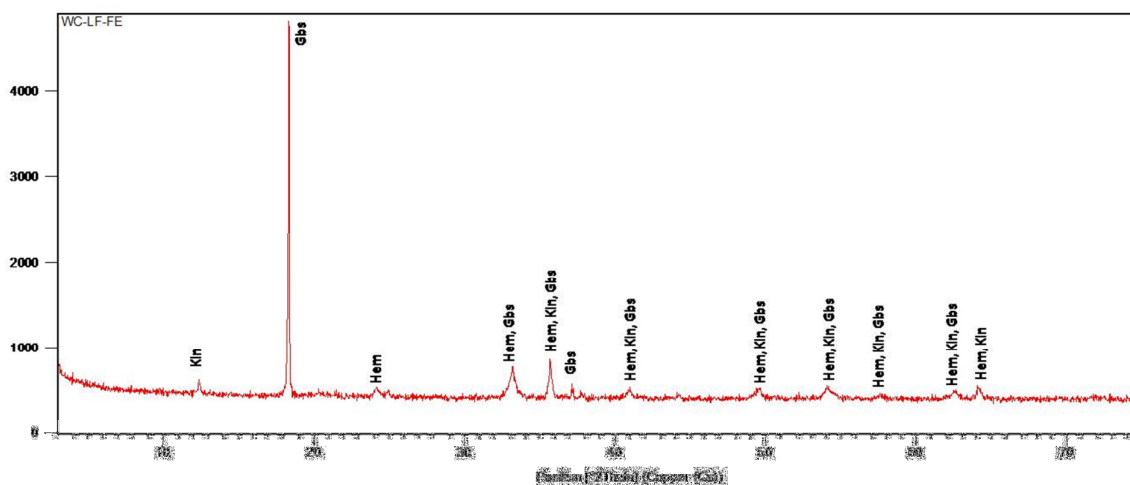


Figura 4.19 – DRX de amostra total de LF, com gibbsita (Gbs) como mineral dominante, além de hematita (Hem) e caulinita (Kln) como acessórios.

### 4.3 GEOQUÍMICA

As análises químicas de amostras lavadas estão apresentadas na Tabela 4.1. Mostram que o nível de BC com maior quantidade de  $Al_2O_3$  em relação às demais litologias, com teores de  $Al_2O_3$  de 53,25%,  $SiO_2$  de 3,44%,  $Fe_2O_3$  de 8,62%,  $TiO_2$  de 1,33% e uma recuperação em #20 mesh de 77,52% de material retido. Os teores de  $Al_2O_3$  para BCBA e BA não refletem em sua totalidade com 57,25% e 54,56%, pois apresentam valores baixos de recuperação, em 55,13% e 27,99%, além de possuírem teores elevados de  $SiO_2$ , 7,02% e 11,09%, e menores teores de  $Fe_2O_3$  de 3,83% e 3,63% e  $TiO_2$  de 0,95% e 0,90%, respectivamente.

Para os níveis do topo do perfil a BNC apresenta melhores teores de  $Al_2O_3$  com 52,51%,  $SiO_2$  de 5,42%,  $Fe_2O_3$  de 11,69%,  $TiO_2$  de 1,36% e uma recuperação de 67,36%. O nível de BN apresenta teores de 48,74% de  $Al_2O_3$ , 7,43% de  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$  de 16,35%,  $TiO_2$  de 1,19%, com uma recuperação de 64,89%.

O nível de LF apresenta teores elevados de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  com 48,48%, e menores teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com 23,99%,  $\text{SiO}_2$  com 5,31% e  $\text{TiO}_2$  com 0,81%.

O nível de LF foi o que apresentou menor valor de perda por calcinação (PPC) com 16,60% em relação à BCBA que apresentou o maior valor com 29,31%. As demais litologias apresentaram valores de PPC: BC de 29,27%, BA de 28,31% e BN de 25,45%, BNC de 27,69%, valores estes relativamente próximos entre si. Estes valores refletem a quantidade de minerais hidratados na composição destes horizontes.

A umidade relativa se refere à capacidade que cada horizonte tem de reter água em subsuperfície em função de sua natureza friável e argilosa e seu cálculo é realizado pela diferença do peso da amostra *in situ* pela amostra posta em estufa a 100°C por um tempo determinado até a perda total desta umidade natural da amostra. A litologia que apresenta maior valor é a BA com 13,7 devido a sua composição essencialmente argilosa, seguida pela LF com 11,49 devido a maior existência de poros e vazios. Da maior para a menor umidade seguem a BN com 9,49, BCBA com 9,47, BNC com 8,27 e por último a BC com 5,07 devido principalmente a sua maior compactação em relação às demais litologias.

Os teores de alumina aproveitável (Alap) e de sílica reativa (Sire) são valores utilizados no controle do minério em relação ao seu aproveitamento no processo Bayer, pela converção o Al presente na bauxita em alumina metalúrgica; a Sire um valor de controle de consumo de ácido sódico, sendo este um insumo caro no processo de produção da alumina. A Sire é associada ao Si residual presente na caulinita. Para o controle de qualidade do minério se usam como valores ideais teores de Alap acima de 48% e de Sire abaixo de 4%, com uma recuperação mássica acima de 70%.

O nível de BC apresenta melhor teor de Alap em 53,25% com menor teor de Sire em 2,79%, seguido pela BCBA com Alap de 51,36% e Sire de 5,66%, BNC com Alap de 47,4% e Sire de 4,95%, BA com Alap de 44,24% e Sire de 9,87%, BN com Alap de 41,03% e Sire de 6,73% e LF com Alap de 23,99% e Sire com 4,46%.

Tabela 4.1 – Concentração química dos elementos maiores, PPC, Alap, Sire, REC a #20 mesh em porcentagem e umidade.

HORIZONTE	ÓXIDOS MAIORES (%)				PPC (%)	Total (%)	Alap (%)	Sire (%)	Umidade	REC 20# (%)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>						
<b>BN</b>	48,74	16,35	7,43	1,19	25,45	99,16	41,03	6,73	9,49	64,89
<b>BNC</b>	52,51	11,69	5,42	1,36	27,69	98,67	47,4	4,95	8,27	67,36
<b>LF</b>	23,99	48,48	5,31	0,81	16,6	95,19	23,99	4,46	11,49	65,28
<b>BC</b>	53,25	8,62	3,44	1,33	29,27	95,91	53,25	2,79	5,07	77,52
<b>BCBA</b>	57,25	3,83	7,02	0,95	29,31	98,36	51,36	5,66	9,47	55,13
<b>BA</b>	54,56	3,63	11,9	0,9	28,31	99,3	44,24	9,87	13,7	27,99

Observa-se no comportamento dos teores químicos dos horizontes litológicos das 864 amostras lavadas de bauxita que os teores de Alap e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são relativamente maiores nas litologias BNC e BC e diminuem na LF; a Sire e SiO<sub>2</sub> tendem a diminuir do topo para a base do perfil até a BC e aumentam na BCBA e BA; o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tende a aumentar significativamente na LF; o TiO<sub>2</sub> tende a aumentar na BNC e BC; a PPC tende a diminuir na LF e topo da BC; e a recuperação a #20 mesh tende a aumentar na BC e a diminuir drasticamente na base da BCBA e na BA, como demonstrado na Figura 4.22.

