

INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE

ITV

Curso de Mestrado Profissional

(pós-graduação *stricto sensu*)

“Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais”

**GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS LACUSTRES COM SUBSTRATO
LATERÍTICO DA SERRA BOCAINA, AMAZÔNIA: IMPLICAÇÕES
PARA O ENTENDIMENTO DA SEDIMENTAÇÃO, INTEMPERISMO E
PROVENIÊNCIA**

Aline Mamede de Moraes

Belém

2018

Aline Mamede de Moraes

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca do ITV – Belém-PA

M827 Moraes, Aline Mamede de
Geoquímica de sedimentos lacustres com substrato laterítico da Serra Bocaina, Amazônia: implicações para o entedimento da sedimentação, intemperismo e proveniência. / Aline Mamede de Moraes. Belém-PA: Instituto Tecnológico Vale, 2018.
79 f.: il.

Dissertação (mestrado) – Instituto Tecnológico Vale, 2018.
Orientador: Dr. Prafulla Kumar Sahoo.
Co-Orientador: Dr. José Tasso Felix Guimarães.

1. Geoquímica - Laterítico. 2. Sedimentação. 3. Serra da Bocaina – Carajás (PA). I. Título.

CDD 23. Ed. 552.509811

Bibliotecária responsável: Nisa Goncalves

CRB 2 - 525

ALINE MAMEDE DE MORAES

**GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS LACUSTRES COM SUBSTRATO
LATERÍTICO DA SERRA BOCAINA, AMAZÔNIA: IMPLICAÇÕES
PARA O ENTENDIMENTO DA SEDIMENTAÇÃO, INTEMPERISMO E
PROVENIÊNCIA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais, área de Ciências Ambientais, do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV).

Data da aprovação:

Banca examinadora:

Dr. Prafulla Kumar Sahoo
Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dr. José Tasso Felix Guimarães
Co-Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dr. Roberto Dall'Agnol
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dr. José Francisco Berrêdo Reis da Silva
Membro externo – Museu Paraense Emilio Goeldi (MPEG)

*Aos meus maiores incentivadores:
Manoel Moraes, Anaíde Mamede,
Alexandre López.*

AGRADECIMENTOS

À minha família, Manoel Moraes, Anaíde Moraes, Murilo Moraes por todo suporte e apoio que me foi dado durante esses quase dois anos de dedicação ao mestrado.

Ao meu parceiro de vida Alexandre Lopéz que sempre esteve do meu lado me dando tudo que foi necessário durante toda essa jornada, principalmente muita paciência e amor.

Ao Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITVDS), que com sua infraestrutura, laboratórios e excelente quadro docente forneceram o suporte necessário.

Ao projeto Paleoclima, que me concedeu bolsa de mestrado, e liderado pelo professor Dr. Tasso Guimarães que com sua orientação possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao grande professor Dr. Roberto Dall'Agnol que com toda sua experiência e competência, em nenhum momento se negou em me direcionar e aconselhar.

Aos meus queridos amigos e colegas, que ganhei durante essa aventura do mestrado, obrigada pela amizade, companheirismo e contribuições que me foram dadas, com certeza somaram muito no crescimento da minha vida acadêmica e profissional.

Aos grandes amigos Alessandro Leite e Gabriel Salomão, que do início ao fim não exitaram em me ajudar com ideais sensacionais.

A minha grande amiga e excelente geóloga Ivinny Barros que de longe, no seu mestrado em São Carlos me ajudou em todos os momentos.

Ao meu orientador prof. Dr. Prafulla Sahoo, que desde o início nos primeiros contatos se mostrou inteiramente disponível, acessível e super entusiasmado em fazer essa parceria comigo e me forneceu todo conhecimento possível para que atingíssemos o objetivo final, muito obrigada por esse grande conhecimento acadêmico compartilhado comigo.

Finalizo então com meu sincero obrigada a todos os envolvidos.

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.”

Walter S. Landor

RESUMO

A presente pesquisa utilizou a avaliação estatística de dados geoquímicos dos sedimentos de lagoas e do material da área de captação da Serra do Bocaina, para identificar a assinatura geoquímica dessas lagoas, conhecer a implicação das rochas fontes no sedimento e também sua proveniência, o intemperismo e os processos sedimentares atuantes na bacia e a relação entre cada lagoa. Foram comparados os resultados dos dados brutos, transformados por $\log_{10}$ e por *centred log-ratio transformation* (clr). As análises estatísticas, descritivas e multivariadas foram realizadas utilizando-se o software R[®] para os 47 elementos selecionados. Para as amostras de sedimento, os elementos maiores e menores foram avaliados por Espectrometria de Emissão Ótica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES), enquanto que, os elementos traços, incluindo os terras raras (ETR), foram analisados por Espectrometria de Massa por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS). Para as amostras de rocha e solo os elementos maiores e menores foram analisados por Fluorescência de Raio-X (FRX) e traços ICP-MS. A intensidade do intemperismo foi deduzida a partir do Índice de alteração química (CIA) associado à avaliação do diagrama ternário (A–CN–K), e dos índices MIA – Índice de alteração máfica e IOL – Índice de Lateritização/Intemperismo e outros índices. As composições dos sedimentos foram normalizadas em relação a crosta continental superior (CCS) e mostraram grande enriquecimento em Ti, P, Cr, Se, V e Cu, moderados em Al, Fe, Sc, Th, Cu e Ga e fraco nos ETR, possivelmente refletindo a litologia da área de captação. Em geral, a distribuição dos elementos é semelhante nas quatro lagoas, sendo a ordem decrescente de abundância $Si > Al > Fe > Ti$. No entanto, as lagoas LB1 e LB2 mostraram maior semelhança entre si, assim como LB3 com LB4, visualizado também no gráfico de normalização em relação ao condrito. A análise de componentes principais (PCA) revelou quatro principais agrupamentos geoquímicos nos dados de sedimento clr: 1) Al-Ga-Cr-V-Ti-Nb, indicativos de rochas máficas; 2) Hf-Zr, juntos dos ETR pesados (ETRP), que correspondem aos minerais que resistiram ao intenso intemperismo; ETR leves (ETRL) que representam dentro dos ETR o grupo que foi retrabalhado e mobilizado pelos minerais; 3) Grupo de K₂O e Rb, ligado aos feldspato; e 4) Porção controlada pela matéria orgânica, representada por P.F (perda ao fogo)-Hg-Se-TOC-TS-As-Pb. A assinatura detríticas nos sedimentos (grupos 1 e 3), foi similar a das rochas da bacia (grupo 1 e 3). A análise linear discriminante (LDA) e de PCA de todas as amostras, indicou

que os sedimentos não são derivados diretamente das formações ferríferas bandadas (FFB) e sim de lateritas enriquecidas em Al provenientes do intemperismo de rochas metavulcânicas.

Palavras-chave: Lagoas de platô. Estatística multivariada. Geoquímica sedimentar. Proveniência. Intemperismo. Amazônia. Serras dos Carajás.

ABSTRACT

The present research used the statistical evaluation of the geochemical data of the sediments of the lakes and the material of the catchment area of the Serra do Bocaina, to identify the geochemical signature lake sediments and their link with source rocks, as well as their origin, weathering and the sedimentary processes in the basin and the relationship between each lakes. The raw geochemical data were transformed by log10 and centred log-ratio transformation (clr). Statistical, descriptive and multivariate analyzes were performed using the R® software for the 47 selected elements. For the sediment samples, the minor and major elements were measured by Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES), while trace elements, including rare earths (REE), were analyzed by Mass Spectrometry Inductively Coupled Plasma (ICP-MS). For the rock and soil samples the minor and major elements were analyzed by X-Ray Fluorescence (FRX) and ICP-MS traces. The intensity of the weathering was deduced from the index of chemical alteration (CIA) associated to the evaluation of the ternary diagram (A-CN-K), and the indexes MIA - Alteration index and IOL - Index of Lateritization / Weathering and other indices. The sediment compositions were normalized to the upper continental crust (UCC) and showed high enrichment in Ti, P, Cr, Se, V and Cu, moderate in Al, Fe, Sc, Th, Cu and Ga and weak in the REE, possibly reflecting the lithology of the catchment area. In general, the distribution of the elements is similar in the four lakes, with the descending order of abundance $Si > Al > Fe > Ti$. However, LB1 and LB2 lakes showed greater similarity to each other, as did LB3 with LB4, also visualized on the standardization graph in relation to the chondrite. The principal components analysis (PCA) revealed four main geochemical clusters in the clr: 1) Al-Ga-Cr-V-Ti-Nb sediment data, indicative of mafic rocks; 2) Hf-Zr, together with Heavy Rare Earth Elements (HREEs), which correspond to the minerals that withstood the intense weathering; Light Rare Earth Elements (LREEs), which represent the group that was reworked and mobilized by REEs contained in minerals; 3) K₂O and Rb group, bound to feldspar; and 4) Portion controlled by organic matter, represented by LOI (Loss on ignition)-Hg-Se-TOC-TS-As-Pb. The sediment signature (groups 1 and 3) was similar to that of basin rocks (groups 1 and 3). The linear discriminant analysis (LDA) and PCA of all the samples indicated that the sediments are not derived directly from the BIF, but from Al enriched laterites from the weathering of metavulcanic rocks.

Key-words: Upland Lakes. Multivariate statistic. Sediment geochemistry. Provenance. Weathering. Serra dos Carajás.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. A) Localização da Serra Bocaina, Parque Nacional dos Campos Ferruginosos. B) Localização das lagoas estudadas. C) Visão em detalhe de LB4.....	19
Figura 2 – Mapa simplificado da geologia regional da Serra Bocaina.....	21
Figura 3 – Fluxograma da metodologia utilizada com cada etapa percorrida	30
Figura 4 – A) Localização do ponto central de coleta do perfil e amostras do substrato na lagoa LB4. B) Demonstração das profundidades (cm) selecionadas para as análises geoquímicas em cada um dos perfis sedimentares.....	32
Figura 5 – Boxplot para representar o cálculo de precisão, para os óxidos, elementos traço e ETRs considerando percentual de diferença entre as duplicatas e limite de $\pm 15\%$. (RPD) Relative Percent Difference.....	38
Figura 6 – Edaplot e QQ-plot para SiO_2 e Zr, mostrando a distribuição desses elementos nos diferentes tipos de dados. a) Dados brutos, b) Dados com $\log_{10}$, c) Dados com clr	43
Figura 7 – Gráficos Boxplot das concentrações nos sedimentos de SiO_2 , TOC, Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , P_2O_5 , ETRs e Zr, da Crosta Laterítica aluminosa (Al-Crosta) em cada lagoa com indicação dos valores de referência das Formações Ferríferas Bandadas (FFB), da Crosta continental superior (CCS), e Crosta Ferruginosa (Fe-Crosta) das Três Irmãs (SAHOO et al., 2017).....	44
Figura 8 – A) Gráfico com os valores sedimentares normalizados por Crosta continental superior (CCS) para os elementos maiores (wt. %), traço e ETRs (mg/kg). B) Amostras de sedimento (n=44), crosta laterítica (LC) (n=14), solo (n=2) e Formações Ferríferas Bandadas (FFB), também normalizadas por CCS.....	47
Figura 9 – a) A-CN-K gráfico triangular da porção molar de Al_2O_3 -($\text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O}$)- K_2O (modificado de Nesbitt e Young, 1984; Fedo et al., 1995). b) Diagrama ternário de Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2 , mostrando a classificação do material da bacia de contribuição e sedimentos (Schellmann, 1981, 1986), juntamente com os níveis de intemperismo Index of laterization (IOL) (modificado de Schellmann, 1986; Babechuk et al., 2014).....	50
Figura 10 – Classificação geoquímica dos sedimentos das lagoas baseado no $\log_{10} (\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ versus $\log_{10} (\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ (Adaptado de Herron, 1988).....	51
Figura 11 – Matriz de correlação com o coeficiente de Spearman para todos os elementos dos dados de sedimento brutos, onde os quadrados marcados com (x) indicam os valores de correlação insignificantes.....	53

Figura 12 – Matriz de correlação com coeficiente de Spearman para os dados de sedimento, sendo: a) Dados transformados por log10 e b) Dados transformados por centered log transformation (clr).....	54
Figura 13 – Matriz de correlação com coeficiente de Spearman para dados de rocha transformados por centered log transformation (clr).....	56
Figura 14 – Gráfico biplot de componentes principais com PC1 e PC2 para as amostras de sedimento e variáveis com indicação dos clusters formados (Dados brutos).....	57
Figura 15 – Gráfico biplot de componentes principais com PC1 e PC2 para as variáveis e as amostras de sedimento, com indicação dos clusters formados. A) Dados transformados com log10. B) Dados transformados com centered log transformation (clr).....	58
Figura 16 – Gráfico biplot de componentes principais com PC1 e PC2 para as variáveis de rocha com ilustração dos clusters formados para dados transformados com centered log transformation (clr).....	59
Figura 17 – A) Gráfico de PCA para todo o conjunto de dados (sedimento, rocha e solo), incluindo as amostras de referência (rocha e solo) enriquecidos em Fe das lagoas Três Irmãs e Lagoa Violão (Sahoo 2017, 2015) e também amostra de Formação Ferrífera Bandada – FFB.....	59
Figura 18 – a) Gráfico de LDA1 e LDA2 e b) Gráfico de PCA. Ambos para todas as amostras: sedimento, material da bacia de contribuição e amostras de referência (FFB, Fe-rocha e Fe-solo). (Dados transformados por clr).....	61
Figura 19 – A) Relação entre o índice de alteração química (CIA), índice de alteração máfica (MIA). B) E do CIA com o índice de lateritização (IOL), nos sedimentos e crosta da Serra Bocaina e amostras de referência (FFB, Fe-rocha e Fe-solo).....	64
Figura 20 – A) Gráfico com os valores sedimentares normalizados por Condrito, somente para os ETRs (mg/kg). B) Amostras de sedimento (n=44), crosta laterítica (LC) (n=14) e solo (n=2), todas normalizadas por Condrito.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detalhamento das amostras de solo, rocha e sedimentos coletadas na Serra Bocaina.....	31
Tabela 2 - Elementos selecionados de sedimentos, rocha e solo e seus respectivos métodos de análise química realizada nos laboratórios.....	37
Tabela 3 - Exemplo do cálculo de Recorved e RSD para avaliação de acurácia com elementos maiores para o padrão NCSDC73303.....	39
Tabela 4 - Estatística descritiva dos elementos maiores (wt.%), traços e ETRs (mg/kg) nos perfis sedimentares (n=4), crosta laterítica (LC) e solo laterítico (L-solo), das lagoas da Serra Bocaina, comparado às concentrações das Formações Ferríferas Bandadas (FFB), da Crosta continental superior (CCS) e com valores de (p-value) do teste de Shapiro-Wilk, para dados brutos, com log10 e clr.....	40
Tabela 5 - Razão elementar e Índices de intemperismo, nos perfis sedimentares, crostas e solos das lagoas (LB1, LB2, LB3 e LB4), sendo Crosta Laterítica (LC) e solo (L-solo) enriquecidos em Al, comparados as Formações Ferríferas Bandadas (FFB) e Crosta continental superior (CCS) e às amostra do material de referência: Crosta e Solo enriquecidos em Fe.....	48
Tabela 6 - Classificação do tipo de lateritização, seguindo a metodologia de classificação de Karunakaran e Sinha Roy (1981) e por meio dos índices de intemperismo Kr e Ki, conforme classificação de Martin e Doyne (1927) e Medina (1970), para dados de rocha – crosta laterítica (LC).....	49
Tabela 7 - Matriz de correlação com coeficiente de Spearman, com os dados de sedimento transformados centered log transformation (clr)., para alguns elementos selecionados. ($r > 0,57$; $p \leq 0,01$), Sinclair e Blackwell, 2004.....	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVOS	18
2 CONTEXTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO	19
2.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	19
2.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20
2.2.1 Geologia Regional	20
3 REFERENCIAL TEÓRICO	22
3.1. FORMAÇÃO E PROCESSOS DE SEDIMENTAÇÃO DAS LAGOAS DE PLATÔ DE CARAJÁS	23
3.2. APLICAÇÕES DA GEOQUÍMICA MULTI-ELEMENTAR.....	24
3.3 UTILIZAÇÃO DAS TÉCNICAS ESTATÍSTICAS EM DADOS GEOQUÍMICOS	27
4 METODOLOGIA.....	30
4.1 AMOSTRAGEM: TESTEMUNHO DE SEDIMENTO E MATERIAL DA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO (ROCHA E SOLO)	31
4.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E MÉTODOS ANALÍTICOS	32
4.3 AVALIAÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS	33
4.3.1 Seleção de Elementos.....	33
4.3.2 Limite de detecção (LD)	33
4.3.3 Precisão e Acurácia	34
4.4 ESTATÍSTICA E ANÁLISE DOS DADOS.....	34
4.4.1 Estatística Descritiva	35
4.4.2 Estatística Multivariada.....	35
4.4.3 Índices de Intemperismo, razão elementar e classificação de lateritas	36

5 RESULTADOS	37
5.1 RESULTADOS DO CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS ANALÍTICOS	37
5.2 RESULTADOS DA ESTATÍSTICA DESCRITIVA E CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS DADOS	39
5.3 CORRELAÇÃO ENTRE OS ELEMENTOS	51
5.4 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS	56
5.5 ANÁLISE LINEAR DISCRIMINANTE (LDA)	61
6 DISCUSSÃO.....	62
6.2 AVALIAÇÃO DO INTEMPERISMO E DE PROCESSOS DE LATERITIZAÇÃO	63
7 CONCLUSÃO	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1 INTRODUÇÃO

Na Amazônia são encontradas inúmeras lagoas sob os platôs, que são grandes arquivos de informações paleoclimáticas essenciais para o entendimento dos processos evolutivos da sua região (LATRUBESSE, 2012). Muitas dessas lagoas estão localizados na Serra dos Carajás, sudeste da Amazônia, que é uma importante província mineral, com um dos maiores depósitos de ferro do mundo. Esta região apresenta grandes áreas de platô onde se desenvolveu, sobre a crosta laterítica, várias lagoas como resultado de processos estruturais e de intemperismo (MAURITY; KOTSCHOUBEY, 1995). A uma altitude de aproximadamente 700 m, a formação das lagoas foi fortemente influenciada pelas características naturais da bacia de contribuição (SAHOO et al., 2016a).

As lagoas são fontes de uma grande gama de informações que usualmente, por limitações diversas, são interpretados isoladamente ou comparados apenas a proxies lacustres (ENGSTROM; SWAIN, 1986). Estas feições naturais são ambientes complexos que podem refletir as influências de suas bacias e da atmosfera e são considerados ambientes chave para o estudo de dinâmicas atuais e passadas Bush et al. (2004), pois seus sedimentos fornecem importantes registros continentais e boas respostas para o estudo da reconstrução paleoambiental e paleoclimática de escala local e regional (CANHAM et al., 2012; BRAHNEY et al., 2014; BERNTSSON et al., 2015).

A maioria dos estudos de sedimentos lacustres tratam de interpretações de dados palinológicos e dados isotópicos (COSTA et al., 2005; HERMANOWSKI et al., 2012; GUIMARÃES et al., 2016a). No entanto, recentemente essa região têm sido fonte de estudos geoquímicos Sahoo et al., (2015a, b, 2016a, b, 2017), associados a processos sedimentológicos (SOUZA-FILHO et al., 2016). Esses estudos utilizam, entre outros fatores, a composição química dos sedimentos, que é uma importante ferramenta capaz de esclarecer a proveniência e processos locais e regionais ocorridos (OLIVEIRA et al., 2009).

A caracterização geoquímica de sedimentos, fornece informações de fatores, processos e distribuições dos elementos na lagoa, a exemplo, o grau de intemperismo físico-químico, o processo de sedimentação, classificação, processos pós-deposicionais/diagenéticos, contribuição da deposição atmosférica, resultando em uma assinatura geoquímica com informações até mesmo da composição da rocha fonte (WOJCIECH, 2005; ROY et al., 2008; MINYUK et al., 2014; GRUNSKY et al., 2014; SAHOO et al., 2016a; BABEESH et al., 2017). As informações obtidas

com a caracterização geoquímica multi-elementar dos sedimentos contribui para identificação da litologia dominante, das características da bacia e tendências geoquímicas locais e regionais, além de serem dados importante para a exploração mineral e mapeamento geológico (PANAHI et al., 2004; GRUNSKY, 2010; GRUNSKY et al., 2014; GRUNSKY et al., 2017).

Na Serra dos Carajás, especificamente na parte sul, no platô S11, ocorrem inúmeras lagoas ativas e preenchidas, ambas estudadas por vários autores como Guimarães et al. (2016a, b) e Sahoo et al. (2016a, b e 2017). Na Serra Bocaina, ocorrem apenas lagoas inativas/preenchidas, sendo estas o objeto de estudo da presente pesquisa, elas levam esse nome devido a variação no espaço de acomodação dos sedimentos, normalmente influenciados pelos processos naturais como a precipitação e o intemperismo da bacia (GUIMARÃES et al., 2016b). Para facilitar a compreensão das características desse ambiente, essas lagoas foram analisadas por meio de: testemunhos sedimentares; amostras de solo; e de rocha como o material da bacia de contribuição. Para cada análise foram feitas interpretações geoquímicas dos elementos inorgânicos/detríticos presentes no material.

O estudo das litologias da bacia de captação, pode esclarecer se, e como, o material fonte controla a geoquímica sedimentar de uma lagoa, porém poucos estudos levam em consideração a relação entre eles, para entender até que ponto a geoquímica do sedimento reflete as características da litologia e de depósitos superficiais (MELLICANT, 2017; MULLER; GRUNSKY 2016; HUNT et al., 2017). As análises baseadas em vários indicadores ambientais são de extrema relevância, pois, as informações contidas no material detrítico dos sedimentos encontrados nestes ambientes poderão esclarecer o processo sedimentar predominante, a proveniência, o grau de intemperismo e a assinatura geoquímica da bacia de drenagem, uma vez que os materiais detríticos possuem composições químicas distintas o que refletem sua proveniência e, possivelmente, uma resposta geoquímica à mudança paleoambientais (TANAKA et al., 2007).