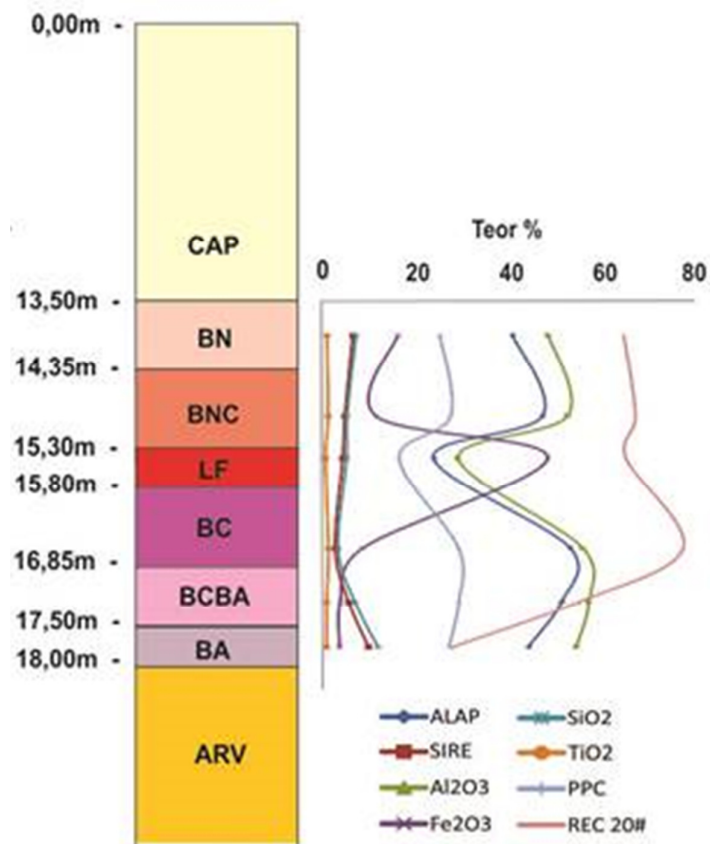


Figura 4.20 – Perfil com a distribuição dos teores médios dos óxidos maiores, PPC e Rec 20# das amostras lavadas de bauxita por horizontes litológicos (n = 864).

O comportamento dos teores químicos dos horizontes litológicos do furo de sondagem selecionado para análise de seus dados (FM-0012 – Figura 4.21) apresentam maiores teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nas amostras da base das litologias BNC e BC, com 56,84% e 57,31%, respectivamente nas amostras FM-004 e FM-007, estas amostras apresentam maior grau de compactação, como se pode observar na Figura 4.22, e as que possuem menores teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> uma esta localizada na base da BN com 47,56% e a outra é da LF com 32,03%, respectivamente das amostras FM-002 e FM-005, como demonstrado na Tabela 4.2.



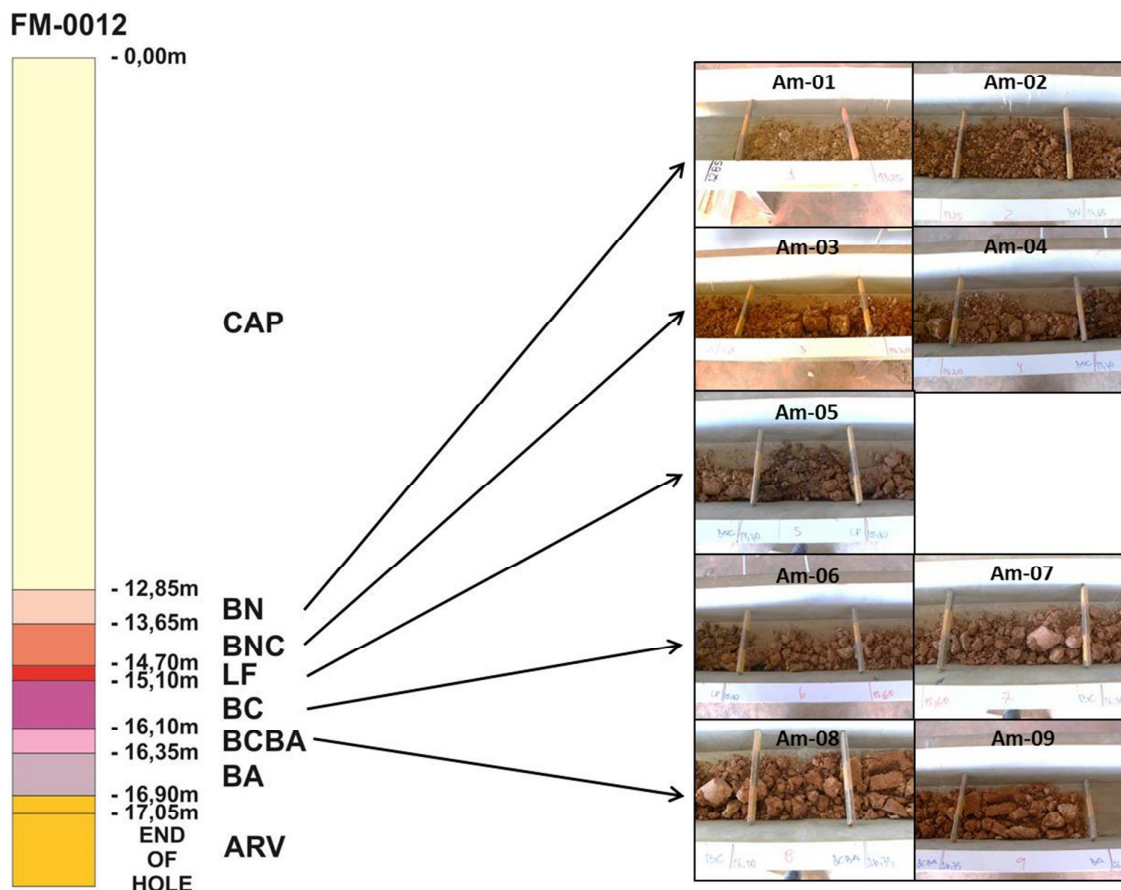


Figura 4.21 – Perfil do FM-0012 e as fotos dos intervalos amostrados para análise química.

Tabela 4.2 – Concentração química dos óxidos maiores, PPC, Alap, Sire, Rec a #20 mesh em porcentagem e umidade do FM-0012.

Amostra	Litologia	Espessura	Alap (%)	Sire (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	PPC (%)	Total (%)	Umidade	REC (%)
FM-0001	BN	0,40	48,39	5,63	55,50	6,98	6,59	1,30	28,78	99,14	10,08	65,13
FM-0002	BN	0,40	37,45	6,59	47,56	17,40	8,39	1,26	24,64	99,24	10,23	69,98
FM-0003	BNC	0,55	42,16	6,17	50,71	13,17	7,61	1,48	26,20	99,16	9,92	72,75
FM-0004	BNC	0,50	50,04	6,32	56,84	5,63	6,94	1,54	28,93	99,88	10,03	67,96
FM-0005	LF	0,40	26,42	4,04	32,03	44,48	5,67	0,81	17,98	100,99	13,15	65,63
FM-0006	BC	0,50	44,40	5,69	51,26	12,74	7,33	1,37	26,54	99,24	10,31	61,16
FM-0007	BC	0,50	51,78	3,66	57,31	5,95	5,50	1,27	29,50	99,53	6,34	72,83
FM-0008	BCBA	0,25	48,80	4,23	58,41	3,50	6,39	1,25	29,67	99,22	8,39	63,67
FM-0009	BA	0,55	37,12	11,52	52,35	3,65	16,73	1,05	24,52	98,30	17,23	25,96

Os teores de SiO<sub>2</sub> são menores nas amostras da base da BC e na LF, com 5,50% e 5,67%, respectivamente das amostras FM-007 e FM-005, sendo maior nas amostras do

horizonte de BA e da base da BN, com 16,73% e 8,39%, respectivamente das amostras FM-009 e FM-002, o que reflete a sua maior concentração de caulinita, como pode ser observado na Figura 4.21.

Os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  apresentam maior valor na amostra de LF com 44,48% (FM-005) e o de menor valor na amostra de BCBA e BA com 3,50% e 3,65%, respectivamente das amostras FM008 e FM-009. Nota-se que onde há uma diminuição ou acréscimo nos teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  há um acréscimo ou diminuição nos teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  das amostras do perfil do FM-0012, demonstrando uma relação inversamente proporcional entre eles (Figura 4.22).

Os teores de  $\text{TiO}_2$  não apresentam maiores relevância no perfil, onde se observa a maior concentração na amostra FM-004 referente a base da BNC com 1,54% e a amostra FM-005 referente a LF de menor concentração com 0,81%.

Os teores de Alap apresentam comportamento acompanhando a tendência dos valores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , onde se concentram nas amostras FM-004 a FM-008, com maior teor de 51,78% na amostra FM-006 de BC e a menor em 50,04% na amostra FM-004 na base da BNC, com exceção das amostras FM-005 de 26,42% referente a LF, e as amostras FM-001 a FM-003 com 48,39%, 37,45% e 42,16%, referentes aos horizontes superiores de BN e o topo da BNC e a amostra de BA com 37,12% do horizonte inferior do perfil.

A Sire apresenta menor valor na amostra FM-005 com 4,04% referente à LF e maior valor na amostra FM-009 com 11,52% referente a BCBA, sendo que nas amostras de BN e BNC os valores tendem acima de 6% e na BC e BCBA os valores tendem a serem menores que 6%.

A PPC apresenta valores menores na amostra de LF (FM-005) com 17,98%, sendo mais expressivo na amostra FM-008 com 29,67%, referente à BCBA. As amostras FM-001 e FM-002 de BN apresentam valores de 28,78% e 24,64%, amostras FM-004 e FM-005 de BNC com 26,20% e 28,93%, amostras FM-006 e FM-007 com 26,54% e 29,50% e a amostra FM-009 de BA com 24,52%. Estes valores refletem as quantidades de minerais hidratados presentes por amostra.

Os valores de umidade mais expressivos estão nas amostras FM-009 de BA e FM-005 de LF, com 17,23% e 13,15% respectivamente, devido aos poros e vazios da LF e devido aos

minerais com maiores poder de hidratação da BA. Os valores para as amostras de BN e BNC ficam em torno de 10%.

Os valores de recuperação mássica a #20mesh mais relevantes estão nas amostras FM-007 da base da BC e FM-003 do topo da BNC com 72,83% e 72,75% respectivamente, sendo a de menor valor a amostra FM-009 de BA com 25,96%, devido a sua natureza argilosa.

## 5 DISCUSSÕES

### 5.1 CORRELAÇÕES DE ESPESSURAS LITOLÓGICAS

As correlações entre os valores das espessuras dos níveis litológicos de BN, BNC e BN somado a BNC *versus* BC e a LF, demonstraram uma forte correlação negativa com R superior a 0,90 nos gráficos apresentados na Figura 5.1. As correlações entre (BN + BNC *vs.* BC) e (BN *vs.* BC) apresentaram uma forte correlação linear e as correlações entre (BNC *vs.* BC) e (BN + BNC *vs.* LF) apresentaram uma correlação linear moderada e algumas amostras com vieses em seus valores.