Os dados geoquímicos são tidos como dados de composição, que juntos somam um valor constante lhe conferindo a característica de dado fechado, como é chamado na literatura (AITCHISON, 1986; GRUNSKY, 2010; FILZMOSEr et al., 2009, 2016). Essa característica exige cuidados que antecedam aplicações de técnicas estatísticas, como a aplicação de transformações que possibilitem a interpretação das relações reais desses dados (AITCHISON, 1986; FILZMOSEr et al., 2016). Existem três tipos de transformações baseadas em log na literatura: *additive logratio (alr)* e *centered log-ratio (clr)* Aitchison (1986); e o *isometric log-ratio*

(ilr) Egozcue et al. (2003). Neste trabalho foi utilizado a transformação (clr) e log10. Métodos estatísticos, como análises univariadas e multivariadas, têm sido amplamente empregados em dados geoquímicos para caracterizar tendências e processos geoquímicos (CARITAT; GRUNSKY, 2013; REIMANN et al., 2012a,b; MUELLER; GRUNSKY, 2016; KIRKWOOD et al., 2016; CARITAT et al., 2017; GRUNSKY et al., 2017).

Sahoo et al. (2015a, b, 2016a, b, 2017) já realizaram estudos geoquímicos, em algumas lagoas, específicos para entender a distribuição dos elementos maiores e traços e os fatores que os controlam, porém, considerando que cada lagoa possui sua característica própria de morfologia e bacia de contribuição (SILVA et al., 2018). Esta pesquisa agrega ainda, amostras do material da bacia de captação, que contribuirão para o detalhamento do padrão de distribuição encontrado. Partindo deste princípio, a hipótese norteadora da pesquisa considera que há uma forte influência da litologia da bacia, morfologia das lagoas, entre outros fatores, e que os elementos (detríticos) contidos no sedimento têm a capacidade de reter informações que fornecerão a assinatura geoquímica destes ambientes, sendo determinados por análises estatísticas tanto dos sedimentos quanto do material da bacia de contribuição.

Estes estudos contribuem para o entendimento dos registros em sedimentos lacustres, considerando a contribuição das suas respectivas bacias de drenagem e ajudam a identificar características originais dessas lagoas, anterior a qualquer influência antrópica. Essa pesquisa foi aplicada em quatro lagoas da Serra Bocaina, com características semelhantes de clima e vegetação, se diferenciando apenas na morfologia e na natureza de suas bacias de contribuição.

1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa objetiva, por meio da análise geoquímica multielementar, em testemunhos, solos e rochas, identificar e correlacionar os dados geoquímicos, para avaliar os efeitos da relação com a litologia da bacia de drenagem. Dentre esse objetivo central, destacam-se alguns específicos:

- Avaliar o enriquecimento e empobrecimento relativo dos elementos nos sedimentos e rochas da bacia pela normalização com CCS;
- Identificar a assinatura geoquímica dos lagoas e os fatores que os controlam usando análises estatísticas multivariadas;
- Investigar as possíveis similaridades geoquímicas entre as lagoas;
- Avaliar o grau de intemperismo da bacia e proveniência dos seus sedimentos;

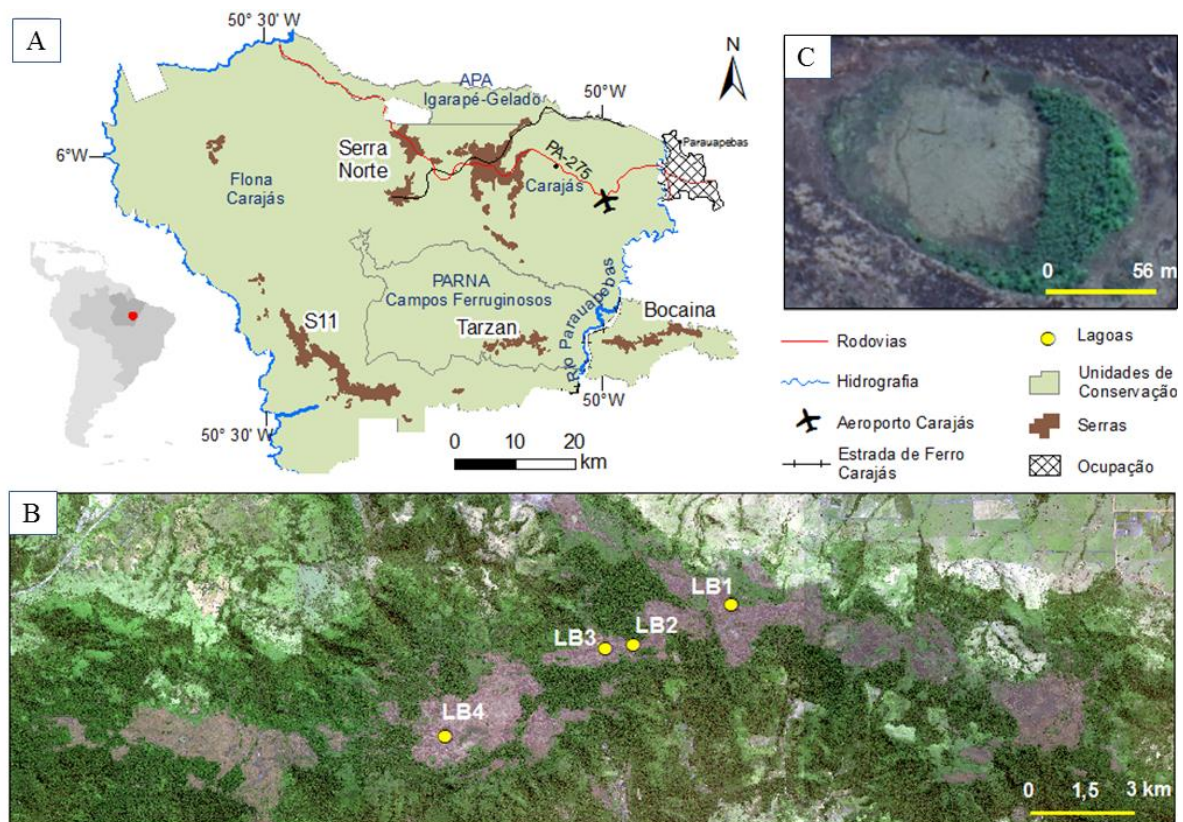
- Comparar as composições dos sedimentos com a do substrato da bacia (rocha/solo) e dessa forma determinar a contribuição para a composição sedimentar;

2 CONTEXTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO

2.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os estudos foram aplicados em quatro lagoas da serra Bocaina, um platô ferruginoso, localizado entre a rodovia PA 160 e o Rio Parauapebas, no limite da Floresta Nacional de Carajás (Fig. 1), a aproximadamente, 30 km da cidade de Parauapebas (PA). A Serra da Bocaina apresenta altitude média de 602 metros e declividade média de 18%, dentro do contexto dos platôs ocorrentes na Flona de Carajás (ICMBIO, 2013) e está inserida no recém criado Parque Nacional dos Campos Ferruginosos.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. A) Localização da Serra Bocaina, Parque Nacional dos Campos Ferruginosos. B) Localização das lagoas estudadas. C) Visão em detalhe de LB4.



Fonte: Próprio autor, (2018).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

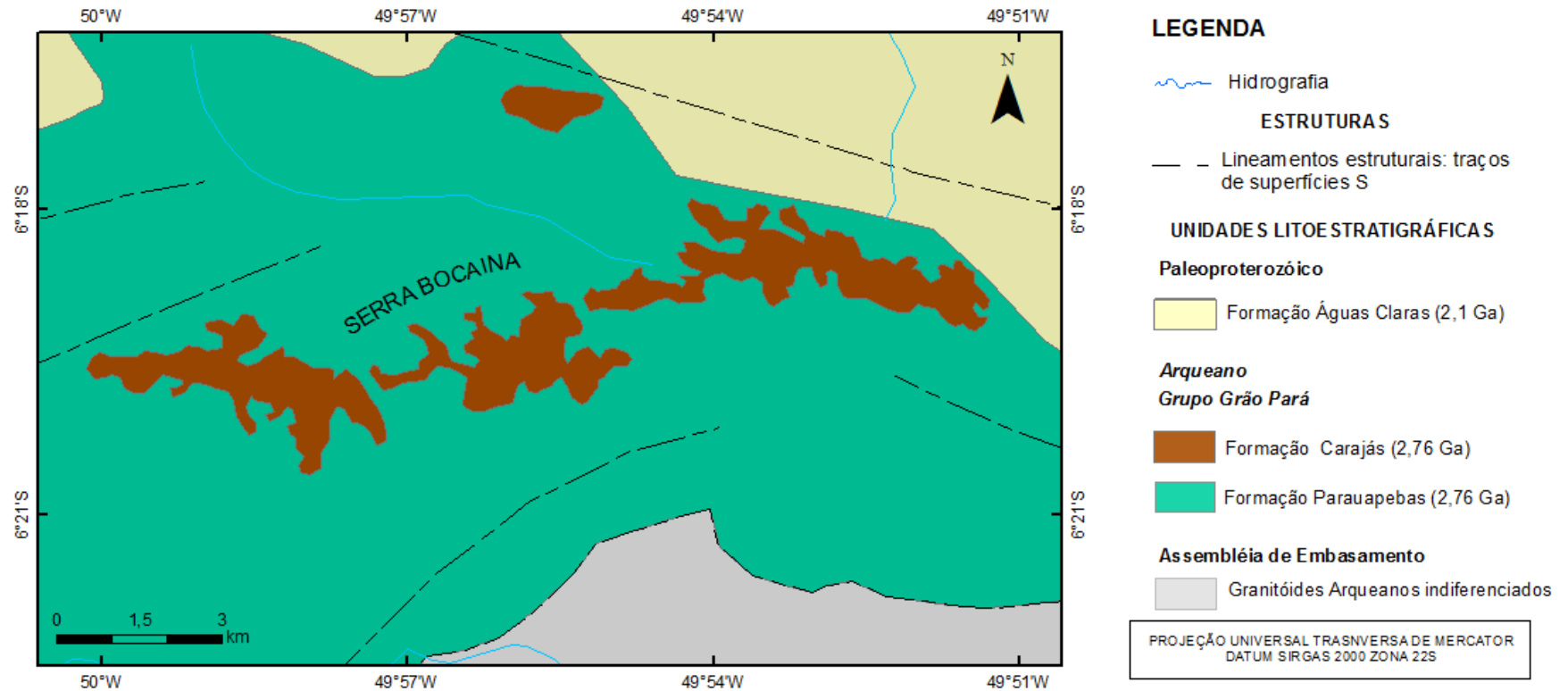
Nesta região da Serra Bocaina, o clima predominante é o tropical úmido, com variações anuais de temperatura entre 26°C e 28°C e precipitação anual de 1800 a 2300 mm (MORAES et al., 2005). As coberturas lateríticas presentes neste ambiente, sustentam os topos dos platôs devido à sua resistência à erosão (ICMBIO, 2013), e a vegetação característica que se desenvolve sobre elas é a canga rupestre, representada por estratos herbáceos e arbustivos, campo brejoso, densamente colonizado por macrófitas aquáticas, capão de mata contornado por vegetação rupestre e florestas ombrófilas que geralmente desenvolvem-se nas bordas do platô (GOLDER, 2011; NUNES et al., 2015). Na Serra Bocaina, a vegetação se assemelha à encontrada na Serra Tarzan e S11D (ICMBIO, 2013), e está diretamente condicionada à presença de crostas ferruginosas (lateritas) se dá em função das ações intempéricas sobre rochas ricas em ferro, e são constituídas basicamente por fragmentos das rochas subjacentes, cimentados por matriz limonítica/goethítica, e são normalmente muito hidratadas e apresentam sinais de fósforo e alumina. Em um estudo de biodiversidade da Serra Bocaina (ICMBIO, 2013), foram identificadas situações transicionais de fitofisionomias que indicam a ocorrência de gradientes de condições de substrato e microclimáticas, o que pode influenciar nas litologias desse ambiente.

2.2.1 Geologia Regional

A Serra da Bocaina está inserida na Província de Carajás, na porção sudeste do Cráton Amazônico. Esta província possui idade arqueana e compreendia originalmente dois blocos tectônicos: o Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria (TGGRM) e o Bloco Carajás (SOUZA et al., 1996; DALL'AGNOL et al., 1997, 2006; ALTHOFF et al., 2000). O Bloco Carajás era então subdividido em Bacia Carajás, ao norte, e Domínio de Transição, ao sul (DALL'AGNOL et al., 1997, 2006), representando este uma possível extensão do Domínio Rio Maria, porém retrabalhado durante o Neoarqueano. Mais recentemente, essa Província foi subdividida em domínios Rio Maria, Sapucaia, Canaã dos Carajás e Bacia Carajás (DALL'AGNOL et al., 2013).

A área estudada apresenta litotipos pertencentes ao Grupo Grão Pará (Fig. 2), unidade dominante na Bacia Carajás, que abrange rochas metavulcânicas (Formação Parauapebas) e formações ferríferas bandadas (FFB; Formação Carajás), as últimas fonte dos enormes depósitos

Figura 2 – Mapa simplificado da geologia da Serra Bocaina adaptado de Vasquez et al., 2008.



Fonte: Próprio autor, (2018).

de ferro da província, tais como Serra Norte, Serra Sul, Serra Leste e Serra de São Felix (GIBBS; WIRTH, 1990; TOLBERT et al., 1971). Tem-se, além disso, coberturas detrítico-lateríticas recentes, formadas como produto da alteração de metabasaltos da Formação Parauapebas, as quais possuem composição ferro-aluminosa e são denominadas de Cangas Químicas (CQ), ou das formações ferríferas da Formação Carajás, sendo neste caso essencialmente ferrosas e denominadas de Canga de Minério (CM) (MOTTA, 2011). Além dos termos CQ e CM, utiliza-se ainda a designação de hematita laminada lateritizada (HLL) dentro das áreas de minas, para materiais geológicos com tais características (ICMBIO, 2014).

O Grupo Grão Pará corresponde à: (1) Formação Parauapebas, composta por rochas metavulcânicas máficas, intermediárias e félsicas, com dominância de basaltos e andesitos basálticos (GIBBS et al., 1986; MARTINS et al., 2017); (2) Formação Carajás que ocorre intercalada com as sequências metavulcânicas e mostra predominância de formação ferrífera bandada do tipo jaspilito, normalmente encontrada alterada para minério hematítico. As FFB são em sua maioria da fácies óxido e mostram bandamento composicional com alternância entre camadas constituídas por minerais de óxidos de ferro e camadas silicosas (chert). O Grupo Grão Pará acha-se sotoposto à sequência plataformar regressiva paleoproterozoica (2.1 Ga; FABRE et al., 2011), da Formação Águas Claras (NOGUEIRA et al., 1995).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A região amazônica é composta por diversas áreas de platô onde suas superfícies geralmente apresentam numerosas lagoas isoladas de influência fluvial e situadas em depressões fechadas e semi-fechadas. Essas lagoas representam ambientes deposicionais com espaço de acomodação variável, conferindo a estes, dependendo do nível, a classificação de ativos e inativos (GUIMARAES et al., 2016b). As lagoas inativas, principal objeto dessa pesquisa, são facilmente identificados por imagens de satélites pela quantidade de macrófitas e palmeiras estabelecidas nas porções centrais das lagoas, formando pântanos de terras altas (SAHOO et al., 2017).

Muitos estudos estão disponíveis principalmente para ambientes lacustres em regiões semiáridas, planícies de inundação de áreas tropicais e lagos glaciares (BOUSSAFIR et al., 2012; HALL et al., 2002; JIN et al., 2006; SIFEDDINE et al., 2011). No entanto, estudos geoquímicos em lagoas de terras tropicais são limitados, que é o caso da região de Carajás no Sudoeste da

Amazônia. Esta região vem sendo alvo de pesquisas geoquímicas que objetivam analisar os processos lacustres modernos de origem orgânica e inorgânica. Tem-se na Serra dos Carajás diversas dessas bacias fechadas, formadas sobre a crosta laterítica em um platô de 600 a 800 m de altitude, onde a hidrologia é restrita e o nível de água é basicamente governado por processos pluviométricos, como a evaporação e precipitação (SAHOO et al., 2015b).

Estudos anteriores realizados por Sahoo et al., (2015a, 2016a), demonstraram que os sedimentos das lagoas da Serra dos Carajás são principalmente relacionados com o tipo de solo e a litologia da bacia de drenagem e que foram formados após um forte intemperismo químico e erosão física, tendo a água como maior transportador de sedimentos para as lagoas. Este comportamento também pode ser observado nos estudos realizados por Guimarães et al., (2016a) que dispõe de informações da influência da geomorfologia, geologia e vegetação das bacias de contribuição, nas tipologias dos depósitos e processos de sedimentação.

3.1. FORMAÇÃO E PROCESSOS DE SEDIMENTAÇÃO DAS LAGOAS DE PLATÔ DE CARAJÁS

O compartimento superior das Serras de Carajás é sustentado pela FFB e pela Canga, com uma superfície ondulada composta por montes, depressões fechadas, vales e barrancos que são características particulares de substratos rochosos ricos em ferro (FFB e Canga). Estas depressões medem dezenas a centenas de metros de comprimento e geralmente são circulares ou alongadas (PILÓ et al., 2015).

Pesquisas já realizadas comprovam a existência de ciclos climáticos (seco-úmido) relacionados com a destruição parcial da crosta por subsidência da zona saprolítica nos períodos úmidos mais longos, favorecendo além do desenvolvimento das florestas o surgimento de depressões fechadas a presença de lagoas ativas, brejos temporários e perenes nas áreas planas e rebaixadas (MAURITY e KOTSCHOUBEY, 1995; PINHEIRO, 1987). Ao contrário dos lagoas aluviais, os de platô, formados sobre as crostas laterítica, que somente são encontradas no Morro dos Seis Lagos (CORDEIRO et al., 2011), Maicuru-Maraconai (COSTA et al., 1991) e Serra dos Carajás (COSTA et al., 2005), são hidrológicamente restritos e possivelmente formados por processos estruturais e de degradação de perfis lateríticos, que proporcionam maior resistência a processos intempéricos (MAURITY e KOTSCHOUBEY, 1995).

Mesmo sem influência do sistema fluvial, existem outros fatores que controlam os processos que ocorrem nessas lagoas e conduzem o fluxo e os processos sedimentares, como a morfologia da bacia, mudanças no tipo de sedimento e sua taxa de abastecimento (Blais e Kalff, 1995), parâmetros limnológicos (AGUILERA et al., 2006), padrão de circulação de água nas lagoas (LAVAL et al., 2003), e mudanças de nível de água devido ao influxo variável, precipitação e evaporação (BRIDGE; DEMICCO, 2008; DIETZE et al., 2010; TALBOT e ALLEN, 1996).

A densidade relativa do influxo, as águas da lagoa, e a distribuição vertical da densidade da água controlam a natureza do que entra na lagoa (WEIRICH, 1986). A morfologia da bacia controla a entrada de sedimentos na lagoa em relação aos fluxos subterrâneos (correntes de turbidez), (SOUZA-FILHO et al., 2016). E ainda, de acordo com Smol (2001), existem duas possíveis fontes de sedimentos lacustres: material halogênico transportado para a lagoa pela atmosfera ou bacia e material autogênicos formados devido a processos *in-lake* na água ou no sedimento. Esta informação é bastante relevante para o esclarecimento da composição ou comportamento identificado nas análises geoquímicas (SMOL, 2001).

O entendimento desses fatores relacionados aos processos sedimentares é de extrema relevância, pois, controlam também a ocorrência e os padrões da assinatura geoquímica em sedimentos em uma área específica (TYLMANN 2005; ZHOU et al., 2008; YOUSEFI et al., 2013; MELLICAN, 2017). Em um ambiente natural restrito, como é o caso dessas lagoas, isso é influenciado principalmente pela diversidade e complexidade da geologia local (PARSA et al., 2016), bem como pelos processos dominantes, como o intemperismo e o transporte (ANAND et al., 2016; CARITAT et al., 2017). A identificação da assinatura geoquímica dos sedimentos fornece informações valiosas sobre os processos que ocorreram naquela região e sobre a evolução do depósito mineral.

3.2. APLICAÇÕES DA GEOQUÍMICA MULTI-ELEMENTAR

Durante as últimas duas décadas, os depósitos de lateritas encontrados no mundo inteiro vêm sendo estudados em detalhes para a identificação de fatores de mobilização e redistribuição de elementos maiores, menores e traços (incluindo os elementos terras raras - ETR's) durante o processo de intemperismo. Esses estudos geram considerações importantes quanto a geoquímica desses elementos e se tornaram uma ferramenta indispensável na investigação de variados aspectos

da formação laterítica e a composição da rocha fonte, processos diagenéticos e epigenéticos relacionados à lateritização, pH, Eh, drenagem, clima e controle mineral (ABEDINI et al., 2014).

Alguns elementos como, Al, Ti, Th, Sc, Co, Zr, Hf, N, Y, Cr e os ETR's, são utilizados na compreensão da contribuição da rocha fonte nos sedimentos por serem classificados geralmente como menos móveis, ou seja, sofre pouco fracionamento geoquímico durante o intemperismo, transporte e diagênese (TAYLOR e MCLENNAN, 1985; WANG et al., 2014). Algumas questões são levantadas na literatura a respeito da integridade da composição dos sedimentos que podem sofrer alterações devido aos processos pós deposicionais onde ocorre a precipitação de Fe-oxihidróxido (goethita, jarosita e magnetita), sulfuretos (pirita), carbonatos (siderita, calcita e aragonita) e fosfatos (vivianita), que pode afetar a distribuição dos elementos traços (AUDRY et al., 2010; JELINOWSKA et al., 2000; SAHOO et al., 2015a) e modificar a composição de minerais argilosos (XIAO et al., 2010), bem como o processo de intemperismo alterar a razão elementar encontrada nas lagoas (TAYLOR e MCLENNAN, 1985; POTTER et al., 2005). Ainda assim, tem-se que a composição química do sedimento não é significativamente alterada servindo então como ferramenta essencial para a identificação da assinatura geoquímica e reconstrução de padrões de distribuição históricos (TAYLOR e MCLENNAN, 1985).

A informação da relação rocha fonte – sedimento é resultado da razão dos elementos traços dos sedimentos comparada as características da rocha e do solo e também com a Crosta Continental Superior (CCS) – *Upper Continental Crust* de Wedepohl (1995), (PAIKARAY et al., 2008). A comparação entre a média da concentração dos elementos maiores, traços e ETR's, e as amostras coletadas da crosta laterítica e das FFB's, é importante para avaliar o enriquecimento e a origem dos elementos inorgânicos presentes nos sedimentos dessas lagoas (SAHOO et al., 2015b).

A utilização de ETR's como importante indicador para os estudos de intemperismos e proveniência é descrito por Tanaka et al., (2007 e referências contidas nele), os quais destacam que esses elementos vêm recebendo atenção especial, contribuindo para estudos nos diversos campos em função de suas propriedades químicas caracterizadas por sua configuração eletrônica de 4f que facilita a identificação do núcleo e as informações nele contidas. Os ETR's e grande parte dos elementos maiores encontrados na região de Carajás foram associados ao material detrítico, justamente por este hospedar esses elementos durante o processo de intemperismo da bacia, justificando o comportamento geoquímico semelhante (GUIMARÃES et al., 2017).

Para a compreensão do processo de intemperismo, é importante saber que elementos com alta mobilidade são facilmente lixiviados da rocha fonte e elementos menos móveis ficam retidos no material residual. A intensidade desse processo é determinada com o cálculo do índice de alteração química (CIA) ($CIA = (Al_2O_3/[Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O]100)$) que utiliza concentrações molares dos elementos e CaO^* que corresponde a porção relacionada ao silicato (NESBITT et al., 1996), associado ao diagrama ternário $Al_2O_3(A)-CaO-Na_2O(CN)-K_2O(K)$ de Nesbitt & Young, (1984), onde valores altos de CIA sugerem um forte intemperismo da bacia, tanto em condições secas quanto úmidas (MCLENNAN, 1991).

O CaO^* utilizado na equação do CIA necessita de uma correção normalmente feita pelo cálculo das correções dos conteúdos medidos de CO_2 e P_2O_5 . No caso desses teores não terem sido avaliados na pesquisa, correções aproximadas podem ser utilizadas (SINGH et al., 2005). O método indireto proposto por McLennan et al., (1993), garante que essa correção seja realizada, assumindo valores razoáveis da razão Ca/Na do material silicato. O teor de CaO da fração de silicato é o resultado da subtração da proporção molar de P_2O_5 da porção molar de CaO total. A interpretação desse valor após a subtração considera que se o “número remanescente de mols” for menor do que a proporção molar de Na_2O , então o “número restante de mols” é considerado como a proporção molar de CaO da fração de silicato. Se o “número remanescente de mols” for maior que a proporção molar de Na_2O , então a proporção molar de Na_2O é considerada como a proporção molar de CaO da fração de silicato CaO^* (SINGH et al., 2005).

No entanto, Xiao et al., (2010) questiona a confiabilidade do indicador (CIA) em função de ser calculado a partir de óxidos principais, podendo sofrer alterações no processo pós-deposicional, o que atribui incerteza à estimativa da extensão da alteração. Outros índices foram propostos por Babechuk et al., (2014), o MIA – Índice de alteração máfica ($MIA_{(O)} = 100 * [(Al_2O_3 + Fe_2O_3(T)) / (Al_2O_3 + Fe_2O_3(T) + MgO + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$) que quantifica a perda líquida dos principais elementos móveis ($Ca, Mg, Na, K \pm Fe$) em relação aos mais imóveis ($Al \pm Fe$) e o IOL – Índice de Lateritização ($IOL = 100 * [(Al_2O_3 + Fe_2O_3(T)) / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3(T))]$) utilizado para delinear o grau de intemperismo máximo. Índices mais antigos, devidos a Harrassowitz (1926), classificam em função do processo de Lateritização. São os índices de K_i e K_r que se baseiam na quantidade de sílica relativa, onde K_i é o produto da relação (SiO_2/Al_2O_3), e K_r , da relação entre ($SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$), sendo comumente utilizados para avaliar o grau de alteração de solos. Outro sistema de classificação utilizado na literatura é a classificação de lateritas

em ferruginosas e aluminosas a partir de comparações de teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 proposta por Karunakaran e Sinha Roy (1981). Siqueira et al., (2014), detalha e aplica esses últimos três índices para uma avaliação sobre a assinatura geoquímica dos principais elementos maiores em rochas lateríticas, utilizando Ki e Kr em rochas e não em solo como proposto inicialmente e afirma que esses sistemas de classificação apresentados são básicos e fundamentados apenas nos teores químicos.

A necessidade da utilização de várias metodologias se explica por garantir a confiabilidade do dado resultante, assim como descrito em Roy et al., (2012), que utilizou (associados a outras técnicas) a aplicação de diagramas ternários, para esclarecer a proveniência e possíveis condições ambientais ocorridas durante a deposição. Outro fator de extrema relevância a ser considerado para esse tipo de análise é a influência da própria configuração geomorfológica e hidrológica da bacia de cada lagoa, como também por outros fatores ambientais (GUIMARÃES et al., 2013). Além disso é essencial que na interpretação do processo de intemperismo sejam levados em consideração todos esses fatores conjuntamente para que os resultados propostos sejam corretos e fiéis à realidade da região.

3.3 UTILIZAÇÃO DAS TÉCNICAS ESTATÍSTICAS EM DADOS GEOQUÍMICOS

Os dados geoquímicos provenientes de diversas medições realizadas em laboratório extraídas das amostras coletadas em campo são geralmente de característica quantitativa. A estatística possibilita interpretar e entender os valores obtidos, esclarecer informações antes ocultas, identificar e caracterizar o comportamento dos elementos químicos, permitindo fazer previsões e extrapolações para explicar fenômenos geológicos e geoquímicos (FRIZZO; LICHT, 2007). As análises univariadas e multivariadas são métodos estatísticos que vêm sendo amplamente utilizados na literatura, em dados geoquímicos, para caracterizar as tendências e processos geoquímicos ocorridos (CARITAT e GRUNSKY, 2013; REIMANN et al., 2012a,b; MUELLER e GRUNSKY, 2016; KIRKWOOD et al., 2016; CARITAT et al., 2017; GRUNKY et al., 2017). A estatística univariada fornece um panorama geral das características dos dados, objetivando identificar as distribuições normais que estão representadas no conjunto de dados geoquímicos (FRIZZO; LICHT, 2007). Essa estatística básica inclui a estatística descritiva (mínimo, máximo, média, mediana, assimetria, curtose, desvio padrão e variância), coeficiente de correlação de Spearman e

teste de normalidade, com representações em *boxplot*, histogramas e gráficos de dispersão como o QQ-plot, que fornecem uma primeira visualização da distribuição. Frizzo e Licht (2007), afirmam que o *boxplot* fornece uma visualização limpa e rápida que, somada à interpretação do histograma, esclare o comportamento de distribuição dos dados. Outra técnica mais robusta da estatística utilizada para identificar normalidade dos dados também utilizada nesta pesquisa é o teste não paramétrico de Shapiro-Wilk proposto em 1965 e apontado até recentemente como um dos melhores testes de normalidade de dados (FITRIANTO e CHIN, 2016; DAS e IMON, 18 2016; GHASEMI e ZAHEDIASL, 2012). Visto que a maioria dos testes estatísticos supõe a normalidade dos dados, as verificações citadas acima, mais a identificação de possíveis outliers e das diferentes populações presentes nos dados, devem ser realizadas cuidadosamente antes da aplicação das análises principais (REIMANN et al., 2002).

A análise multivariada é um vasto campo, no qual até os estatísticos experientes movem-se cuidadosamente, devido esta ser uma área recente da ciência, pois já se descobriu muito sobre esta técnica estatística, mas muito ainda está para se descobrir (MAGNUSSON, 2003).

A estatística multivariada reúne diversos métodos e técnicas que utilizam, simultaneamente, todas as variáveis na interpretação teórica do conjunto de dados obtidos (NETO, 2004). Os métodos utilizados nesta pesquisa foram de Análise de Agrupamento (AA) ou *cluster analysis*, Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis* PCA) e Análise Linear Discriminante (*Linear Discriminant Analysis* LDA). A análise de agrupamento objetiva identificar possíveis grupos formados pela similaridade entre as variáveis e fornece a visualização em dendograma. Na estatística multivariada a análise de componentes principais (PCA) e a análise fatorial (AF) são ferramentas importantes e muito utilizadas nas pesquisas geoquímicas pois possibilitam a redução do grande número de variáveis e explicam associações em poucos PC's facilitando a interpretação desses dados (DAULTREY, 1976; GODDARD e KIRBY, 1976; JÖRESKOG et al., 1976). Landim et al. 2007, explica que os diversos valores gerados nesta análise podem ser visualizados em um diagrama biplot onde os eixos correspondem aos dois PC's mais importantes na explicação do comportamento dos dados. Já a LDA assim como o PCA reduz a quantidade de dados, porém com formações de grupos que já são previamente conhecidos, visando identificar se os grupos estão bem discriminados no banco de dados, ou seja, procura verificar se as características do dado são suficientes para alocar os objetos em diferentes grupos.

Para a aplicação dessas técnicas citadas acima é exigido um tratamento prévio nos dados que são descritas nos trabalhos pioneiros de Aitchison (1986), que levantou a problemática da utilização de dados geoquímicos brutos em análises estatísticas e propôs uma metodologia de transformação, pois são dados naturalmente de composição que se apresentam em diferentes unidades e juntos somam um valor constante, lhe adequando o nome também de dados fechados como é citado em várias literaturas. Seguindo esta linha, autores como Pawlowsky-Glahn e Egozcue (2006); Daunis-I-Estadella et al., (2006) também estudaram essa problemática confirmando que há uma restrição na composição natural desses dados o que pode causar enganos na interpretação estatística.

Existem três tipos de transformações que permitem “abrir” esse tipo de dado baseado nos índices de log, *additive log ratio* (alr) e *centered log ratio* (clr) de (AITCHISON, 1986); e *isometric log ratio* (ilr) de (EGOZCUE et al., 2003). Neste trabalho foi aplicada a transformação por log central (clr), expressa matematicamente por:

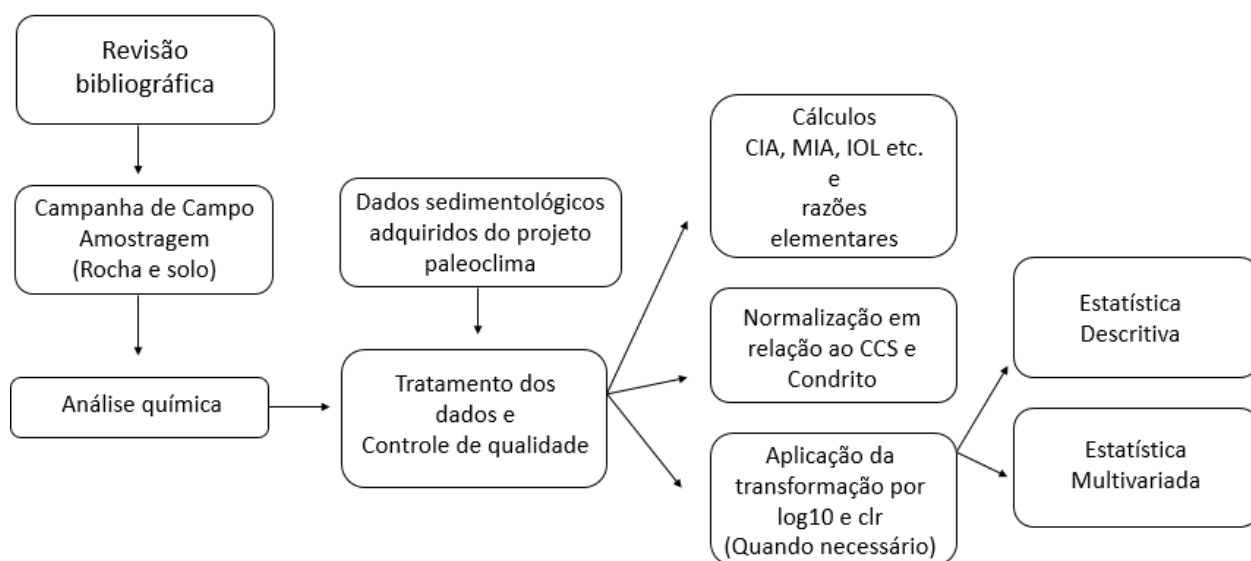
$$clr(x) = (y_1, \dots, y_D) = \left(\ln \frac{x_1}{\sqrt[D]{\prod_{i=1}^D x_i}}, \dots, \ln \frac{x_D}{\sqrt[D]{\prod_{i=1}^D x_i}} \right)$$

proposta por AITCHISON (1986) no início da década de 80 e é uma das técnicas de transformação mais utilizadas atualmente por estabelecer com clareza as associações geoquímicas elementares, como pode ser comprovado nos trabalhos de (CARITAT; GRUNSKY 2013; REIMANN et al., 2012a, GRUNSKY et al., 2014; WANG et al., 2014; GRUNSKY et al., 2017; MUELLER; GRUNSKY 2016; Sun et al., 2016; FILZMOSER et al. 2009 e MURIITHI, 2015). Este último autor utiliza a aplicação de clr a dados de NDVI relacionado a atividade de vegetação vinculada a processos climáticos, que também são dados fechados como os geoquímicos reafirmando a necessidade de um tratamento/transformação que anteceda a aplicação de outras técnicas como, por exemplo, a (PCA) para evitar erros de interpretação, uma vez que na forma bruta eles refletem somente informações de magnitudes relativas dos seus componentes (MURIITHI, 2015). O principal objetivo em usar esse tipo de transformação é possibilitar uma análise correta da estatística multivariada e permitir a delineação de padrões espaciais que são normalmente mascarados pelos dados brutos.

4 METODOLOGIA

Esta pesquisa iniciou com o levantamento bibliográfico das características geológicas e geoquímicas das áreas estudadas, bem como, levantamento das análises estatísticas multielementares, mais utilizadas na literatura, para o esclarecimento de assinatura geoquímica. Após esta etapa, amostras de rocha e solo foram coletadas e enviadas ao laboratório para às análises químicas para, posteriormente, junto com as de sedimentos, dar início às análises estatísticas pelos Softwares R® e Excel® 2016 como mostra fluxograma (Fig.3).

Figura 3 – Fluxograma da metodologia utilizada com cada etapa percorrida.



Fonte: Próprio autor, (2018).

Baseando-se nos litotipos que rodeiam a bacia das lagoas, além das amostras de sedimento, solos e crosta laterítica enriquecidas em Al (LC), coletadas nesta pesquisa, foram utilizadas como material de referência, amostras de crostas laterítica ferruginosas (Fe-crosta) das lagoas Três Irmãs (SAHOO et al., 2017), solos ferruginosos (Fe-solo) da lagoa do Violão (SAHOO et al., 2015a) e ainda amostras de fonte primária como Formações Ferríferas Bandadas - FFB em (SAHOO et al., 2015a), Crosta continental superior (CCF), Wedepohl, 1995 e condrito (SCHMITT et al., 1963). As informações detalhadas das amostras coletadas e dos materiais de referência, podem ser visualizadas no Apêndice A.

4.1 AMOSTRAGEM: TESTEMUNHO DE SEDIMENTO E MATERIAL DA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO (ROCHA E SOLO)

Os dados sedimentares tratados nesta pesquisa são de testemunhos que foram descritos e amostrados anteriormente nas lagoas de platô da serra Bocaina para o projeto Paleoclima. E em janeiro de 2018, foi realizada a viagem de campo para coletar amostras adicionais de rochas/crosta e solo das bacias de contribuição das lagoas para complementação dos dados obtidos (Tabela 1). Para os sedimentos foram coletados um testemunho no centro de cada lagoa (Fig. 4a) e selecionadas para estudo, somente as porções inorgânicas do perfil (fácies detríticas) (Fig. 4b). Já as amostras de crosta e solo foram coletadas margeando as lagoas (Fig. 4a) com marcação de coordenadas em *Trimble* diferencial GPS (DGPS), modelo AG-132.

Tabela 1 - Detalhamento das amostras de solo, rocha e sedimentos coletadas na Serra Bocaina.

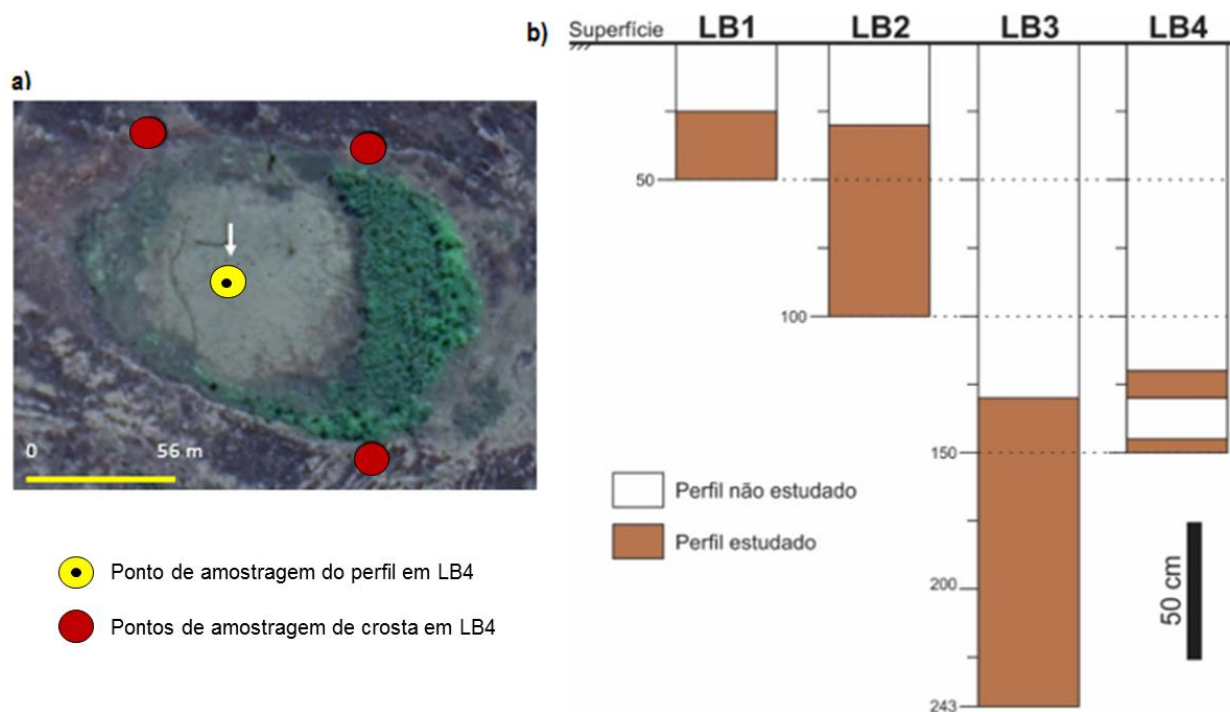
	Rocha	Solo	Sedimento	Profundidade (cm)
LB1	2	1	5	50
LB2	2	-	14	100
LB3	6	1	22	243
LB4	4	-	3	150
Total	14	2	44	

Fonte: Próprio autor, (2018).

Os testemunhos foram coletados com o auxílio de um amostrador russo no período de 2012 a 2017 em cada uma das lagoas pertencentes a Serra Bocaina. Os depósitos foram descritos com base na análise de fácies de Walker (1992) e classificados de acordo com o Global Lake Drilling Program (SCHNURREMBERGER, et. al., 2003).

A amostragem de rocha foi realizada com auxílio de ferramentas como marreta e talhadeira em pontos estrategicamente escolhidos pela equipe de campo de modo a visar melhor clareza dos dados obtidos. As amostras foram acondicionadas em sacos de polietileno, lacradas e identificadas com a localização específica para posteriormente serem enviadas para o laboratório. Foram coletadas duas amostras de solo em pontos marcados em GPS, com a retirada da camada mais superficial de origem orgânica, e perfuração de furo atingindo uma profundidade de mais ou menos 20cm, com auxílio de pá em seguida acondicionados em sacos de polietileno para seguir para o laboratório.

Figura 4 – A) Localização do ponto central de coleta do perfil e amostras do substrato na lagoa LB4. B) Demonstração das profundidades (cm) selecionadas para as análises geoquímicas em cada um dos perfis sedimentares.



Fonte: Próprio autor, (2018).

4.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E MÉTODOS ANALÍTICOS

As amostras de sedimento, foram analisadas no laboratório Acme – (Canadá), onde foram colocadas em uma estufa a 60 °C, e, posteriormente, foram desagregadas e peneiradas (2mm). Em seguida, as amostras resultantes foram homogeneizadas em almofariz de ágata devidamente higienizados com álcool etílico após cada uso. As amostras de rochas foram pulverizadas usando o moinho de carboneto de tungstênio e peneiradas a <75 µm. Os elementos maiores e menores (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅) foram determinados por Espectrometria de Emissão Ótica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES), os elementos traços (Ba, Sr, Rb, Pb, Sc, Th, U, Zr, Hf, Nb, Y, Cu, Zn, As, Se, Mo, Hg, V, Cr, Ga, Co, Ni) e terras raras (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) por Espectrometria de Massa por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS), após fusão com tetraborato de lítio e digestão com ácido nítrico diluído em 0,2 g de amostras em pó para a maioria dos elementos traços, exceto As, Se, Hg, Ni, Cu, Sc, Pb e Zn, que sofreram digestão por água régia.