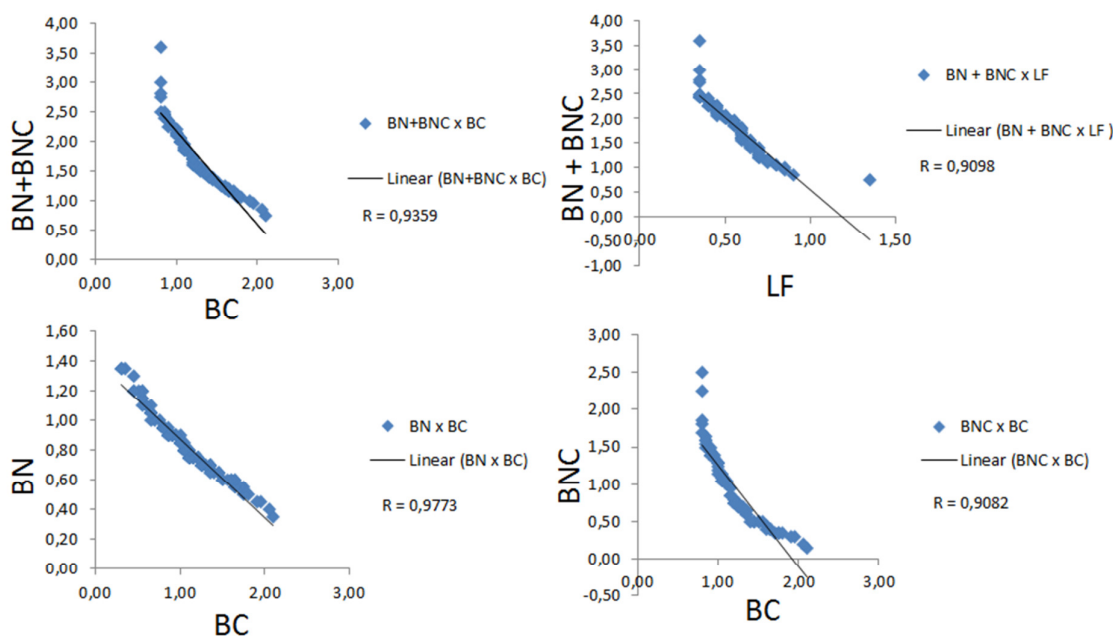


Figura 5.1 – Correlações das espessuras dos horizontes litológicos.

Este procedimento foi realizado utilizando a soma das amostras por litologias, definindo assim sua espessura por perfil ou furo de sondagem amostrado. A correlação direta realizada nos horizontes de menor valor no eixo Y (ordenada) pelo máximo de valor no eixo X (abscissa), verificou que as espessuras de BNC possuem uma tendência de serem maiores quando ocorre menor expressão das espessuras da BC e LF no mesmo perfil e nos perfis próximos.

## 5.2 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP)

Para o tratamento dos dados litoquímicos das amostras de sondagem foi utilizada a técnica de correlação multivariada da análise de componentes principais (ACP). Sendo uma técnica estatística de análise multivariada que transforma linearmente um conjunto original de variáveis, inicialmente correlacionadas entre si, num conjunto menor de variáveis não correlacionáveis que contenham a maior parte da informação do conjunto original (Hongyu *et al.* 2015).

A obtenção dos componentes principais é dada pela definição de fatores devido à repetição e divergência de dados, agrupando ou distanciando semelhanças quando houver como demonstrado na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Fatores gerados a partir dos dados litoquímicos das amostras de bauxita.

<b>Variável</b>	<b>Fator 1</b>	<b>Fator 2</b>	<b>Fator 3</b>	<b>Fator 4</b>
<b>ESP</b>	-0,017618	0,996779	0,078197	0,002383
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,631998	-0,010353	0,252023	0,732773
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-0,609383	0,020724	-0,421912	0,670979
<b>SiO<sub>2</sub></b>	-0,478456	-0,076773	0,867387	0,113251

De acordo com a tabela 4.3 os valores de maior relevância estão no fator 1 com as variáveis Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,632) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (-0,609), e no fator 3 com a variável SiO<sub>2</sub> (0,867).

As variáveis Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> apresentaram contribuições similares para o fator 1, devido a seus vetores estão mais próximos ao eixo do fator 1 (abscissa) e distantes do eixo do Fator 3, formam ângulos agudos entre essas variáveis. A variável SiO<sub>2</sub> não apresenta correlação pois forma um ângulo próximo de 90 graus com as outras variáveis, como demonstrado na Figura 5.2. A variável Espessura perde relevância por não ter um comprimento que se destaque do centro do diagrama.

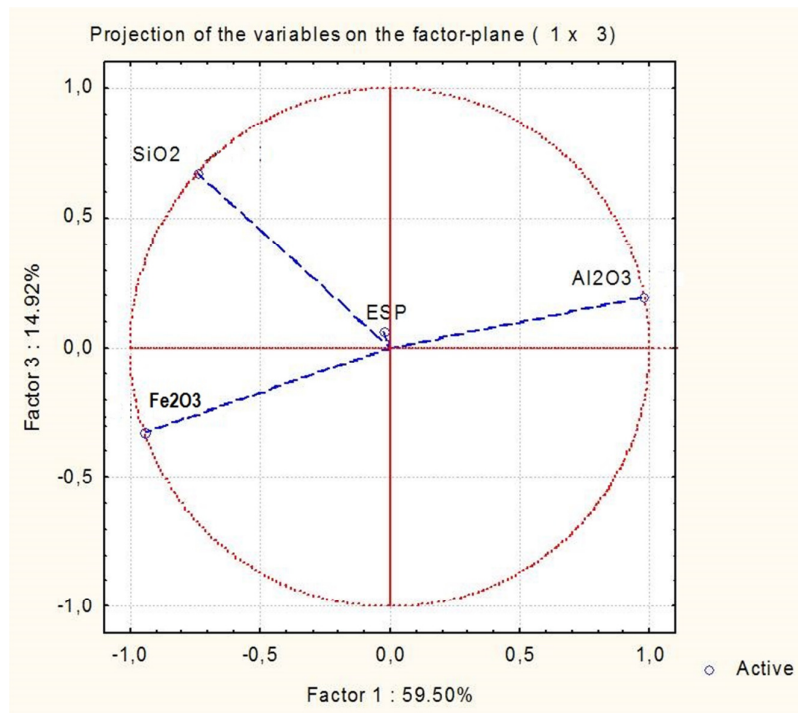


Figura 5.2 – Projeções das variáveis considerando os planos da correlação entre o Fator 1 *versus* Fator 3.