As amostras de solo e rocha foram analisadas no Laboratório ALS Brasil, onde os seus elementos maiores e menores foram analisados por Fluorescência de Raio-X (FRX), enquanto os elementos traços, foram analisados por meio do ICP-MS, após fusão com tetraborato e digestão com ácido nítrico diluído, exceto As, Se, Hg, Ni, Cu, Sc, Pb e Zn que sofreram digestão por água régia. O enxofre total (TS) e o carbono orgânico total (TOC) foram analisados em 0,2 g de amostras secas ao ar com o analisador de combustão LECO CS-300. Por fim o P.F foi obtido com a diferença de massa após a ignição a 1000 ° C.

4.3 AVALIAÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS

As técnicas estatísticas exigem que algumas condicionantes sejam atendidas para que os testes funcionem corretamente, sendo necessária a aplicação de uma análise crítica no banco de dados para minimizar possíveis erros e garantir maior confiabilidade nos resultados obtidos. Os itens a seguir descreverão os critérios utilizados para esse controle e a tabela resumida com mínimo, máximo e média (Tabela 4).

4.3.1 Seleção de Elementos

Nesta etapa foram aplicados três critérios de seleção: os elementos que apresentaram um percentual igual ou acima de 50% de amostras abaixo do LD não foram selecionados; os elementos que foram analisados por dois métodos diferentes (ME-MS41, pelo método de digestão por água régia, e ME-MS81, pelo método de fusão por tetraborato de lítio) e, após uma comparação entre ambos, foi selecionado o método que apresentou o resultado mais adequado ao elemento; e, por último, para a etapa da estatística multivariada os elementos que apresentaram variância igual a zero (devido as baixas concentrações) na análise descritiva, mais o Total e P.F, não foram utilizados.

4.3.2 Limite de detecção (LD)

Os LD foram identificados por meio da ficha técnica fornecida pelos laboratórios (ALS e Acme), e o percentual das amostras que ficaram abaixo LD foi obtido por meio da fórmula $(100 * (Tam < LD / Tam))$, onde Tam < LD representa as amostras abaixo do LD e Tam o total de

amostras. Para a aplicação da transformação *clr* nos dados originais foi necessário que nos elementos identificados abaixo do LD fosse aplicado o método de substituição simples (Reimann e Filzmoser, 2000), que é a determinação de um valor comum que possa ser utilizado na análise, este valor é obtido com a fórmula ($<LD_{min}/2$), onde LD_{min} corresponde ao valor abaixo do LD.

4.3.3 Precisão e Acurácia

Precisão foi obtida com a utilização do *Relative Percent Difference* (RPD), adotando como valor limite 15%, com a fórmula $((Am-Dup)/((Am+Dup)/2))*100$ onde *Am* é amostra, *Dup* a duplicata, enquanto que a acurácia, foi verificada por análise paralela de padrões internacionais (GBM303-4, MRGeo08, OREAS-45c, GBM908-10, GRE-3, OREAS 146, NCSDC73303, OGGeo08 e BLANK), descritos na ficha técnica dos laboratórios, e calculada pelo *Residual Standard Deviation* (RSD), sendo $((DPM/MdM)*100)$, *DPM* é o desvio padrão dos valores medidos e *MdM* média dos valores medidos, com valor satisfatório no intervalo de ± 15 e também o percentual de recuperação (*Recovery*%), que utiliza a (*MdM*) e a média dos valores certificados (*MdC*). A duplicata, acurácia e os padrões internacionais são utilizados para garantir a eficiência do método de extração bem como promover a validação dos resultados.

4.4 ESTATÍSTICA E ANÁLISE DOS DADOS

As análises descritivas e multivariadas dos dados geoquímicos (elementos maiores, traços e ETRs) seguiram os métodos mais citados na literatura Aitchison (1986); Tolosana-Delgado (2008); Reimann e Filzmoser (2000); Filzmoser et al. (2009); Grunsky (2010); Geranian et al. (2013); Reimann et al. (2012b); Van den e Tolosana-Delgado (2013); Pawlowsky-Glhn et al. (2015) e foram analisadas utilizando o software estatístico R[®] versão 3.5.1 (R Development Core Team, 2018) e Excel[®] 2016. As análises foram aplicadas aos dados originais, para os dados transformados com ($\log_{10}$) e também (*clr*), que proporciona a abertura dos dados geoquímicos que são de natureza fechados. A transformação (*clr*) foi realizada também pelo software R[®] com o pacote (*robCompositions*) de (AITCHISON, 1986). O CCS de (WEDEPOHL, 1995) e o Condrito de Schmitt et al. (1963), foram utilizados para normalização dos dados e para outras interpretações geoquímicas como em (SAHOO

et al., 2015a). Uma tabela completa do banco de dados pode ser visualizada no material complementar (Apêndice A).

4.4.1 Estatística Descritiva

A análise estatística descritiva aplicada aos dados, incluí mínimo, máximo, média, mediana, assimetria, curtose, desvio padrão e variância. A distribuição e a normalidade foram verificadas tanto nos dados brutos quanto nos dados transformados, com a utilização de uma combinação de técnicas gráficas como o edaplot, QQ-Plot e boxplot, e também com a aplicação de um teste mais robusto de análise de normalidade *Shapiro-Wilk* (S-W) (SHAPIRO 1965) (Tabela 3), sugerido como um dos métodos mais adequados para essa verificação (FITRIANTO e CHIN, 2016; DAS et al., 2016; GHASEMI e ZAHEDIASL, 2012) realizado também no software R[®].

4.4.2 Estatística Multivariada

Os métodos multivariados utilizados foram: análise de correlação, análise (PCA) e análise de cluster e (LDA). A correlação entre os elementos, no conjunto de dados da serra Bocaina, foi determinada com método *Spearman correlations* (r), menos sensível a outliers e utilizado em dados majoritariamente sem distribuição normal, que é o caso deste banco de dados.

A identificação do coeficiente de correlação (r) crítico, foi baseado na metodologia proposta por Sinclair e Blackwell (2004), onde para variáveis múltiplas um valor de correlação significativo de 0,01 necessita de coeficiente ($\geq 0,57$). A análise do (PCA) foi utilizada para obter as relações entre cada variáveis, bem como reduzir a dimensionalidade e simplificar a interpretação dos dados trabalhados (SAHOO et al., 2016a), foi obtido por meio da função *PCA* do pacote (Psych) do R[®]. Esta análise serviu para avaliar a relação entre os sedimentos das lagoas e o material da bacia (crosta laterítica e solos enriquecidos em Al) e o material de referência (CCS, FFB).

A LDA foi utilizada para explorar melhor essa relação, fazendo a classificação dos sedimentos entre grupos de objetos e é utilizada para estudos de proveniência (Ranasinghe et al., 2009), aplicada aos dados transformados por clr. Todas as análises realizadas nessa pesquisa foram aplicadas aos dados originais, transformados por log10 e clr, para compensar a grande diferença de magnitude entre os elementos amostrados e as diferentes unidades de medidas.

4.4.3 Índices de Intemperismo, razão elementar e classificação de lateritas

Nesta pesquisa foi utilizada uma combinação de técnicas encontradas na literatura sobre quantificação de intemperismo, bem como classificação de lateritas. Os índices foram usados com a finalidade de comprovar o material existente como lateritas e mostrar uma sequência de atuação dos processos de intemperismo nele desde a rocha fonte.

Os três índices relativos ao grau de intemperismo mais utilizados são: CIA – Índice de alteração química ($CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) \times 100$, que utiliza concentrações molares dos elementos e CaO^* que corresponde a porção associada ao silicato Nesbitt et al. (1996), associado ao com diagrama ternário $Al_2O_3(A) - CaO - Na_2O(CN) - K_2O(K)$. E o teor de CaO^* nesta pesquisa obedeceu a metodologia proposta por McLennan (1993), realizando a subtração da concentração molar de CaO e P_2O_5 , comparados a proporção molar de Na_2O_3 . O MIA – Índice de alteração máfica ($MIA_{(O)} = 100 * [(Al_2O_3 + Fe_2O_3(T)) / (Al_2O_3 + Fe_2O_3(T) + MgO + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$) que quantifica a perda líquida dos principais elementos móveis (Ca, Mg, Na, K $\pm$ Fe) em relação aos mais imóveis (Al $\pm$ Fe), (Babechuk et al., 2014). E o IOL – Índice de Lateritização/Intemperismo ($IOL = 100 * [(Al_2O_3 + Fe_2O_3(T)) / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3(T))]$) utilizado para delinear o grau de intemperismo máximo (Babechuk et al., 2014). Para os cálculos das razões elementares foram utilizadas as médias das concentrações dos elementos em cada lagoa (dados brutos) e para o cálculo de Eu/Eu^* e Ce/Ce^* , além da utilização das médias em cada lagoa, são utilizadas as concentrações normalizadas (N) em relação ao condrito, onde o cálculo se dá por: $Eu/Eu^* = (Eu_N / \sqrt{(Sm_N \times Gd_N)})$ de (Schmitt et al., 1963) e para o par: $Ce/Ce^* = (Ce_N / \sqrt{(La_N \times Pr_N)})$.

O sistema proposto por Karunakaran e Sinha Roy (1981) define que para teores de $Fe_2O_3 / Al_2O_3 > 1$ e $SiO_2 / Fe_2O_3 < 1,33$, as lateritas são ferruginosas; e, para teores de $Fe_2O_3 / Al_2O_3 < 1$ e $SiO_2 / Fe_2O_3 > 1,33$, as lateritas são aluminosas. A classificação de Martin e Doyne (1927) considera os seguintes limites para K_i : quando $K_i < 1,33$ = laterita verdadeira, K_i entre 1,33 e 2,00 = solo laterítico e $K_i > 2,00$ = solo não laterítico. Medina (1970) utiliza os mesmos limites para a relação molecular de K_r , obtendo, assim, os mesmos resultados.

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DO CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS ANALÍTICOS

De acordo com os critérios descritos na metodologia, 50 elementos não foram utilizados nas análises, sendo a maioria dos elementos que foram analisados pelo método ME-MS41(Digestão por água Régia), que forneceu valores baixos para muitos elementos e os que tiveram 50% dos seus valores abaixo do LD. Restaram 49 variáveis sendo: Total e P.F e 47 elementos detalhados na (Tabela 2) para aplicação das técnicas da estatística descritiva e estatística multivariada. Dentre os elementos selecionados somente os elementos arsênio (As) e selênio (Se), determinados pelo método ME-MS41 apresentaram amostras abaixo do LD, porém com percentual pequeno de 11% e 9% respectivamente, viabilizando seu uso.

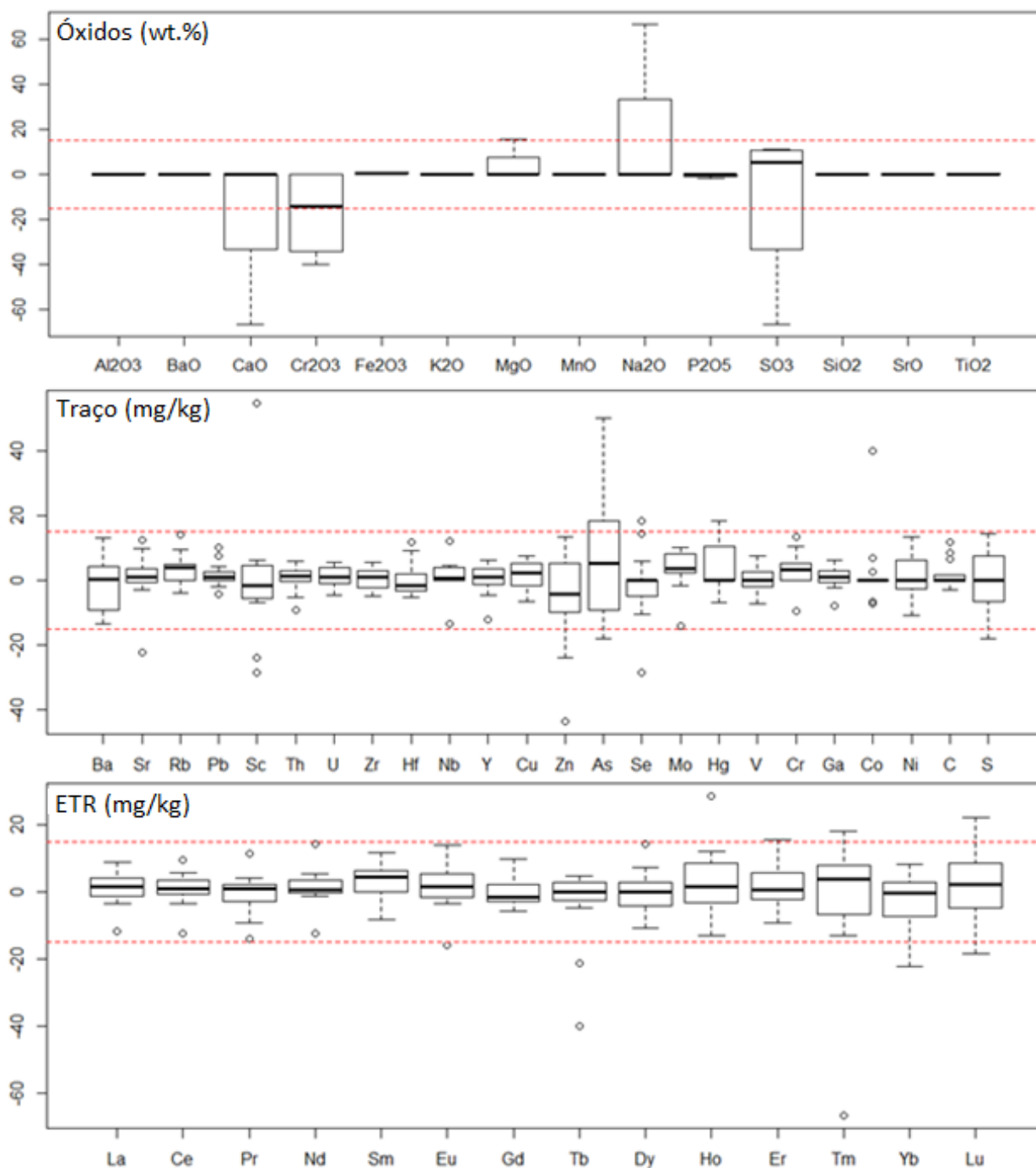
Tabela 2 – Elementos selecionados de sedimentos, rocha e solo e seus respectivos métodos de análise química realizada nos laboratórios.

Método	Elementos
ME-XRF26	SiO ₂ , TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , MnO, CaO, Na ₂ O, K ₂ O, P ₂ O ₅ , Total
OA-GRA05x	P.F 1000
C-IR07/S-IR08	C, S
ME-MS41	Pb, Sc, Cu, Zn, As, Se, Mo, Hg, Co, Ni
ME-MS81	Ba, Sr, Rb, Th, U, Zr, Hf, Nb, Y, V, Cr, Ga, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy , Ho, Er, Tm, Yb, Lu

Fonte: Próprio autor, (2018).

A precisão foi obtida por meio do RPD, calculados para as duplicatas, onde a maioria ficou dentro da margem de $\pm 15\%$, exceto CaO, Cr₂O₃, Na₂O, SO₃ (Fig. 5), que são elementos que não serão utilizados na estatística multivariada, sendo os elementos restantes aceitáveis de acordo com (Eppinger et al. 2015, Sinclair & Blackwell 2004). E a acurácia obtida pelo cálculo do RSD, baseado nos padrões de referência (GBM303-4, MRGeo08, OREAS-45c, GBM908-10, GRE-3, OREAS 146, NCSDC73303, OGGeo08 e BLANK), tanto para sedimento quanto para rocha e solo não ultrapassaram o limite de 15%, um exemplo desse cálculo pode ser observado na (Tabela 3). Os elementos do branco apresentaram quase todos os valores abaixo do limite de detecção, ou seja, a contribuição desta análise pode ser desprezada. Esses resultados garantem a qualidade dos dados trabalhados nesta pesquisa.

Figura 5 – Boxplot para representar o cálculo de precisão, para os óxidos, elementos traço e ETRs considerando percentual de diferença entre as duplicatas e limite de $\pm 15\%$. (RPD) *Relative Percent Difference*.



Fonte: Próprio autor, (2018).

Tabela 3 – Exemplo do cálculo de recuperação (REC) e RSD para avaliação de acurácia com elementos maiores para o padrão NCSDC73303.

Padrão	NCSDC73303 (N=4)				
Elemento (%)	MdC	MdM	DPM	REC %	RSD
Al ₂ O ₃	13,83	13,87	0,03	100	0,19
BaO	–	0,06	0,00	0	0,00
CaO	8,81	8,91	0,05	101	0,53
Cr ₂ O ₃	–	0,02	0,01	0	35,36
Fe ₂ O ₃	13,4	13,40	0,05	100	0,39
K ₂ O	2,32	2,30	0,01	99	0,36
MgO	7,77	7,80	0,04	100	0,52
MnO	–	0,18	0,00	0	2,44
Na ₂ O	3,38	3,42	0,03	101	0,94
P ₂ O ₅	–	0,97	0,01	0	1,16
SO ₃	–	0,02	0,01	0	35,36
SiO ₂	44,64	44,90	0,18	101	0,41
SrO	–	0,14	0,00	0	3,04
TiO ₂	–	2,42	0,02	0	0,74

Fonte: Próprio autor, (2018).

Nota: Média dos valores medidos (MdM); Média dos valores certificados (MdC); Desvio padrão dos valores medidos (DPM); Residual Standard Deviation (RSD).

5.2 RESULTADOS DA ESTATÍSTICA DESCRITIVA E CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS DADOS

A estatística descritiva está resumida na (Tabela 4) e a visualização por meio de gráficos *edaplot*, *qq-plot* e *boxplot*, ambos gráficos foram gerados para os três tipos de dados (Dados brutos, com log10 e clr), a exemplo SiO₂ e Zr (Fig. 6 e 7) e os demais elementos estão no (Apêndice B e C), possibilitando a visualização do comportamento do elemento em cada situação.

As técnicas foram processadas nas 44 amostras de sedimento, 2 de solo e 14 de rocha, aos 47 elementos mais P.F, com exceção da transformação por clr, onde todos os elementos foram utilizados e posteriormente selecionados respeitando a característica de dado fechado, para isso os dados necessitaram inicialmente de um tratamento mais específico, que substituiu os valores dos elementos abaixo do LD por um único valor médio de toda a planilha, conforme metodologia adotada por (REIMANN; FILZMOSER, 2000) e padronização de unidades.

Tabela 4 – Estatística descritiva dos elementos maiores (wt.%), traços e ETRs (mg/kg) nos perfis sedimentares (n=4), crosta laterítica da Bocaina (LC) e solo laterítico (L-solo), das lagoas da Serra Bocaina, comparado às concentrações das Formações Ferríferas Bandadas (FFB), da Crosta continental superior (CCS) e com valores de (p-value) do teste de Shapiro-Wilk, para dados brutos, com log10 e clr.

	LB1			LB2			LB3			LB4			LC	L-Solo	FFB	CCS	p-value DB	p-value log10	p-value clr
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Med	Med					
SiO ₂	37,19	43,79	39,8	16,63	46,53	38,8	12,56	53,24	36,6	38,15	49,63	49,2	1,55	22,26	46,61	64,92	<0,05	<0,05	<0,05
TiO ₂	3,12	3,73	3,40	3,17	4,51	4,0	3,52	5,58	5,0	2,93	4,01	3,8	2,52	4,76	0,01	0,52	<0,05	0,06	0,52
Al ₂ O ₃	23,11	27,73	25,8	22,68	31,05	28,5	15,86	49,40	34,7	15,56	22,23	21,6	22,36	26,58	0,05	14,63	0,1	0,68	<0,05
Fe ₂ O ₃	4,85	10,80	8,3	3,36	26,28	8,0	6,29	21,79	8,7	3,88	19,37	4,1	57,94	35,34	50,71	4,42	<0,05	0,2	<0,05
MgO	0,02	0,06	0,03	0,03	0,09	0,06	0,02	0,14	0,07	0,11	0,12	0,1	0,04	0,10	0,07	2,24	<0,05	<0,05	<0,05
MnO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,05	0,03	0,03	0,04	0,02	0,07	<0,05	<0,05	<0,05
CaO	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,05	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01	0,06	0,01	4,12	<0,05	<0,05	0,36
Na ₂ O	0,01	0,04	0,01	0,02	0,04	0,03	0,01	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,06	0,01	3,46	<0,05	<0,05	<0,05
K ₂ O	0,08	0,09	0,08	0,06	0,09	0,08	0,01	0,26	0,10	0,28	0,32	0,31	0,01	0,06	0,01	3,45	<0,05	<0,05	<0,05
P ₂ O ₅	1,18	1,64	1,33	0,95	1,49	1,26	0,15	2,40	0,56	0,05	0,09	0,06	0,51	0,84	0,01	0,15	<0,05	<0,05	<0,05
TOC	3,50	8,03	4,12	1,63	11,40	2,63	0,61	4,77	1,40	7,43	9,00	8,34	0,47	3,42	0,3	0,4	<0,05	0,69	0,56
TS	0,08	0,11	0,09	0,01	0,04	0,01	0,01	0,03	0,02	0,04	0,07	0,05	0,06	0,11	0,05	0,45	<0,05	<0,05	<0,05
P.F	18,56	26,40	20,4	14,66	30,94	17,5	10,59	17,22	14,08	19,83	23,58	21,28	14,31	9,55	1,5	4			

Fonte: Próprio autor, (2018).

Nota: Min-Mínimo; Max-Máximo; Med-Mediana; DB-Dados Brutos. Os valores em negrito são referentes aos elementos que atingiram a normalidade.

Continuação...

Tabela 4 – Estatística descritiva dos elementos maiores (wt.%), traços e ETRs (mg/kg) nos perfis sedimentares (n=4), crosta laterítica da Bocaina (LC) e solo laterítico (L-solo), das lagoas da Serra Bocaina, comparado às concentrações das Formações Ferríferas Bandadas (FFB), da Crosta continental superior (CCS) e com valores de (p-value) do teste de Shapiro-Wilk, para dados brutos, com log10 e clr.

	LB1			LB2			LB3			LB4			LC		L-Solo	FFB	CCS	p-value	p-value	p-value
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Med	Med				DB	log10	clr
Ba	26,1	33,4	29,20	23,20	45,1	30,70	89,1	266	217	185	222	219	30	30,25	7	668	<0,05	<0,05	<0,05	
Sr	5,6	6,3	6,10	4,50	10,4	5,50	21,3	68,3	46,45	20,5	26,4	25,90	13,30	13,80	0,7	316	<0,05	<0,05	<0,05	
Rb	2,6	2,8	2,60	2,30	3,5	2,60	0,8	9,5	5,6	10,3	12,8	12,80	0,20	1,90	0,8	110	<0,05	<0,05	0,1	
Pb	15,5	16,8	16,30	11,40	19,2	17,35	4	17,1	12,25	11,2	14,3	13,90	4,45	14,55	2,1	17	<0,05	<0,05	<0,05	
Sc	17	22,6	21,80	10,10	23,6	19,55	11,7	31,1	23,2	12,6	15,1	13,60	18,10	18,10	1	7	0,88	0,19	0,09	
Th	24,4	30	27,20	28,20	38,6	34,35	24,8	64,1	43,35	22,6	30,0	29,50	24,60	33,55	0,2	10	<0,05	0,12	<0,05	
U	3,7	4,61	4,00	3,86	5,69	4,77	4,42	6,23	5,625	4,14	5,13	5,04	2,58	5,01	0,1	2,5	0,17	0,07	0,09	
Zr	679	744	698	665	900	785	934	1240	1080	742	1010	1000	527	1135	1	237	<0,05	<0,05	0,67	
Hf	18,8	21,5	19,90	18,60	24,9	21,90	24,5	31,7	27,05	20,7	25	24,80	13,45	28,25	0,1	5,8	0,12	0,06	0,91	
Nb	36,5	44,5	40,80	38,40	56,7	49,20	43,1	68,7	60,9	40,3	49	48,20	30,85	54,15	0,1	26	<0,05	<0,05	0,69	
Y	20,2	26,3	21,80	19,50	36	26,50	28	49,2	36,65	31,3	39,5	38,60	12,45	24,85	2,6	20,7	0,17	<0,05	0,92	
Cu	67,9	92,5	73	45,50	95,8	73,55	45,2	133,5	73,6	53,7	74,8	54,80	23,15	42,75	11,6	14	0,09	0,73	0,56	
Zn	21	47	33	11,00	27	19	39	116	62	8	35	30,00	5	23	16	52	<0,05	0,11	0,12	
As	0,5	0,8	0,70	0,30	1,2	0,65	0,1	0,5	0,2	0,2	0,7	0,30	4,60	1,00	0,6	2	<0,05	<0,05	<0,05	
Se	0,6	0,8	0,70	0,40	1,2	0,60	0,2	0,5	0,2	0,4	0,4	0,40	0,30	0,25	0,5	0,1	<0,05	<0,05	0,36	
Mo	1,64	3,04	2,51	0,74	3,93	1,80	1,01	2,17	1,56	0,57	1,95	0,67	3,99	3,59	0,5	1,4	<0,05	0,77	0,22	
Hg	0,06	0,08	0,07	0,06	0,17	0,11	0,02	0,79	0,06	0,04	0,08	0,08	0,09	0,13	0,01	0,056	<0,05	<0,05	0,32	
V	203	373	336	161	414	334,50	219	636	388,5	274	369	366	416	403,50	19	53	<0,05	0,48	<0,05	
Cr	240	300	300	180	310	250	180	450	300	290	400	390	315	290	34	35	<0,05	0,36	<0,05	
Ga	43,1	53	49	42,1	63,4	51,65	28,2	110,5	65,5	28,5	40,4	38,30	40,50	52,1	0,5	14	<0,05	0,49	<0,05	
Co	0,4	0,5	0,40	0,3	1,3	0,50	0,7	8,1	3	1,2	4,8	1,30	0,45	0,95	0,4	12	<0,05	<0,05	<0,05	
Ni	4,5	5,8	5,40	4,1	12,9	5,40	3,1	24,2	17,1	17,4	17,5	17,50	2,20	5,65	20	18,6	<0,05	<0,05	<0,05	

Fonte: Próprio autor, (2018).

Nota: Min-Mínimo; Max-Máximo; Med-Mediana; DB-Dados Brutos. Os valores em negrito são referentes aos elementos que atingiram a normalidade.

Continuação...

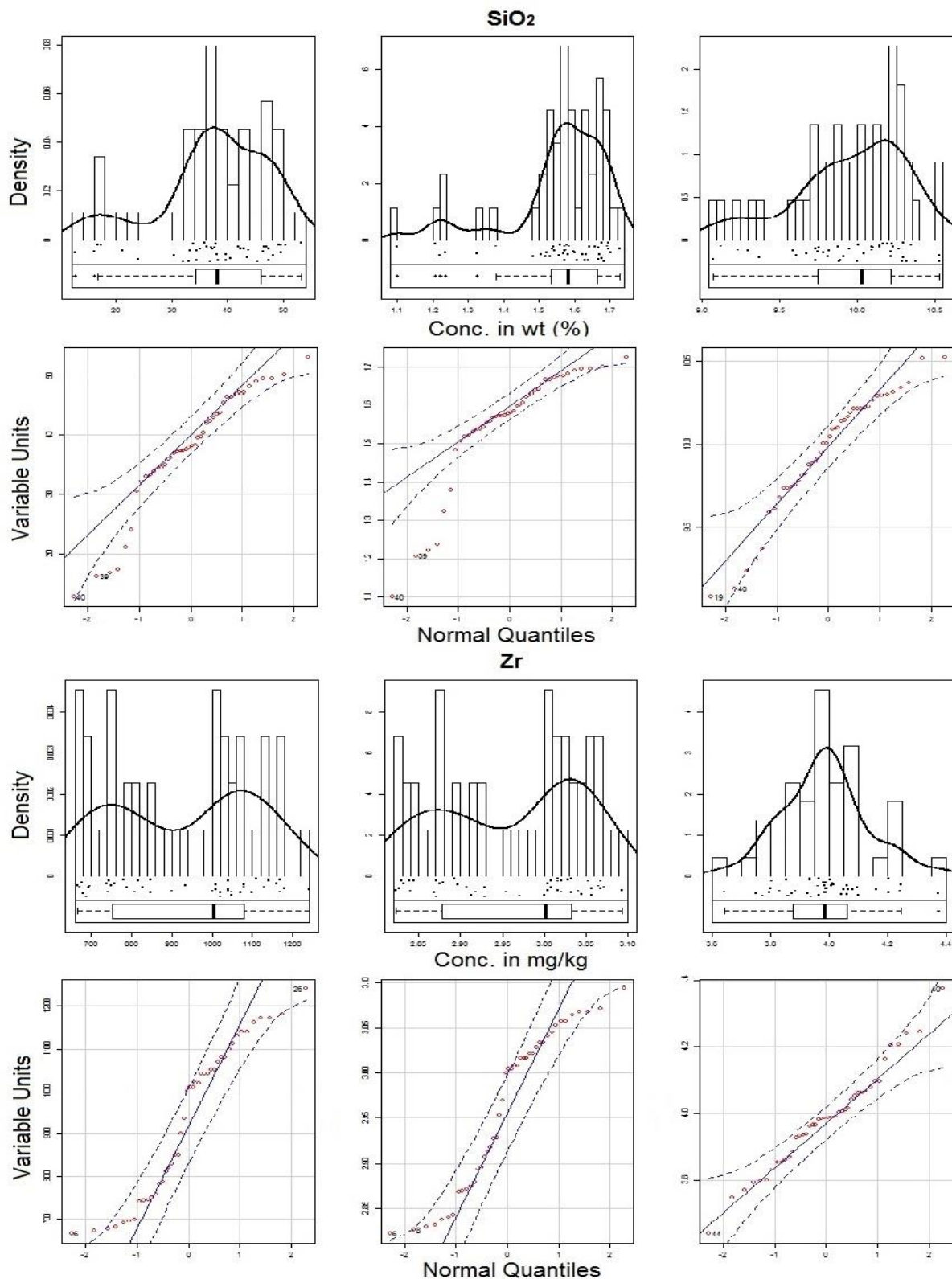
Tabela 4 – Estatística descritiva dos elementos maiores (wt.%), traços e ETRs (mg/kg) nos perfis sedimentares (n=4), crosta laterítica da Bocaina (LC) e solo laterítico (L-solo), das lagoas da Serra Bocaina, comparado às concentrações das Formações Ferríferas Bandadas (FFB), da Crosta continental superior (CCS) e com valores de (p-value) do teste de Shapiro-Wilk, para dados brutos, com log10 e clr.

	LB1			LB2			LB3			LB4			LC	L-Solo	FFB	CCS	p-value	p-value	p-value
	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Med	Med			DB	log10	clr
La	13,2	23,2	15,30	8,6	48,2	22,30	36,30	72,2	45,40	38,8	45,7	45,20	29,45	23,6	1,9	30	<0,05	<0,05	<0,05
Ce	31,4	52,1	37,3	20,2	87,5	49,95	68,20	112	80,45	74,1	81,9	79,60	41,80	40,5	1,5	64	<0,05	<0,05	<0,05
Pr	3,96	6,29	4,92	2,65	9,26	5,91	7,06	14,35	8,66	8,11	9,3	8,90	5,37	4,8	0,16	7,1	0,47	<0,05	<0,05
Nd	15,7	23,5	18,7	10,7	33,9	22,00	26,7	47,7	33,65	28,3	31,2	31,20	18,20	18,25	0,8	26	0,38	<0,05	<0,05
Sm	3,11	4,30	3,56	2,51	6,21	3,98	4,73	7,7	5,8	5,35	5,73	5,38	2,93	3,14	0,09	4,5	0,25	<0,05	<0,05
Eu	0,76	0,99	0,93	0,65	1,41	1,02	1,08	1,79	1,37	1,28	1,34	1,30	0,66	0,82	0,1	0,88	0,28	<0,05	<0,05
Gd	2,95	4,27	3,65	2,39	5,74	4,19	4,58	6,62	5,50	5,50	5,98	5,66	2,16	3,23	0,06	3,5	<0,05	<0,05	0,88
Tb	0,56	0,68	0,59	0,44	0,93	0,71	0,77	1,17	0,90	0,91	1,02	0,99	0,33	0,64	0,01	0,64	0,32	<0,05	0,35
Dy	3,33	4,2	3,79	3,15	6,02	4,37	4,59	7,66	5,90	5,88	6,45	6,39	1,94	4,2	0,13	3,5	0,2	<0,05	0,57
Ho	0,75	0,95	0,85	0,72	1,34	1,00	1,00	1,68	1,27	1,27	1,41	1,36	0,45	0,92	0,02	0,8	0,22	<0,05	0,92
Er	2,48	2,99	2,81	2,62	4,36	3,34	3,53	5,40	4,20	3,98	4,78	4,54	1,52	3,35	0,06	2,3	0,35	0,08	0,68
Tm	0,43	0,56	0,47	0,41	0,67	0,55	0,58	1,95	0,71	0,60	0,73	0,70	0,24	0,52	0,03	0,33	<0,05	<0,05	<0,05
Yb	3,22	3,85	3,53	3,38	5,15	4,12	4,32	6,45	5,24	4,60	5,25	5,01	2,18	4,05	0,07	2,2	0,12	<0,05	0,28
Lu	0,51	0,66	0,57	0,53	0,8	0,67	0,76	0,99	0,85	0,7	0,82	0,79	0,36	0,61	0,02	0,32	0,15	<0,05	0,48

Fonte: Próprio autor, (2018).

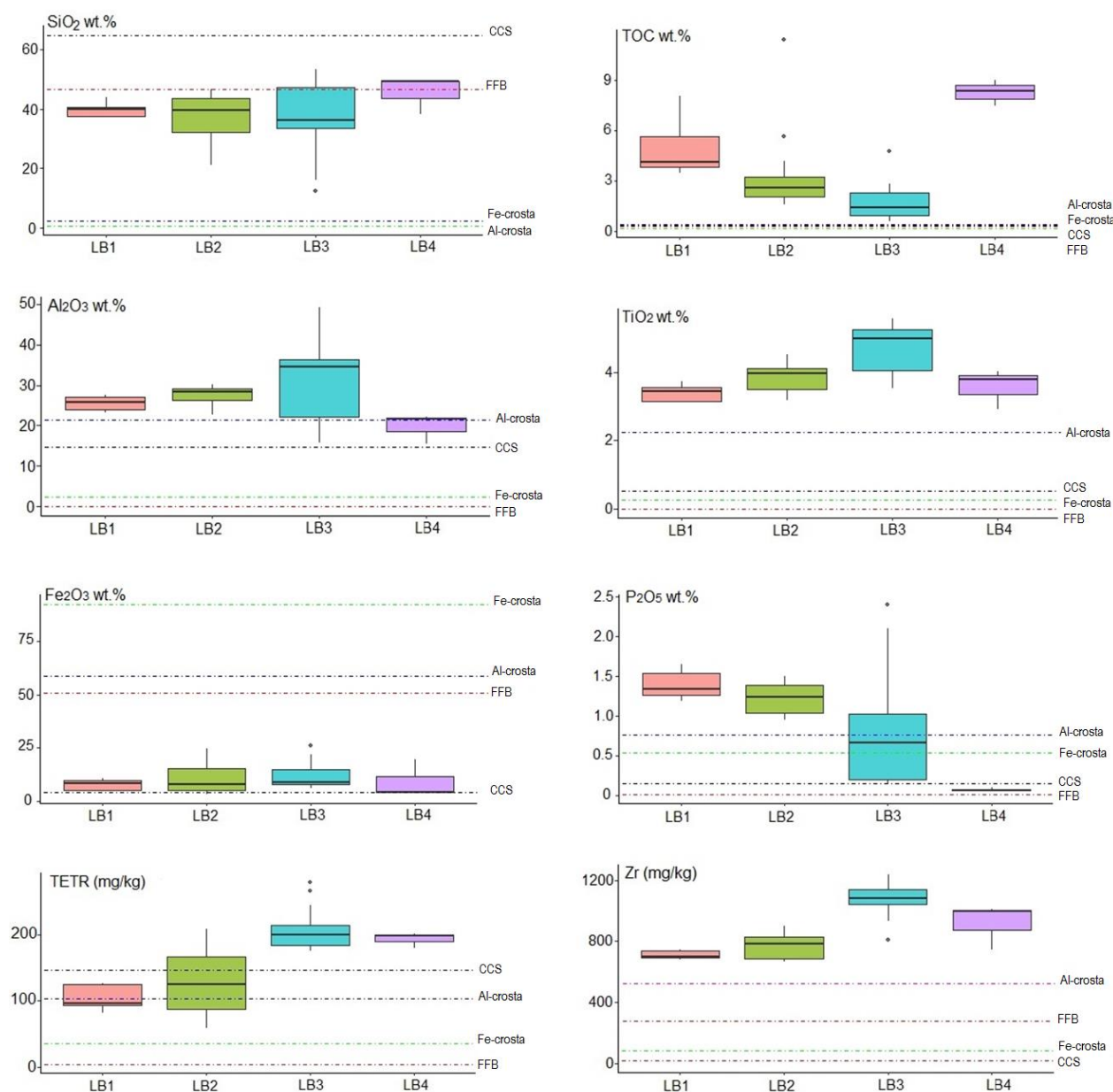
Nota: Min-Mínimo; Max-Máximo; Med-Mediana; DB-Dados Brutos. Os valores em negrito são referentes aos elementos que atingiram a normalidade.

Figura 6 – Edaplot e QQ-plot para SiO₂ e Zr, mostrando a distribuição desses elementos nos diferentes tipos de dados. a) Dados brutos, b) Dados com log10, c) Dados com clr.



Fonte: Próprio autor, (2018).

Figura 7 – Gráficos Boxplot das concentrações nos sedimentos de SiO_2 , TOC, Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , P_2O_5 , ETRs e Zr, da Crosta Laterítica aluminosa (Al-Crosta) em cada lagoa com indicação dos valores de referência das Formações Ferríferas Bandadas (FFB), da Crosta continental superior (CCS), e Crosta Ferruginosa (Fe-Crosta) das Três Irmãs (SAHOO et al., 2017).



Fonte: Próprio autor, (2018).

O comportamento dos elementos considerando a observação da estatística básica mostrou sutis diferenças entre a média e a mediana dos elementos e valores relativamente elevados para variância e desvio padrão (Ba, Sr, Zr, Zn, V, Cr, Ce) e alta curtose (Hg, Tm), alguns elementos apresentaram assimetria negativa, entre eles a maioria dos ETR's, esse comportamento pode indicar a não normalidade e ser influenciado também pela característica do dado que apresenta grande amplitude de variação. Os valores elevados para a assimetria e curtose podem ser atribuídos aos processos de intemperismo e erosão terem atuado sobre variados tipos de rochas e diferenças no processo de sedimentação. A aplicação do teste de *Shapiro-Wilk* mostrou por meio do *p-value* (Tabela 4) que de fato muitos elementos não possuem distribuição normal e que após a transformação por clr as distribuições melhoraram consideravelmente como exemplo o Zr (Fig. 6), apresentando para o conjunto de dados: 16 elementos com distribuição normal para os dados brutos, enquanto que os transformados por log10 apenas 14 elementos dentro da normalidade e por fim os com clr alcançaram 20 elementos com distribuição normal. No entanto, mesmo após aplicação do clr foi verificado várias distribuições não normais, que é comportamento característico de dados geoquímicos.

Os valores de mediana são estatisticamente um valor de medida mais robustos que os de média por esse motivo são os valores utilizados para comparação (REIMANN et al., 2005). As lagoas em geral apresentaram uma mistura de frações orgânicas (em menor escala) e inorgânicas. A porção inorgânica é marcada pela presença de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 , Zr, Hf, Cr. Os valores da mediana (Tabela 4) mostraram que a maior concentração de SiO_2 é em LB4 (49,2%) seguido de LB1 (39,8%) (Fig. 7) enquanto que o Al_2O_3 é maior em LB3 (34,7%) e LB2 (28,5%) (Fig. 7). O Fe_2O_3 apresentou uma variação bem menor comparado aos outros acima com mediana relativamente baixa, porém a maior entre as lagoas, em LB3 (8,7%) e LB1 (8,3%) (Fig. 7). O TiO_2 e o Zr e Hf, assim como o Al_2O_3 foram maiores em LB3, seguido de LB4 (Fig. 7) e por fim V foi maior LB3 (388,5 mg/kg) e Cr maior em LB4 (39 mg/kg). Dos ETR's os que apresentaram maiores valores de mediana foram Ce, Nd e La, todos em LB3, sendo (80,5 mg/kg), (33,7 mg/kg) e (45,4 mg/kg) respectivamente. Os ETRs variaram nos sedimentos de todas as lagoas apresentando os maiores valores em LB4 e LB3 (Fig. 7). Os valores medianos altos em alguns elementos como Al_2O_3 , TiO_2 , Zr em LB3 podem ser devido a influência dos fatores que controlam a distribuição e às fácies sedimentares selecionadas. As outras lagoas que apresentaram menor concentração dos elementos detríticos em geral, podem estar relacionados com um menor input na sedimentação.