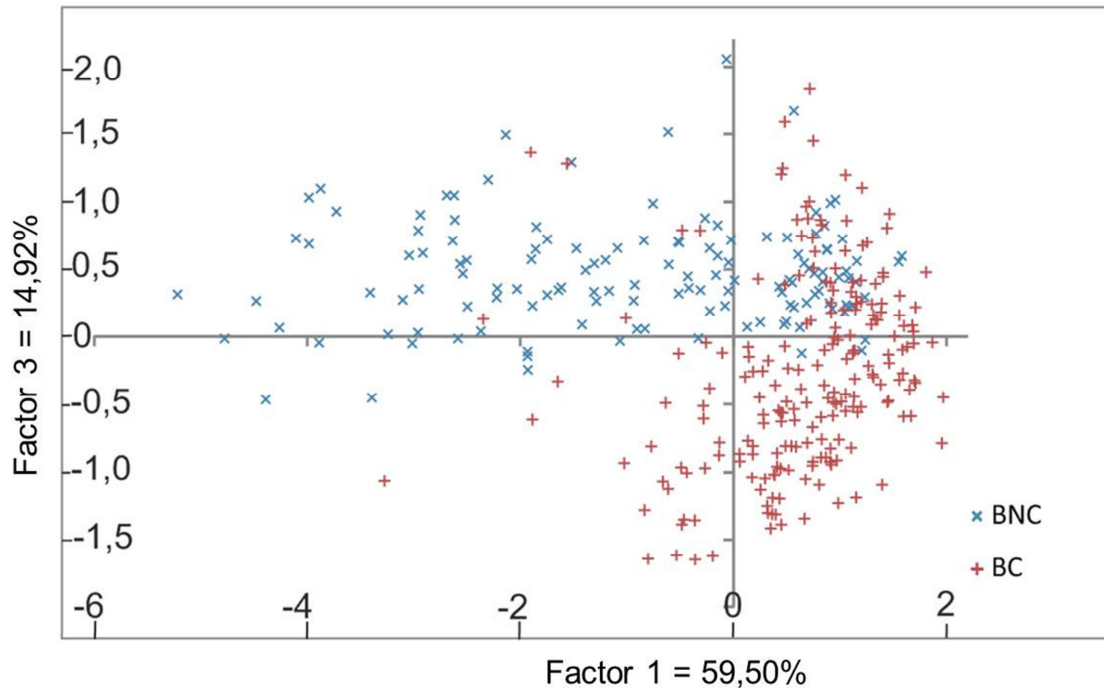


Figura 5.3 – Biplot Fator 1 *versus* Fator 3 com as componentes BNC e BC sobre suas variáveis litoquímicas.

Como os Fatores 1 e 3 explicam 74,42% da variação total dos dados (Fator 1 + Fator 3, Figura 5.3), é possível afirmar que parte da população das amostras de BNC do quadrante I, é correlacionável com as amostras de BC, porém outra parte da população das amostras de BNC do quadrante III e IV, não possuem correlação com a BC que se concentram no quadrante II.

Estas correlações demonstram que o desenvolvimento do nível superior de bauxitas nodulares pode estar associado também ao consumo do nível inferior de bauxitas originais preexistentes (1º Ciclo), onde o nível mais desenvolvido de BC e LF fornecem “nutrientes” químicos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) para o desenvolvimento de um novo ciclo de bauxitas como citado por Millot, 1964; Boulangé *et al.*, (1997), ou seja, sua origem a partir da degradação de bauxitas estando relacionadas a um 2º ciclo de lateritização regional.

### 5.3 PROPOSTA DO MODELO DE EVOLUÇÃO DAS BAUXITAS 1

A primeira proposta do modelo de evolução sobre a gênese do nível superior de bauxitas nodulares do depósito laterítico-bauxítico do platô Miltônia-3, no distrito bauxítico de Paragominas foi desenvolvido considerando a sua origem a partir da degradação das bauxitas originais (1º Ciclo de formação), relacionadas a um 2º Ciclo de Lateritização (Bauxitas degradadas; Millot, 1964; Boulangé *et al.* 1997), como demonstrado na Figura 5.4.

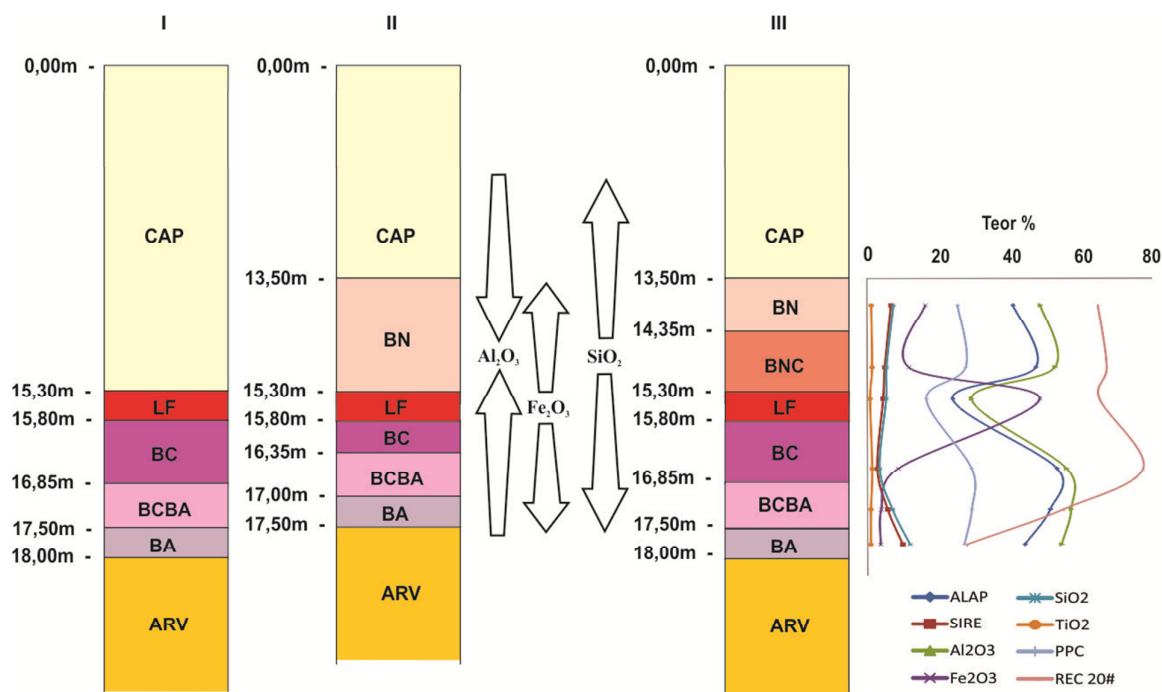


Figura 5.4 – Modelo de Evolução das Bauxitas I da região de Paragominas – PA, em três etapas evolutivas, onde as setas indicam o sentido do aumento dos teores de  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  e  $SiO_2$ , a partir dos horizontes de BN/BNC e LF.

O modelo 1 proposto consiste nas seguintes etapas de evolução:

I – A preexistência de um horizonte bem definido de bauxita matura, sobreposto pela LF, que posteriormente foi recoberto por argila caulinítica (Argila de Belterra) que veio a servir de uma das fontes de Al para o desenvolvimento deste novo nível nodular imposto;

II – O desenvolvimento deste novo horizonte de bauxita nodular (BN) ocorreu por processo de coalescência, pela junção da fase aluminosa residual resultante da migração de elementos como o Fe e Si, em solução para fora deste nível, e pela migração do Al dos níveis vizinhos acima (capeamento argiloso - CAP) e abaixo deste (laterita ferruginosa - LF) e da bauxita concrecionária (BC) localizada abaixo da LF, preservando e concentrando *in situ* os



elementos como Al e O, além de Si residual, permitindo o desenvolvimento e concentração em larga escala da gibbsita preferencialmente e secundariamente a caulinita;

III - Com a contínua evolução deste nível bauxítico nodular (BN) observa-se um amadurecimento da porção basal deste nível, formando uma bauxita nodular concrecionária (BNC) onde seus nódulos estão intercrescidos, se conectando localmente e desenvolvendo um nível mais maturo e compacto, consumindo os níveis vizinhos acima da BN, bem como os níveis abaixo de LF e BC, até o total consumo destes níveis, como citado por Dennen & Norton (1977), Grubb (1979), Boulangé *et al.*, (1997) e Kotschoubey, *et al.* (2005).