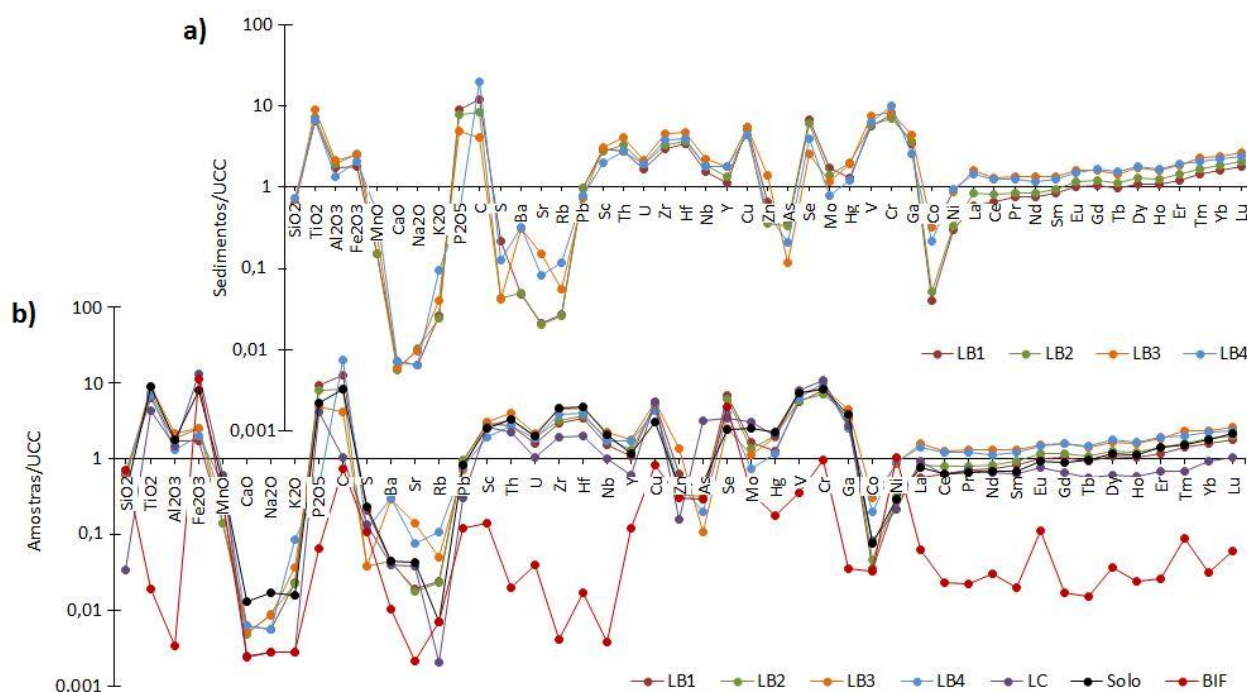
Com a normalização dos dados com relação ao CCS (Tabela 5, Fig. 8), observou-se que houve grande enriquecimento em Ti, P, Cr, Se, V, Cu, moderados para Al, Fe, Sc, Th, Ga, U, Nb, Y e fraca para os ETR's, sendo o TiO_2 no solo e sedimento, P_2O_5 em solo, rocha e nos sedimentos (exceto LB4) e Cr em todos os meios. Os ETR's apresentaram um enriquecimento moderado em todos os meios com um aumento ligeiramente maior de todos os ETR em LB3 e LB4. Já a depleção foi observada para MnO, MgO, CaO, Na_2O , K_2O , Ba, Sr, Rb, As, Ni e Co, configurando o grau de intemperismo químico na bacia. Os óxidos maiores e menores tiveram sua maior depleção observada em LB4. TiO_2 teve um enriquecimento ligeiramente maior em LB3, enquanto que C e Cr foram em LB4. Já para o Fe_2O_3 tem-se que sua maior concentração nos sedimentos é em LB2 e está relacionada ao intemperismo e aos processos erosivos da laterita na bacia, coincidido com o CIA nesta mesma lagoa (Tabela 4, 5). Em geral a concentração dos elementos traços e ETRs é menor em LB1 e LB2 e maior em LB4, quando comparado as outras lagoas.

Os valores médios da normalização por CCS apresentam um padrão de enriquecimento em crosta e solos lateríticos, comparável aos sedimentos das lagoas e mostra grande variação entre crosta laterítica ferruginosa e crosta laterítica enriquecida em Al. Algumas concentrações identificadas (Al, Ti, P, alguns elementos traços Zr, Hf e os ETRs) são significativamente mais altas em lateritas e solos enriquecidos em Al, do que em crosta e solo ferruginosos. No entanto, quando comparados ao FFB observa-se que os óxidos maiores depleciaram, exceto Fe_2O_3 , TiO_2 e P_2O_5 que apresentaram alto enriquecimento, correspondendo a bacias de drenagem que possuem crosta laterítica e solos enriquecidos em Al. O somatório de Na_2O , K_2O , CaO, MgO e MnO para os sedimentos, rocha e solo é menor que (<0,5%) em todas as lagoas, refletindo a grande mobilidade desses elementos que é típico do processo de intemperismo que forma as lateritas. Em geral as amostras de sedimento de todas as lagoas, crosta e solo apresentaram um comportamento muito semelhante (Fig. 8) confirmando a relação entre eles. Esse mesmo comportamento pode ser melhor observado na (Fig. 20) que mostra claramente com os ETRs normalizados por condrito, a similaridade entre LB1 e LB2, enquanto que LB3 assemelha-se mais a LB4.

Com base na análise das razões entre os elementos (Tabela 5), em geral o comportamento dos sedimentos foi bem distinto dos FFBs e CCS, sendo LB1 e LB2 mais semelhantes entre si e ao material enriquecido em Al da bacia. As lagoas LB3 e LB4 apresentaram uma mistura de características do material da bacia e do material de referência enriquecido em Fe, advindos da

lagoa Três Irmãs Sahoo et al., (2017) e Violão (SAHOO et al., 2015a). Ainda nos sedimentos a razão entre Eu/Eu* foi bem diferente de Três Irmãs e Violão e de FFB e CCS, mas semelhantes ao material da sua bacia (Tabela 5). Já Ce/Ce* esteve mais semelhante ao material de referência do que do material da sua bacia. Para rocha e solo que foram bem semelhantes entre si e diferente tanto do material de referência quanto de FFB e CCS. Essa metodologia de análise de algumas razões elementares é bastante utilizada para aferições quanto a proveniência, no entanto, somente ela não é suficiente. Por isso a necessidade da utilização de variadas técnicas em análises de dados geoquímicos, como as da estatística multivariada que ajuda esclarecer informações de proveniência.

Figura 8 – A) Gráfico com os valores sedimentares normalizados por Crosta Continental Superior (CCS) para os elementos maiores (wt.%), traço e ETRs (mg/kg). B) Amostras de sedimento (n=44), crosta laterítica (LC) (n=14), solo (n=2) e Formações Ferríferas Bandadas (FFB), também normalizadas por CCS.



Fonte: Próprio autor, (2018).

Os índices CIA e MIA (Tabela 5) foram avaliados em todas as amostras, e variaram dentro de pequena faixa em todas as amostras, sendo o CIA dos sedimentos próximos aos valores tanto da crosta laterítica enriquecida em alumínio quanto da crosta laterítica ferruginosa e diferentes de FFB e CCS. Já o MIA foi bastante semelhante em todos, exceto CCS. IOL alto de (97,35%) para as rochas (crosta laterítica enriquecidas em Al) confirma que houve forte processo de intemperismo enquanto que valores baixos de IOL para os sedimentos, indicam que esses sedimentos foram retrabalhados. No diagrama Al_2O_3 - K_2O - $CaO+Na_2O$ (Fig. 9a) os sedimentos das quatro lagoas se situam junto ao vértice Al_2O_3 . Quando os índices são comparados, nota-se que o CIA e MIA variaram discretamente entre as lagoas, diferentemente de IOL que apresentou variações significativas entre as elas.

Tabela 5 – Razão elementar e Índices de intemperismo, nos perfis sedimentares, crostas e solos das lagoas (LB1, LB2, LB3 e LB4), sendo Crosta Laterítica (LC) e solo (L-solo) enriquecidos em Al, comparados as Formações Ferríferas Bandadas (FFB) e Crosta continental superior (CCS) e à amostra do material de referência: Crosta e Solo enriquecidos em Fe da lagoa Três irmãs (SAHOO et al., 2016) e Violão (SAHOO et al., 2015).

Tipos	LB1	LB2	LB3	LB4	LC (n=14)	L-Solo (n=2)	Crosta Fe (n=4)	Solo Fe (n=4)	FFB	CCS
CIA	99,34	99,38	99,10	97,92	99,94	99,04	99,7	96,7	52,4	46,4
IOL	45,42	51,89	53,66	38,86	97,35	73,83	99,4	94,9	52,1	22,7
MIA	99,14	99,11	98,73	97,34	99,76	98,99	99,7	99,7	99,3	43,6
Al/K	312,33	364,51	621,57	64,90	2153,64	526,64	221	88,33	5,00	4,24
Ti/K	41,63	50,90	75,32	11,74	226,21	91,98	28	16,29	1,00	0,15
Al/Ti	7,51	7,20	6,57	5,52	9,74	5,62	8,30	5,46	5,00	28,13
Ti/Th	0,13	0,12	0,12	0,13	0,19	0,14	0,04	0,09	0,05	0,05
Th/Sc	1,33	1,82	1,88	1,98	0,69	1,90	1,44	1,44	0,20	1,43
Al/V	0,09	0,09	0,08	0,06	0,05	0,07	0,02	0,04	0,003	0,28
Al/Cr	0,09	0,11	0,10	0,05	0,06	0,09	0,05	0,03	0,001	0,42
Al/Ga	0,53	0,54	0,52	0,55	0,56	0,52	0,24	0,35	0,10	1,05
Ti/Gd	0,94	0,99	0,86	0,62	1,01	1,52	0,50	0,70	0,17	0,15
Al/La	1,51	1,48	0,66	0,45	0,99	1,53	0,24	0,46	0,03	0,49
V/Cr	1,06	1,27	1,33	0,94	1,30	1,39	2,32	0,81	0,56	1,51
La/Th	0,64	0,71	1,22	1,59	1,27	0,68	1,45	1,05	9,50	3,00
Ce/Ce*	1,00	0,98	0,90	0,92	0,76	0,87	1,04	1,05	0,64	5,95
Eu/Eu*	0,75	0,77	0,76	0,73	0,83	0,81	1,52	0,83	4,26	0,69

Fonte: Próprio autor, (2018).

Nota: Foram utilizados para esta razão os óxidos Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 em (wt.%) e os demais elementos em (mg/kg). CIA – Índice de alteração química, MIA – Índice de alteração máfica e IOL – Índice de lateritização.

A classificação do tipo de laterita obtido pelos índices de Ki, Kr e pela metodologia de Karunakaran/ Sinha Roy (1971), aplicada às amostras de rocha (Tabela 6), indicou em todos os índices que o material corresponde a uma laterita verdadeira e também ferruginosas que neste caso são enriquecidas em Al. O diagrama ternário (Fig. 9b) confirma o resultado apresentado pelos índices acima mostrando com clareza essa informação. Outra classificação realizada para os sedimentos, baseia-se no diagrama de (HERRON, 1988) (Fig. 10) que classificou os sedimentos em tipos de *Fe Shale*, mostrando que os sedimentos das lagoas são relativamente empobrecidos em material quartzo-arenoso e rico em argiloso com elevado conteúdo de Fe_2O_3 , o que indica também forte influência do material da bacia.

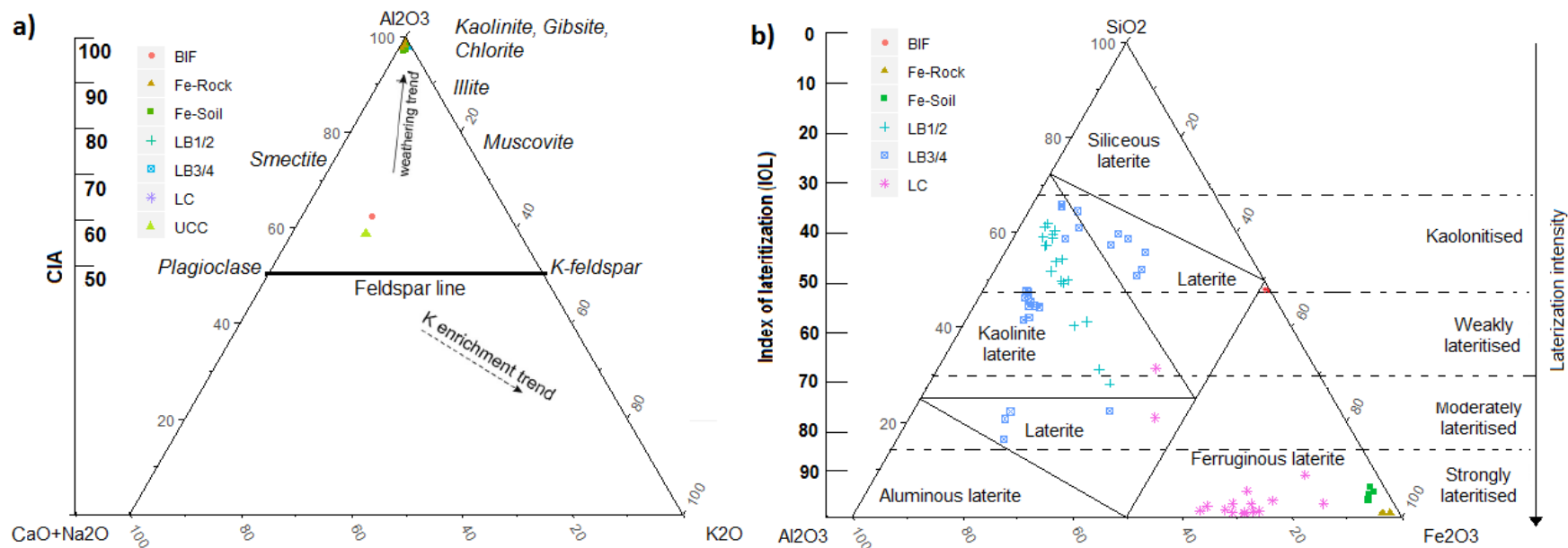
Tabela 6 - Classificação da lateritização, seguindo a metodologia de classificação de Karunakaran e Sinha Roy (1981) e por meio dos índices de intemperismo Kr e Ki, conforme classificação de Martin e Doyne (1927) e Medina (1970), para dados de rocha – crosta laterítica (LC).

CLASSIFICAÇÕES					Karunakaran/ Sinha Roy (1971)		Kr	Ki
Lagoas	Índices	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3 / Al_2O_3	SiO_2 / Fe_2O_3	$SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$	SiO_2 / Al_2O_3
LB1	Min	24,75	50,34	1,13	2,15	0,02	0,02	0,05
	Max	28,88	53,13	1,27	1,74	0,02	0,01	0,04
	Média	26,82	51,74	1,20	1,95	0,02	0,02	0,05
LB2	Min	17,72	50,28	1,83	3,45	0,05	0,04	0,16
	Máx	27,09	61,17	2,90	2,91	0,02	0,01	0,05
	Média	22,41	55,73	2,37	3,18	0,04	0,03	0,11
LB3	Min	11,21	55,36	1,08	6,64	0,03	0,03	0,23
	Max	23,86	74,49	7,81	5,97	0,11	0,10	0,68
	Média	17,54	64,93	4,45	6,31	0,07	0,07	0,46
LB4	Min	21,93	55,89	0,68	2,74	0,04	0,03	0,11
	Max	24,67	59,80	0,94	2,73	0,02	0,01	0,04
	Média	23,30	57,85	0,81	2,74	0,03	0,02	0,08

Fonte: Próprio autor, (2018).

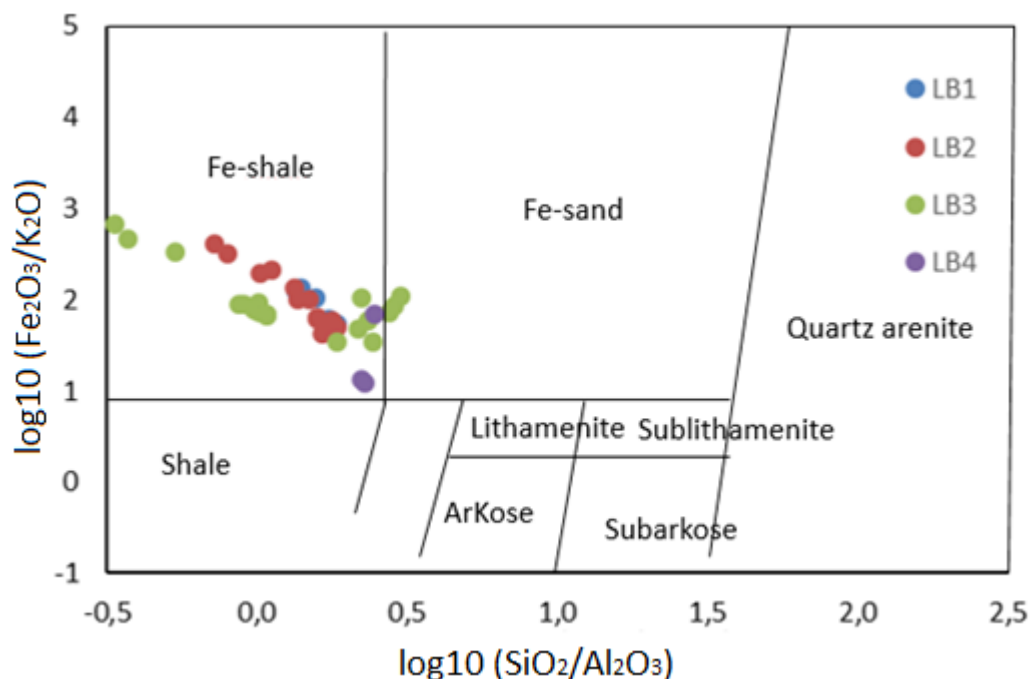
Nota: Min-Mínimo; Max-Máximo.

Figura 9 – a) A-CN-K gráfico triangular da porção molar de Al_2O_3 -($\text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O}$)- K_2O (modificado de Nesbitt e Young, 1984; Fedo et al., 1995). b) Diagrama ternário de Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2 , mostrando a classificação do material da bacia de contribuição e sedimentos (Schellmann, 1981, 1986), juntamente com os níveis de intemperismo Index of laterization (IOL) .



Fonte: Adaptação de Schellmann, 1986; Babechuk et al., 2014.

Figura 10 – Classificação geoquímica dos sedimentos das lagoas baseado no $\log_{10} (\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ versus $\log_{10} (\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$.



Fonte: Adaptado de Herron, 1988.

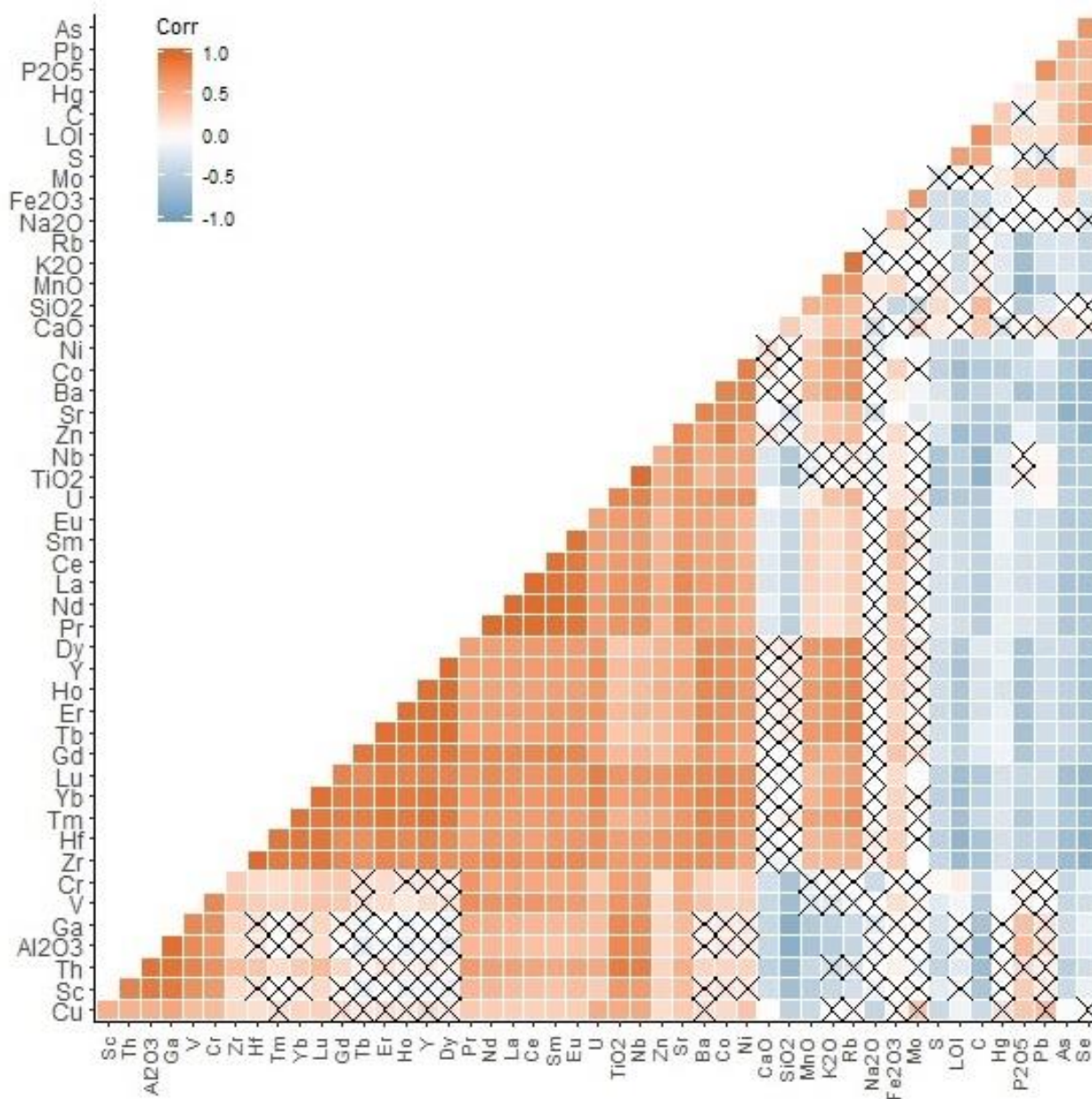
5.3 CORRELAÇÃO ENTRE OS ELEMENTOS

A matriz de correlação de *Spearman* foi gerada para os dados brutos (Fig. 11), transformados por $\log_{10}$ (Fig. 12-a) e *clr* (Fig. 12-b) de sedimento e rocha com representação dos dados de rocha *clr* (Fig. 13). Obedecendo a metodologia de Sinclair e Blackwell (2004), onde para variáveis múltiplas os valores de correlação de *Spearman* a um bom nível de significância de 0,01 precisa ter coeficientes $\geq 0,57$ (Tabela 7). Os resultados mostraram grande diferença entre a correlação dos dados $\log_{10}$ com os dados *clr*. Os dados com $\log_{10}$ apresentaram fortes correlações positivas nos sedimentos para (Ti, K, Ba, Sr, Rb, Th, U, Zr, Hf, Nb, Y, V, Cr, Co, Ni, ETRL e ETRP) e uma fraca ou negativa correlação com TOC, esse comportamento pode ser pelo fechamento dos dados que gera correlações falsas. Já para os dados de sedimento transformados por *clr*, as fortes correlações positivas ($r > 0,57$; $p \leq 0,01$) foram do Ti com (Al, Sc, Th, U, Nb, Ga) e moderada correlação ($0,35 < r < 0,43$) com (Zr, Hf), esses últimos apresentaram forte correlação com muitos ETRP (Ho, Er, Tm, Yb, Lu), que pode indicar que a fonte desses elementos possa ser terrígena e provavelmente influenciada por minerais pesados como o zircão que é um ótimo hospedeiro de