#### 5.4 PROPOSTA DO MODELO DE EVOLUÇÃO DAS BAUXITAS 2

Esta segunda proposta do modelo de evolução sobre a gênese do nível superior de bauxitas nodulares (BN) do depósito laterítico-bauxítico do platô Miltônia-3, no distrito bauxítico de Paragominas foi desenvolvida considerando sua origem no 2º Ciclo de Lateritização, porém a partir de uma deposição sedimentar posterior sobre o perfil laterítico do 1º Ciclo (Kotschoubey & Truckenbrodt, 1981; Kotschoubey, *et al.* 2005), como demonstrado na Figura 5.5, que consiste em:

I – A exposição de uma rocha fonte como um plúton granitóide (Granito Cantão, Japiim, Jonasa, Ourém e Ney Peixoto do Neoproterozóico), gnaiss (embasamento cristalino arqueano) ou sedimentos siliciclásticos (Formações Itapecuru e Ipixuna do Cretáceo Superior), cuja degradação intempélica possibilitou a geração de sedimentos de natureza argilosa preferencialmente caulínica durante o Paleógeno até o início do Oligoceno?, segundo Kotschoubey, *et al.* (2005);

II – Ocorreu a migração de elementos em solução como o Fe, Si, Ca, Na, etc. para fora deste nível, preservando e concentrando *in situ* os elementos como o Al e O, além do Si residual, favorecendo o processo de coalescência e permitindo a junção da fase aluminosa residual, concentrando em larga escala preferencialmente o mineral gibbsita e secundariamente a caulinita, fechando o primeiro ciclo de formação de bauxita;

III e IV – Houve primeiramente um movimento tectônico de soerguimento, seguido por processos erosivos que possibilitaram a exposição deste perfil bauxítico anteriormente formado, sob clima sazonal, com abundância de água meteórica e intensa insolação se intercalando, permitindo em superfície o desenvolvimento de uma crosta laterítica ferruginosa (Kotschoubey, *et al.* 2005). Esta crosta laterita ferruginosa de ocorrência regional marca um hiato entre os ciclos de formação destas bauxitas;

V – Novamente teve uma movimentação tectônica regional, porém de rebaixamento, que possibilitou a deposição de novos sedimentos de origem siliciclástica, oriundos da exposição de corpos granitoides, ou do embasamento gnáissico, ou de sedimentos siliciclásticos pretéritos, que serviram de rocha fonte para um novo ciclo de formação de bauxita durante o Mioceno Superior, segundo Kotschoubey, *et al.* (2005). Podem ser as mesmas rochas cuja degradação física e química forneceram os sedimentos para o 1º ciclo de formação de bauxitas;

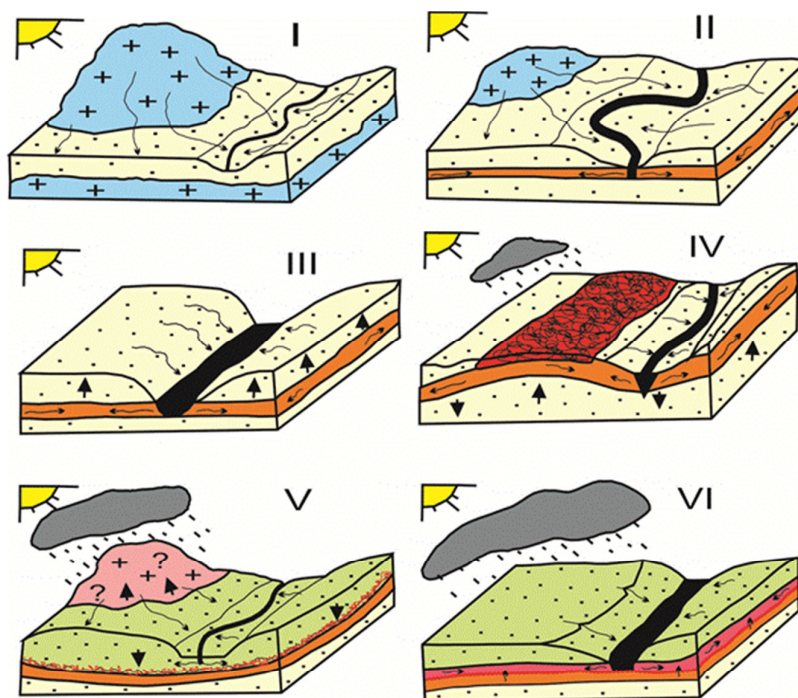
VI – Repetindo o processo da etapa II com a migração de elementos em solução como o Fe, Si, Ca, Na, etc. para fora deste nível, preservando *in situ* os elementos como Al e O, além do Si residual, favorecendo o processo de coalescência ocasionando a junção e concentração da fase aluminosa residual, permitindo o desenvolvimento em larga escala preferencialmente do mineral gibbsita e secundariamente a caulinita, fechando o segundo ciclo de formação de bauxitas nodulares (BN e BNC).

Com a contínua evolução do perfil bauxítico observa-se um amadurecimento da porção basal deste segundo ciclo, formando uma bauxita nodular concrecionária (BNC) cujos nódulos estão intercrescidos, se conectando e desenvolvendo um horizonte mais maturo, compacto e por vezes consumindo os níveis vizinhos acima de BN e os níveis abaixo de LF e BC, até o total consumo destes, como citado por Dennen & Norton (1977), Grubb (1979), Boulangé *et al.*, (1997) e Kotschoubey, *et al.* (2005).

Segundo Kotschoubey, *et al.* (2005), este manto residual mais recente é exclusivamente ferruginoso e o processo de bauxitização ocorreu em ciclos distintos, sendo o primeiro ciclo restrito a períodos do Paleógeno até o início do Oligoceno? e o segundo ciclo no final do Oligoceno – início do Mioceno, não se repetindo mais em ciclos por não ter condições favoráveis para o desenvolvimento de tal processo repetidas vezes.

O registro da sílica residual preservada na caulinita e nos fragmentos sedimentares como um protólito estão presentes neste nível nodular-concrecionário, como observado em escala microscópica e na mineralogia destas bauxitas.