ETRs. A alta correlação entre Ti e Al ($r = 0,87$) e moderada com Zr, indica que a distribuição de Ti é influenciada por argilo-minerais e minerais pesados. Em geral as baixas concentrações de CaO, MgO, Fe₂O₃ e K₂O, influenciaram as suas correlações, no entanto a forte correlação positiva de CaO com TOC ($r = 0,59$) sugere que Ca tenha associação com minerais alogênicos. Tanto os ETRL quanto os ETRP apresentaram fraca ou negativa correlação com Al e Ti e TOC, por outro lado alguns dos ETR's (Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho) mostraram correlações moderadas com Fe₂O₃. O Ítrio se correlaciona fortemente com os ETR's em geral, sendo os maiores coeficientes ($0,64 < r < 0,94$) visualizados com os ETRP. Outra forte correlação observada foi entre Al e Ti ($r = 0,87$) indicando a presença de filtosilicatos nos sedimentos. O rubídio apresentou alto coeficiente de correlação ($r = 0,71$) com K₂O, possivelmente ambos contidos em argila. Uma importante correlação encontrada foi de SiO₂ com TOC ($r = 0,62$), enquanto que foi negativa com Fe e Al, sugerindo que o silício é controlado por componentes orgânicos como algas silicosas. As correlações fortes e positivas de TS com TOC ($r = 0,63$) e TS com P.F ($r = 0,68$), indicam que S é um típico componente orgânico lacustre. A correlação significativa entre Al e P ($r = 0,61$) pode refletir a influência de rochas máficas

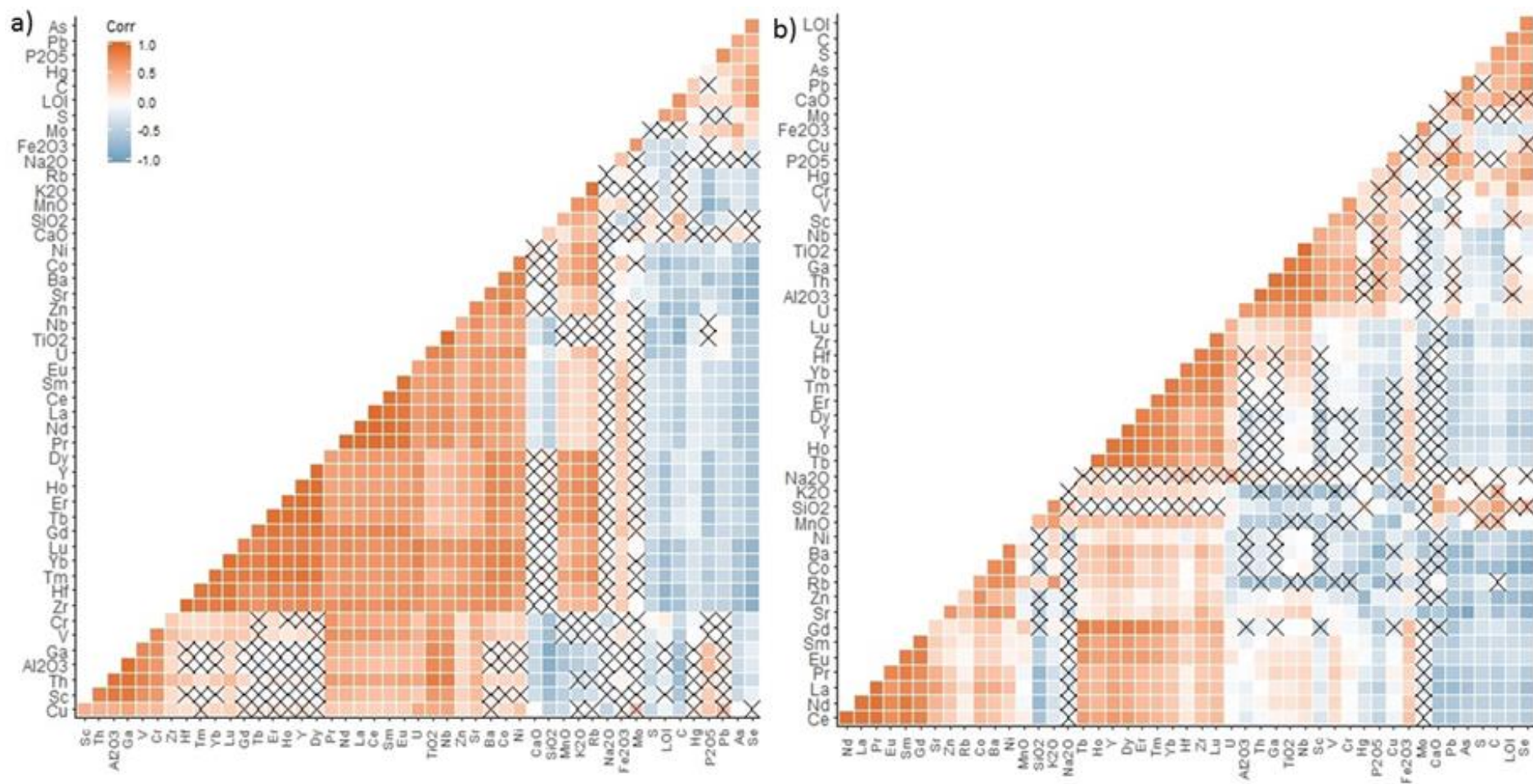
Para as amostras de rocha, os dados com clr, em geral, mostraram várias correlações altas positivas elevadas (Fig. 13). As correlações mais significativas foram: TiO₂ foi fortemente correlacionado ($0,68 < r < 0,97$) com Sr-Th-U-Zr-Hf-Nb-Y e com todos os ETRs. A alta correlação do Ti com Zr ($r = 0,93$) pode indicar controle de minerais pesados resistentes e moderada com Al ($r = 0,49$) mostra alguma influência de minerais argilos. As fortes correlações entre os ETRs com Zr e Ti, indicam, mais uma vez, que minerais pesados como o zircão estão funcionando como hospedeiros de ETRs. O Fe₂O₃ foi correlacionado apenas com K₂O ($r=0,71$) e o TOC mostrou-se correlacionado positivamente ($0,59 < r < 0,71$) com TS-Dy-Ho-Er-Tm-Yb-Lu.

Figura 11 – Matriz de correlação com o coeficiente de *Spearman* para todos os elementos dos dados de sedimento brutos, onde os quadrados marcados com (x) indicam os valores de correlação insignificantes.



Fonte: Próprio autor, (2018).

Figura 12 – Matriz de correlação com coeficiente de *Spearman* para os dados de sedimento, sendo: a) Dados transformados por log10 e b) Dados transformados por *centered log transformation* (clr).



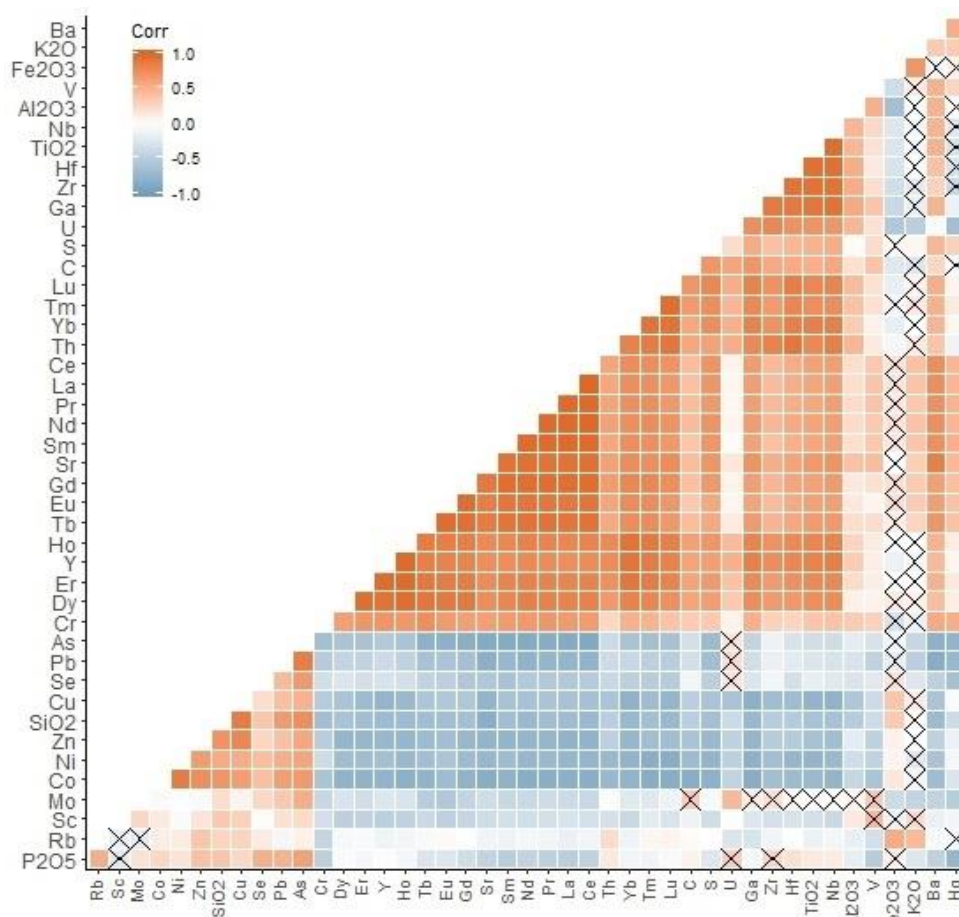
Fonte: Próprio autor, (2018).

Tabela 7 – Matriz de correlação com coeficiente de *Spearman*, com os dados de sedimento transformados *centered log transformation* (clr)., para alguns elementos selecionados. ($r > 0,57$; $p \leq 0,01$), Sinclair e Blackwell, 2004.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	U	Zr	Hf	Nb	Y	C	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
SiO ₂																								
TiO ₂	-0,33																							
Al ₂ O ₃	-0,17	0,87																						
Fe ₂ O ₃	-0,5	-0,06	-0,16																					
P ₂ O ₅	-0,04	0,45	0,61	0																				
U	0,09	0,73	0,68	0	0,34																			
Zr	0	0,35	0,13	0,04	-0,35	0,4																		
Hf	0,22	0,43	0,27	0,06	-0,13	0,62	0,86																	
Nb	-0,35	0,96	0,83	-0,05	0,35	0,74	0,37	0,42																
Y	-0,15	-0,03	-0,31	0,3	-0,55	0,16	0,64	0,51	0,05															
C	0,62	-0,51	-0,31	-0,27	0,01	-0,09	-0,38	-0,17	-0,52	-0,31														
La	-0,65	0,14	-0,13	0,24	-0,47	-0,06	0,43	0,12	0,21	0,62	-0,5													
Ce	-0,61	0,09	-0,2	0,4	-0,42	-0,03	0,38	0,16	0,16	0,68	-0,39	0,93												
Pr	-0,7	0,23	-0,03	0,27	-0,33	-0,04	0,35	0,09	0,26	0,57	-0,49	0,93	0,93											
Nd	-0,7	0,18	-0,09	0,35	-0,34	-0,02	0,35	0,11	0,24	0,6	-0,46	0,92	0,95	0,95										
Sm	-0,57	0,09	-0,13	0,42	-0,34	0,05	0,42	0,24	0,13	0,66	-0,33	0,8	0,88	0,86	0,9									
Eu	-0,46	0,19	0,01	0,34	-0,29	0,17	0,43	0,32	0,21	0,64	-0,36	0,69	0,75	0,8	0,78	0,86								
Gd	-0,35	-0,02	-0,27	0,43	-0,54	0,06	0,54	0,42	0,02	0,84	-0,25	0,74	0,83	0,77	0,78	0,87	0,86							
Tb	-0,13	-0,04	-0,28	0,39	-0,51	0,2	0,53	0,52	0,01	0,89	-0,14	0,54	0,66	0,53	0,57	0,7	0,72	0,89						
Dy	-0,1	-0,1	-0,37	0,33	-0,56	0,13	0,55	0,47	-0,05	0,94	-0,18	0,56	0,66	0,53	0,56	0,68	0,67	0,86	0,93					
Ho	-0,02	0,05	-0,23	0,31	-0,47	0,3	0,65	0,63	0,1	0,91	-0,18	0,48	0,58	0,45	0,48	0,59	0,62	0,8	0,91	0,93				
Er	0,07	0,1	-0,12	0,18	-0,46	0,38	0,72	0,71	0,13	0,86	-0,15	0,46	0,54	0,45	0,45	0,58	0,65	0,81	0,85	0,84	0,9			
Tm	0,01	0,17	-0,08	0,15	-0,42	0,37	0,82	0,76	0,2	0,82	-0,24	0,45	0,49	0,41	0,44	0,56	0,6	0,75	0,78	0,78	0,81	0,86		
Yb	0,11	0,3	0,04	0,1	-0,28	0,53	0,83	0,85	0,31	0,76	-0,2	0,38	0,41	0,34	0,35	0,44	0,47	0,64	0,71	0,73	0,82	0,88	0,89	
Lu	-0,05	0,43	0,15	0,17	-0,25	0,5	0,87	0,85	0,45	0,67	-0,31	0,4	0,46	0,38	0,43	0,48	0,44	0,59	0,63	0,61	0,75	0,78	0,8	0,87

Fonte: Próprio autor, (2018).

Figura 13 – Matriz de correlação com coeficiente de *Spearman* para dados de rocha transformados por *centered log transformation* (clr).



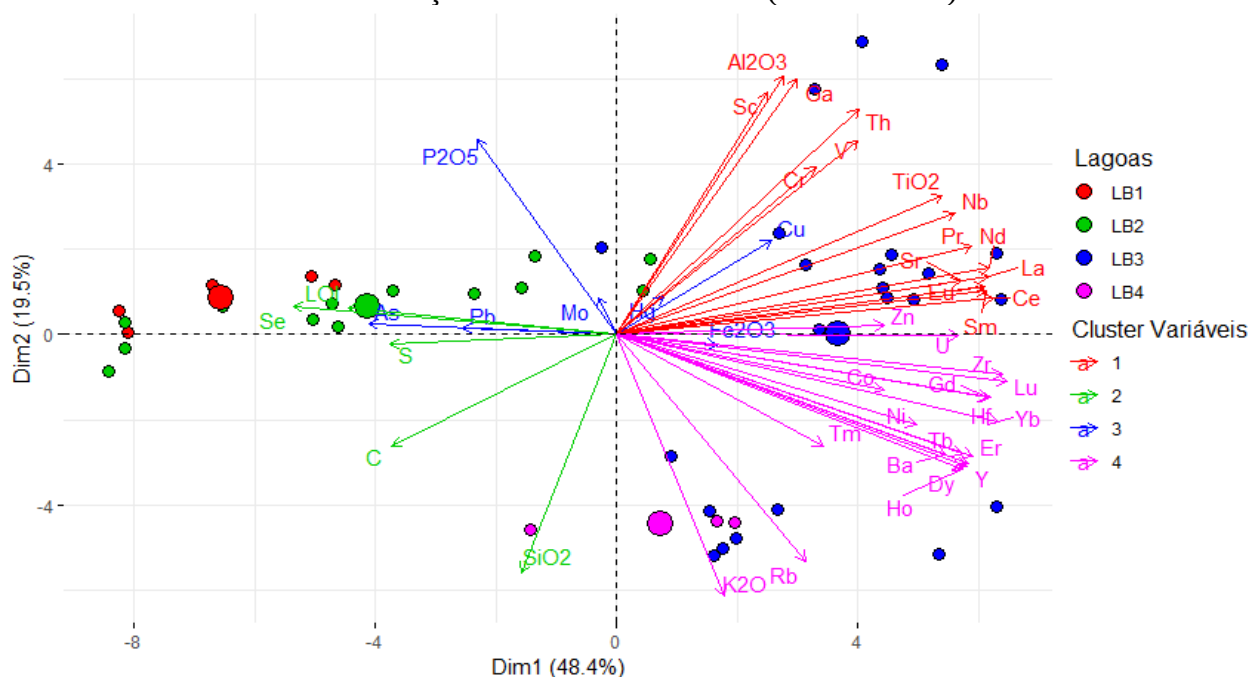
Fonte: Próprio autor, (2018).

5.4 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

A aplicação do PCA foi realizada tanto para os dados brutos, quanto para os dados transformados com log10 e transformados com clr. Foram utilizados os elementos maiores, traço e ETR's com o intuito de determinar o efeito do fechamento dos dados e se há uma assinatura geoquímica comum entre as amostras. O PCA foi realizado separadamente para sedimentos dados brutos (Fig. 14) e dados log e clr (Fig. 15a, 15b) e para rocha dados clr (Fig. 16), todos utilizando as variáveis e as amostras. Posteriormente o PCA foi aplicado a um grupo de dados maior (Fig. 17), que incluiu as amostras desta pesquisa, o material da bacia e o de referência (amostras de solo e rocha enriquecidos em Fe e de FFB), possibilitando a visualização da influência da litologia da bacia na composição dos sedimentos. O PCA para as variáveis que leva em consideração os *loadings* (na função PCA do pacote *factorminer* é chamado de cor) de cada elemento a cada PC,

mostrou pouca diferença entre os dados com log10 e clr, tanto para os sedimentos quanto para a rocha, porém os resultados com clr mostraram um pouco mais de coerência. Para os sedimentos o PCA dos dados com log10 mostrou tendência de muitos elementos se associarem ao grupo dos ETR's (Fig. 15a), enquanto que no PCA para clr (Fig. 15b) foi possível observar separações mais claras entre os elementos, explicadas também pelos coeficientes de correlação, que na maioria das vezes coincidem com as associações e grupos formados. Isso reafirma que o efeito dos dados fechados é facilmente visualizado nos dados com log10.

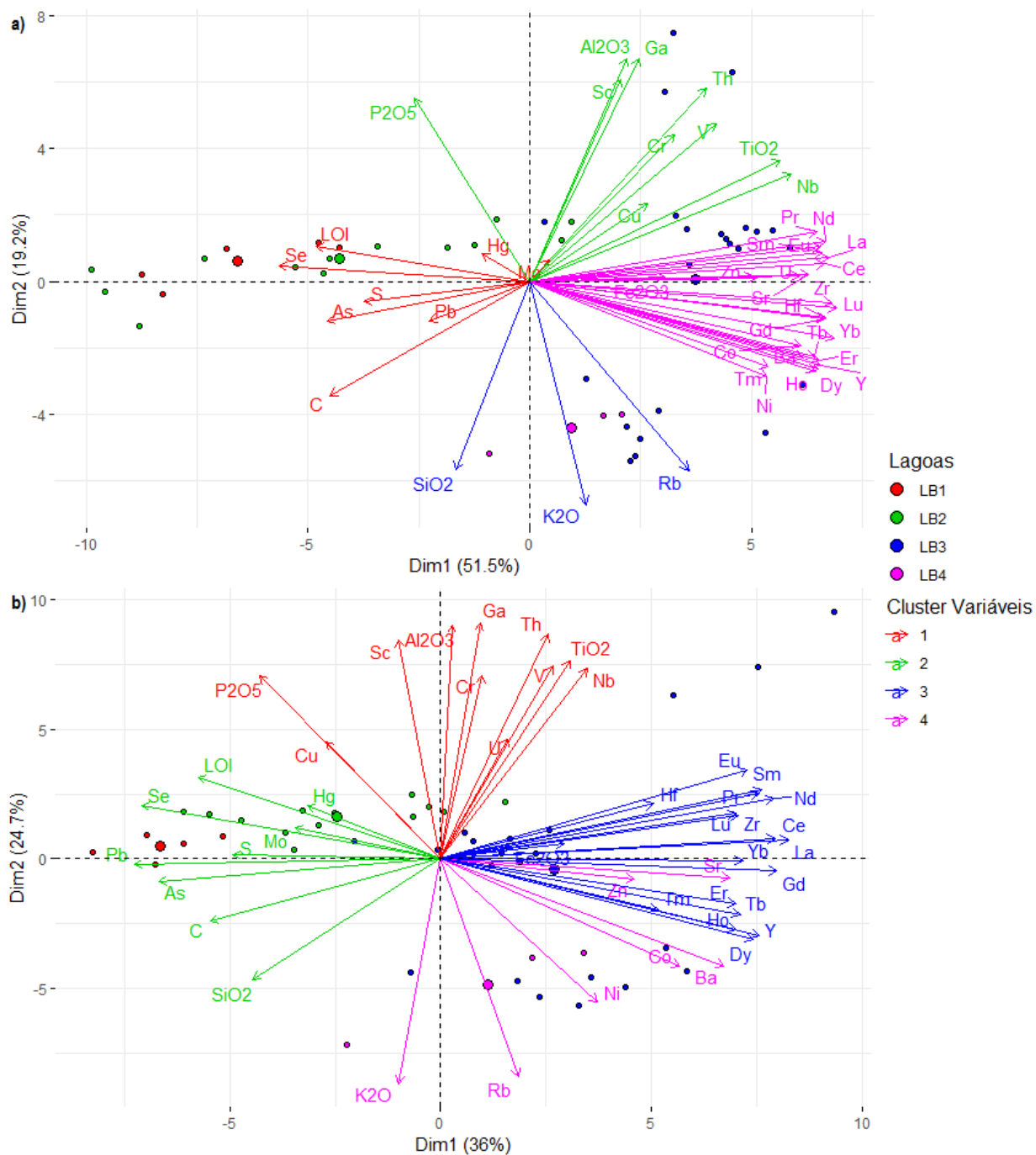
Figura 14 – Gráfico biplot de componentes principais com PC1 e PC2 para as amostras de sedimento e variáveis com indicação dos clusters formados (Dados brutos).