Conforme citado por Boulangé *et al.* (1997) as bauxitas são oriundas da degradação intempérica de rochas parentais, sob condições climáticas, drenagens favoráveis a remoção total dos elementos álcalis e terras raras, enquanto que o Si é lixiviado parcialmente ou totalmente, gerando a gibbsita pelo Al remanescente e o Si residual combina com o Al formando caulinita.



**LEGENDA:**













-  Clima predominantemente Árido a Semi Árido
-  Clima predominantemente Tropical Húmido
-  Drenagem - Águas superficiais
-  Fluxo de água em subsuperfície - lençol freático
-  Subsidência / Soerguimento - Neotectonismo?
-  Rocha de origem ácida rica em Plg + K-Fd + Si - 1° Fonte de sedimentos
-  1° Geração de Sedimentos Siliciclásticos - argilo-arenosos rico em Caulim
-  1° Geração de Bauxita
-  Laterita Ferruginosa
-  Rocha de origem ácida rica em Plg + K-Fd + Si - 2° Fonte de sedimentos
-  2° Geração de Sedimentos Siliciclásticos - argilo-arenosos rico em Caulim
-  2° Geração de Bauxita

Figura 5.5 – Modelo de Evolução das Bauxitas II da região de Paragominas-PA.

## 6 CONCLUSÕES

Com base no conhecimento obtido através dos estudos realizados, amostras coletadas em campo e base de dados de sondagem, com mineralogia baseada na petrografia em escala macro e micro, além de considerações geoquímicas e tratamento estatístico dos dados da mina de Miltônia-3 da Província Bauxitífera de Paragominas, conclui-se:

As terminologias aqui apresentadas foram atualizadas com o intuito de melhorar a caracterização dos níveis litológicos, onde CAP é capeamento argiloso, BN é bauxita nodular, BNC é bauxita nodular concrecionária, LF é laterita ferruginosa, BC é bauxita concrecionária, BCBA é bauxita concrecionária com bauxita argilosa, BA é bauxita argilosa e ARV é argila variegada, de forma a se obter um melhor entendimento com base mineralógica e textural.

As propostas dos modelos de formação da BN e BNC estão alinhadas de acordo com os dados levantados, onde se propôs no primeiro modelo sua origem a partir da degradação de um horizonte de bauxita pré-existente - Bauxitas degradadas (Milot, 1964; Boulangé *et al.* 1997), e no segundo modelo sua origem em um 2º Ciclo de Lateritização, porém a partir de uma deposição sedimentar posterior sobre o perfil laterítico pré-existente do 1º Ciclo de Lateritização (Kotschoubey & Truckenbrodt, 1981; Kotschoubey, *et al.* 2005).

As amostras apresentam paragênese mineralógica típica das bauxitas da região de Paragominas com gibbsita, caulinita, Al-goethita, Al-hematita, hematita, goethita, limonita, ilmenita, anatásio e raros zircões, variando suas concentrações nos horizontes estudados.

No horizonte de BNC a gibbsita fica evidenciada pela ocorrência primária nos nódulos, secundariamente no cimento que forma a matriz do horizonte, interconectando por vezes com nódulos de bauxita, na fração argila predominantemente gibbsítica-caulinítica, e como visualizado na micro-mineralogia, preenchendo pseudos-vazios, fissuras e *cutans*.

As análises químicas demonstraram na BNC uma tendência de enriquecimento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , um empobrecimento de  $\text{SiO}_2$  em relação aos horizontes acima de BN e abaixo de LF, os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  tendem a diminuir na BNC e a aumentar na BN, sendo sua maior expressão de destaque na LF.

O estudo comparativo das espessuras do horizonte de BNC em relação às espessuras dos demais horizontes de BN, LF e BC, notou-se que onde a espessura da BNC é maior, as espessuras dos demais horizontes são menores e vice-versa, mantendo uma relação

inversamente proporcional, como observado regularmente nas frentes de lavra abertas na mina de Milônia-3. As correlações entre os valores das espessuras dos níveis litológicos de BN, BNC e BN somado a BNC *versus* BC e a LF, demonstraram uma forte correlação negativa com R superior a 0,90 nos gráficos apresentados.

O estudo da Análise dos Componentes Principais demonstrou que parte da população de amostras de BNC está associada ao consumo do horizonte de BC. As variáveis  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$  apresentaram contribuições similares, devido a seus vetores estarem mais próximos ao eixo do fator de relevância (fator 1). A variável  $SiO_2$  não apresenta correlação pois forma um ângulo próximo de 90 graus com as outras variáveis.

O procedimento de estatística descritiva é parte de um processo maior de *Quality Assurance and Quality Control* (QAQC), para validar o banco de dados dos modelos geológicos e de blocos utilizados na cubagem do minério de bauxita. Neste trabalho este processo é apresentado para reforçar a qualidade das análises químicas disponibilizadas pela empresa Hydro Paragominas S.A.

## REFERÊNCIAS

- Aleva G.J.J. 1981. Essential differences between the bauxite deposits along the Southern and Northern edges of the Guiana shield, South America. *Econ. Geol.*, 76: 1142-1152.
- Assad R. 1973. Depósitos de bauxita da região de Paragominas, Pará. In: 27º SBG, Cong. Bras. Geol., *Resumo das Comunicações*, v.1, p. 24-25.
- Assad R. 1978. Depósito de bauxita na Amazônia. In: 30º SBG. Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, 1978. *Anais...* Recife, V. 6, p. 2511-2519.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Agregados-determinação da abrasão "Los Angeles"* - método de ensaio. NBR 6465. Rio de Janeiro. 1982.
- Bardossy G. & Aleva G.J.J. 1989. The Amazon basin. A discussions review. *Travaux ICSOBA*, 19: 445-458.
- Bizzi L.A., Schobbenhaus C., Vidotti R.M., Gonçalves J.H. 2003. *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG: CPRM – Serviço Geológico do Brasil*. 692 p.
- Bocquier, G., Muller, J.P., Boulangé, B. 1984. Les latérites. Connaissances et perspectives actuelles sur les mécanismes de leur différenciation. *Livre Jubilaire du Cinquantenaire de l'AFES*, Paris, [S.l.:s.n], p. 123-138.
- Boulangé B., Ambrosi J.P., Nahon. D. 1997. *Soils and sediments*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag. p. 49-65.
- Boulangé B. & Carvalho A. 1989. The genesis and evolution of Porto Trombetas bauxite deposits in the Amazon Basin, Pará, Brazil. *Travaux ICSOBA*, 19: 71-80.
- 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. 75-106.
- Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). Planejamento de Lavra. 2006. *Relatório interno*. Paragominas, 124 p.
- Costa M. L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazonia. *Revista Brasileira de Geociências*, Brasil, 21(12): 146-160.
- 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*, Elsevier Ltd., 146: 58-74.
- Dennem W.H. & Norton H.A. 1977. Geology and geochemistry of bauxite deposits in the lower Amazon basin. *Econ. Geol.*, 72: 82-89.
- Góes A.M. 1981. *Estudo sedimentológico dos sedimentos Barreiras, Ipixuna e Itapecurú, no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão*. DS Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 55 p.

- Góes A. M.. 1995. *A formação Poti (Carbonífero Inferior) da Bacia do Parnaíba*. TS Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar, USP, Instituto de Geociências. São Paulo-SP, 171p.
- Góes A.M. & Coimbra A.M. 1996. Bacias sedimentares da Província Sedimentar do Meio-Norte do Brasil. *In: 5º SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia. Boletim de Resumos Expandidos...* Belém, p. 186-187.
- Góes A. M. & Rossetti D.F. 2001. Gênese da Bacia de São Luís-Grajaú, Meio-Norte do Brasil. *In: Rossetti D.F., Góes A.M., Truckenbrodt W. (eds.). O Cretáceo de São Luís-Grajaú*. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi, p. 15-30.
- Grubb P.L.C. 1979. Genesis of bauxite deposits in the lower Amazon basin and Guianas coastal plain. *Econ. Geol.* **74**(4): 735–750.
- Hongyu K., Sandanielo V.L.M., Oliveira Jr. G.J. 2015. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *E&S – Engineering and Science*, **1** (5): 83-90.
- Hydro Paragominas S.A. Gerência de Geologia 2014. *Relatório da atividade de sondagem*. 28p. (Relatório Interno).
- Kotschoubey B. 1988. Geologia do alumínio. *In: Schobbenhaus C. & Coelho C. E. S. (cords). Principais depósitos minerais do Brasil*. Brasília, DF, DNPM, v. III, (metais básicos não-ferrosos, ouro e alumínio) p. 599-619.
- Kotschoubey B. & Truckenbrodt W. 1981. Evolução poligenética das bauxitas dos distritos de Paragominas-Açailândia (Estado do Pará e Maranhão). *Revista Brasileira de Geociências*, **11** (3): 193-202.
- 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, FADESP, ORSTOM. P. 75-106.
- Kotschoubey B., Calaf J. M. C., Lobato A. C. C., Azevedo C. H. D. 2005. Caracterização e Gênese dos depósitos de bauxita da Província Bauxitífera de Paragominas, Noroeste da Bacia de Grajaú, Nordeste do Pará/Oeste do Maranhão. *In: Marini Onildo João et al. (orgs.). Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília,DF, DNPM-CT Mineral, ADIMB, p. 613-698.
- Krauskopht K. B. 1972. *Introductio to geochemistry*. Auckland, McGraw-Hill Book Company, 618 p.
- Kronberg B.I., Couston J.F., Stilianidi B., Fyfe W.S., Nash R.A., Sugden D. 1979. Minor element geochemistry of the Paragominas bauxite. *Econ.Geol.*, **74**(8): 1869 – 1875.
- Kronberg B.I., Fyfe W.S., Mckinnon B.J., Couston J.F., Stilianidi B., Nash R.A. 1982. Model for bauxite formation: Paragominas (Brazil). *Chem.Geol.*, **35** (3-4): 311 – 320.
- Krook L. 1979. *Sediment petrographical studies in Northern Suriname*. Amsterdam, the Netherlands, Academisch Proefschrift, Vrije Universiteit te Amsterdam, the Netherlands, 154 p.
- Loughnen F.C.1969. *Chemical weathering of the silicate minerals*. New York, Elsevier.154 p.



- Lucas Y. 1989. *Systèmes pédologiques em Amazonie brésilienne. equilibres, déséquilibres et transformations*. TS Doutorado, Université de Poitiers, France, 157 p.
- 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. 107-136.
- Lucas Y., Kobilsek B., Chauvel A. 1989. Structure, genesis and present evolution of Amazonian bauxites developed on sediments. *Travaux ICSOBA*, 19: 81-94.
- Millot, G. 1964. *Geologie des argiles*. Masson, Paris, p. 499.
- Nascimento M.S., Góes A.M., 2005. Distribuição estratigráfica e proveniência de minerais pesados das Formações Ipixuna e Barreiras, região do Rio Capim, sul da Sub-bacia de Cametá. *Revista Brasileira de Geociências*, 35: 49-58
- Petri, S.; Fúlfaro, V. J. *Geologia do Brasil (Fanerozóico)*. São Paulo: T.A. Queiroz: Ed. da Universidade de São Paulo, 1983, 631p.
- Rossetti D. F., 2001. Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes. *Jour. South American Earth Sciences*, 14: 77-89.
- Rossetti D.F., 2004. Paleosurfaces from northeastern Amazonia as a key for reconstructing paleolandscapes and understanding weathering products. *Sedim. Geol.*, 169:151-174.
- Rossetti D. F. & Truckenbrodt W, 1997. Revisão estratigráfica para os depósitos do Albiano-Terciário Inferior(?) na Bacia de São Luís, Maranhão. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, Ciências da Terra, 9: 29-41.
- Santos M.E.C.M. & Carvalho M.S.S. 2009. *Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luiz*. Rio de Janeiro, CPRM Serviço Geológico do Brasil – DGM/DIPALE. 215 p.
- Santos Jr. A.E. & Rossetti D.F. 2003. Paleoambiente e estratigrafia da Formação Ipixuna, área do Rio Capim, leste da Sub-bacia de Cametá. *Revista Brasileira de Geociências*, 33: 313-324
- Sombroek W.G. 1966. Amazon soils. A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region. Wageningen, Holland. *Centre por Agric. Publ. Document*. 292 p.
- Towse D. & Vinson P.E. 1959. Lateritas aluminosas do Baixo Amazonas. *Eng. Miner. Metal.*, 30 (177): p. 133-135.
- Truckenbrodt W. & Kotschoubey B. 1982. Alguns aspectos micromorfológicos das bauxitas na parte leste da região Amazônica. In: 32º SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador, 1982. *Anais...* v. 2, p. 695-701.
- Wolf F.A. M., 1972. *Bauxita na Amazônia*. Belém, MME/DNPM – 5º Distrito. 46p.
- Wolf F.A. M. & Silva J.M.R., 1973. *Província Bauxitífera da Amazônia*. Belém, MME/DNPM – 5º Distrito. 35p.