Fonte: Próprio autor, (2018).

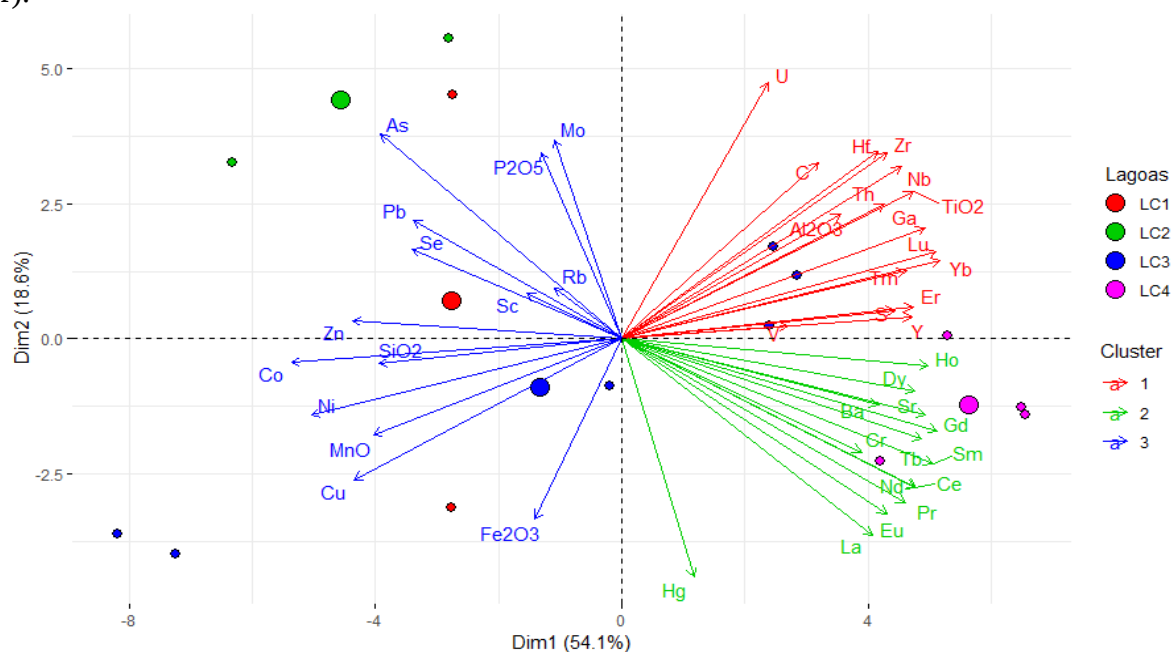
A metodologia do PCA associada ao cluster permitiu distinguir tanto nos dados com log10 quanto nos de clr, para os sedimentos 4 grupos de associações elementares e para as amostras de rocha 3 grupos foram revelados, onde para cada tipo de dado, são visualizadas algumas diferenças de elementos e cores. O PCA para os dados sedimentares e de rocha transformados por clr, mostrou que as variações dos elementos é bem explicada pelos dois primeiros PCs, com valores de autovalor (eigen values) maiores que 1. Para os sedimentos (clr) os dois primeiros PCs juntos explicam (60,7%) da variação total dos sedimentos (Fig. 15b) e para a rocha os dois primeiros PCs somam (69,2%) do total de variação para as amostras de rocha (Fig 16.).

Figura 15 – Gráfico biplot de componentes principais com PC1 e PC2 para as variáveis e as amostras de sedimento, com indicação dos clusters formados. a) Dados transformados com log10. b) Dados transformados com *centered log transformation* (clr).



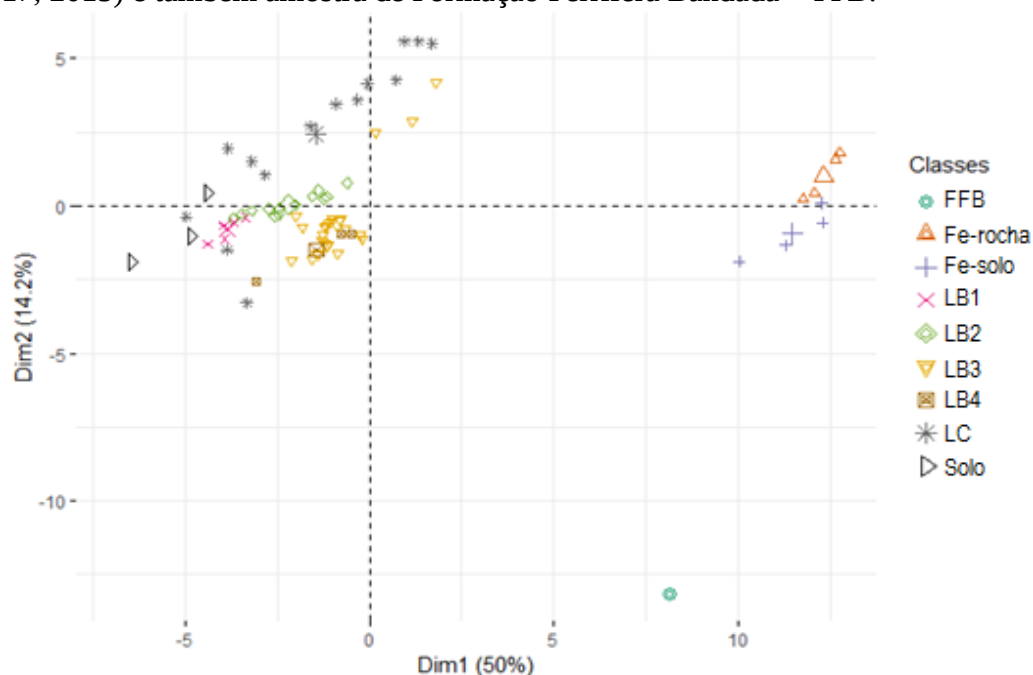
Fonte: Próprio autor, (2018).

Figura 16 – Gráfico biplot de componentes principais com PC1 e PC2 para as variáveis de rocha com ilustração dos clusters formados para dados transformados com *centered log transformation* (clr).



Fonte: Próprio autor, (2018).

Figura 17 – A) Gráfico de PCA para todo o conjunto de dados (sedimento, rocha e solo), incluindo as amostras de referência (rocha e solo) enriquecidos em Fe das lagoas Três Irmãs e Lagoa Violão (Sahoo 2017, 2015) e também amostra de Formação Ferrífera Bandada – FFB.



Fonte: Próprio autor, (2018).

Para os sedimentos o PC1 (explicou 36% do total da variancia) e mostrou altos loadings positivos para (Zr-Hf-Y-ETRs- e menor contribuição do Fe) que correspondem ao grupo 3/Azul de clusters, e altos loadings negativos para (Pb-Se-As-P.F-SiO₂-C-S-Mo-Hg), correspondendo ao grupo 2/verde. Já o PC2 (explicou 24,7% do total da variancia) com altos loadings positivos para (Cu-P₂O₅-Sc-Al₂O₅-Ga-Cr-Th-V-TiO₂-U-Nb) que correspondem ao grupo 1/vermelho e por fim altos loadings negativos para (K₂O-Rb-Ba-Ni-Co e Zn-Sr) que correspondem ao grupo 4/magenta, os elementos Zn e Sr tiveram loadings mais expressivos no PC1, no entanto em função do método de cluster foram agrupados ao grupo 4, porém fortemente influenciados pelos ETRs (Fig 15b).

Para as amostras de rocha com transformação clr, as três associações encontradas apresentam algumas semelhanças (Fig. 16) com às de sedimento, diferenciando apenas em alguns elementos. O PC1 das rochas (explicou 54,1% do total da variação) e altos loadings positivos para a maioria dos elementos, que com o cluster foram subdivididos em dois grupos sendo grupo 1/Vermelho (Zr-Hf-Ti-Lu-Tm-Yb-Er-U-C-Th-Nb-Al₂O₃-Ga-TiO₂-S-Y-V) e o grupo 2/Verde (ETRL – Ba-Cr-Gd-Tb-Dy-Ho) e, menor contribuição de Hg). O PC2 que (explicou 18,6% da variação total) e apresentou loadings positivos para (Mo-P₂O₅-As-Rb-Pb-Se-Sc) e loadings baixos ou negativos para (Fe₂O₃-Cu-MnO-Ni-Co-SiO₂-Zn), que juntos correspondem ao grupo 3/azul do conjunto de dados de rochas.

Os grupos 1 e 2 foram separados pelo cluster mas no PCA estão próximos estatisticamente, indicando a mesma tendência. Assim como nos sedimentos as associações identificadas nas amostras de rocha foram explicadas por dois PCs que juntos somam 72,7% e também apresentaram (*eigen values*) maior que 1. A técnica de análise multivariada de PCA possibilitou identificar as afinidades significativas entre os sedimento das lagoas, material da bacia e material de referência. Esse resultado pode ser visualizado em biplot (Fig. 17) tendo os dois primeiros PCs como principais explicadores somando (64,2% do total de variancia).

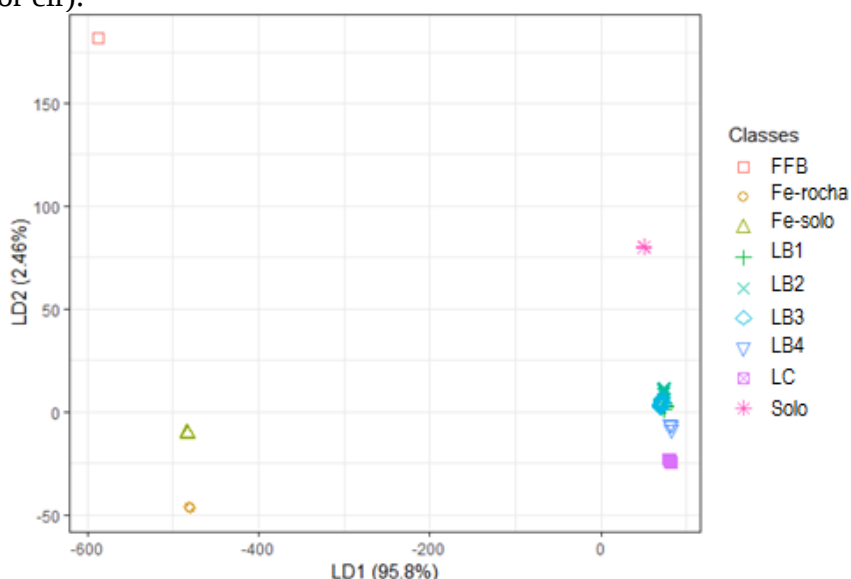
O PC1 explicou 50% da variancia com loadings altos para as amostras de crosta laterítica (LC) e solos enriquecidos em Fe das lagoas Três Irmãs (SAHOO et al., 2017) e Lagoa Violão (SAHOO et al., 2015) respectivamente, para FFB e também explicou com loadings negativos algumas amostras de sedimento de LB1, LB2, LB3 e LB4, as amostras de solo e algumas de LC enquanto que o PC2 (14,2% do total da variancia) explicou o comportamento da maioria das amostras de crosta laterítica enriquecida em Al (LC) e de algumas amostras de LB3 e LB2. Em geral observa-se

claramente no diagrama a separação das amostras dessa pesquisa de FFB e de amostras enriquecidas em Fe, configurando o comportamento de crostas lateríticas enriquecidas em Al.

5.5 ANÁLISE LINEAR DISCRIMINANTE (LDA)

A utilização da técnica de LDA foi necessária para esclarecer as contribuições de diferentes fontes, baseando-se nas características geoquímicas distintas entre as amostras. Nesta análise todos os elementos foram utilizados tanto para os dados transformados por log10 quanto os transformados por clr. Assim como nas outras análises os dados com clr descreveram de forma mais clara a separação dos grupos. O LDA para clr forneceu como resposta 10 funções discriminantes onde as duas primeiras (LDA1 e LDA2) foram identificados como potencias discriminadores que explicavam 95,8% e 2,46% (Fig. 18) respectivamente da discriminação dos grupos. O biplot dessas duas funções mostrou claramente a separação do grupos das amostras (amostras dessa pesquisa (enriquecidas em Al), amostras enriquecidas em Fe das lagoas Três Irmãs e lagoa Violão (SAHOO et al. 2017, 2015) e FFB. Esta análise, por tanto, mostra que os sedimentos das lagoas são plotados próximos da crosta e solo lateriticos e distantes dos solos e rochas ricas em Fe, ou seja, são claramente diferenciados de lateritas ricas em Fe incluindo FFB.

Figura 18 – a) Gráfico de LDA1 e LDA2 e b) Gráfico de PCA. Ambos para todas as amostras: sedimento, material da bacia e amostras de referência (FFB, Fe-rocha e Fe-solo). (Dados transformados por clr).



Fonte: Próprio autor, (2018).

6 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos iniciam-se com o controle de qualidade dos dados que validou e assegurou a confiabilidade das técnicas de análise empregadas, com aplicação da análise de precisão e acurácia, possibilitando a execução das análises estatísticas, que por sua vez forneceu um panorama geoquímico geral regional para as lagoas da Serra Bocaina. As duas metodologias de transformação dos dados (log10 e clr) utilizadas, revelou em geral resultados mais claros e coerentes para os dados transformados por clr, respeitando as características originais dos dados geoquímicos, pois com os dados transformados por log10, características reais de associações elementares que são indicativas de processos geoquímicos específicos ou de corpos geológicos, não puderam ser identificadas, no entanto esse problema foi reduzido quando a transformação por clr foi utilizada (AITCHISON 1986; FILZMOSER et al., 2009).

6.1 CLASSIFICAÇÃO GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS E ROCHAS DA BACIA

Seguindo a ordem proposta em Sahoo et al. (2017), a classificação geoquímica dos sedimentos foi feita utilizando o gráfico de Herron (1988) da razão $\log_{10} (\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ versus $\log_{10} (\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$, onde a razão de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mostra a maturidade dos sedimentos, refletindo a dominância de minerais de quartzos ou argila e feldspatos, enquanto que a razão de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$, indica a estabilidade dos minerais ferro-magnesianos. Este diagrama indicou que a maioria das amostras de sedimentos se enquadraram no campo (Fe-shale) como observado na (Fig. 10), que são ótimos representantes de rochas sedimentares (BOGGS; SAM, 2006) e correlacionadas com a litologia ferruginosa (SAHOO et al., 2016a). O diagrama mostra ainda a característica das amostras de sedimento de representarem o produto das rochas fontes (crostas lateríticas ferruginosas) e não diretamente às rochas primárias, situação sinalizada pelas amostras de LB4 que distoá um pouco das demais por refletir melhor as características da fonte, possivelmente associado a idade deste perfil. A mineralogia foi avaliada pela razão entre $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, que nesta pesquisa, foi ($<0,03$), surgindo então domínio de minerais argilosos (COX et al., 1995).

As classificações utilizadas para rochas foram com o diagrama ternário $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Fig. 10) de (SCHELLMANN, 1981, 1986), gráfico triangular A-CN-K de (NESBITT e YOUNG, 1984; FEDO et al., 1995) e classificação de lateritas de Karunakaran e Sinha Roy (1981) e índices de intemperismo Kr e Ki, conforme classificação de Martin e Doyne (1927) e Medina (1970). O

diagrama ternário serviu para discriminar a natureza das lateritas e dos sedimentos, enquadrando-as como lateritas ferruginosas e os sedimentos como produtos de lateritas, quantificando ainda os níveis de lateritização, indicando que as amostras de rocha desta pesquisa (LC), sofreram forte lateritização, enquanto que os sedimentos variaram entre forte e fraca Lateritização (Fig. 9a).

O gráfico triangular (Fig. 9 a), por sua vez, indica que tanto as amostras de sedimento quanto as de rocha estão relacionadas a minerais argilosos e que sofreram altos níveis de intemperismo. E pela metodologia de Karunakaran e Sinha Roy (1981) e Martin e Doyne (1927) e Medina (1970), as amostras de rocha foram confirmadas como lateritas ferruginosas verdadeiras. Todas essas classificações indicaram que as características dos sedimentos estão diretamente relacionadas às da litologia dominantes na área de captação das lagoas, bem como indicaram sinais das rochas de origem esclarecendo a proveniência desse material, melhor explorado a seguir.

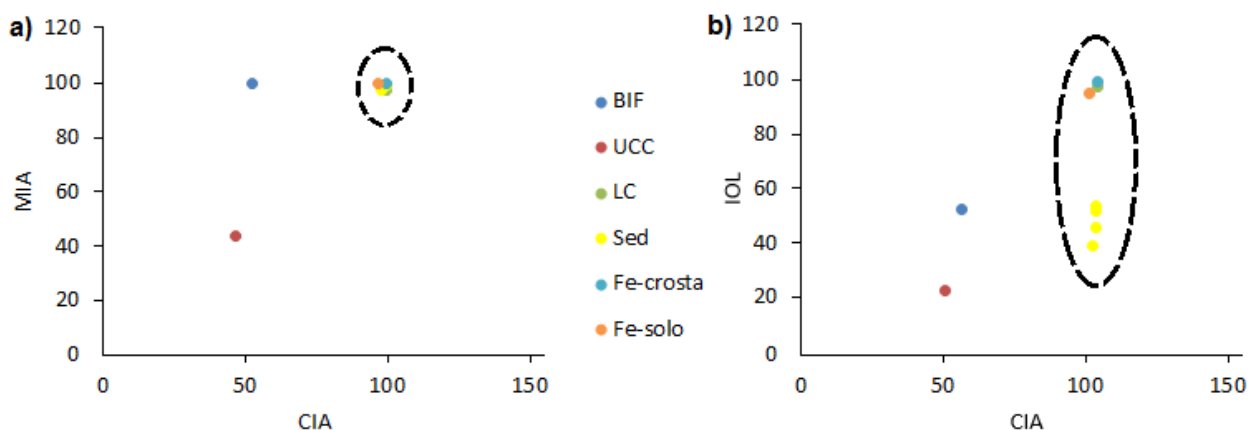
6.2 AVALIAÇÃO DO INTEMPERISMO E DE PROCESSOS DE LATERITIZAÇÃO

Os valores do índice CIA nas amostras de sedimento e rocha, foram altíssimos e com pouca variação entre as amostras. Este método é tido como ineficiente na quantificação da mudança dos elementos em estágio de intemperismo avançado (SAHOO, et al., 2017), e por isso, a necessidade da aplicação de outros índices como o MIA e o IOL. O MIA que utiliza a mais que o CIA, os elementos máficos Mg e Fe (BABECHUK et al., 2014), avalia a progressão do intemperismo por meio da análise da perda de elementos móveis, quanto maior o índice, maior foi a perda desses elementos.

O índice de IOL inclui a análise da sílica, que é um elemento dominante no processo de lateritização, onde valores menores que 40 indicam rochas máficas não intemperizadas e valores altos indicam amostras intensamente intemperizadas (BABECHUK et al., 2014). A relação entre os índices (Fig. 19), mostrou que o IOL foi o de maior variação, caracterizando as amostras de crosta Bocaina como intensamente intemperizadas enquanto que os sedimentos variaram entre fraco a moderado intemperismo e também em zonas caulinizadas (Fig. 19), indicando que esses sedimentos foram quimicamente retrabalhados. Esse processo culminou na intemperização das rochas da bacia, causando a depleção de elementos alcalinos e alcalino-terrosos e também na mobilização da sílica e acúmulo de minerais resistentes. Valores altos desses índices, tanto para crostas lateríticas ferruginosas quanto para as da Serra Bocaina, indicam alto grau de alteração

química, sob condições tropicais úmidas (NESBITT et al., 1996). O diagrama ternário (Fig. 9) mostra o quanto as rochas fontes sofreram de laterização.

Figura 19 – A) Relação entre o índice de alteração química (CIA), índice de alteração máfica (MIA). B) E relação do CIA com o índice de lateritização (IOL), nos sedimentos e crosta da Serra Bocaina e amostras de referência (FFB, Fe-rocha e Fe-solo).



Fonte: Próprio autor, (2018).

Valores similares dos índices citados acima, para sedimentos, rocha e solo, indicam que o processo de intemperismo é dominante na formação dos sedimentos dessas lagoas. A laterização controla o enriquecimento e a distribuição de elementos principais e traços em lateritas (EL-LEIL et al., 2017). As razões elementares (Tabela 5), mostram que os sedimentos são similares ao material da bacia, provando que são produtos do intemperismo da própria bacia. E ainda a razão $Th/U > 4$, visto nesta pesquisa, indicam o intemperismo e também possíveis processos de reciclagem em função da maior mobilidade de U e não há evidências de transformações mineralógicas na transição de lateritas para solo e sedimentos, então entende-se que esses processos não controlam a mobilidade desses elementos e por isso a assinatura de ETRs se mantém, reforçando a analogia entre sedimento e crosta (SAHOO et al. 2016).

6.3 SIMILARIDADES GEOQUÍMICAS ENTRE OS SEDIMENTOS

Com base na distribuição dos elementos, é possível observar diferenças nas características geoquímicas entre as lagoas, assim como Silva et al. (2018) que encontrou variações significativas em tamanho, profundidade e litologia local em lagoas que foram submetidas as mesmas condições

climáticas, mesma localização e formadas sobre ambiente dominado por lateritas, ocorreu também nas lagoas da Serra Bocaina, podendo, por tanto, ter diferentes fontes de sedimentos como afirma (CARVALHO; SCHULTE, 2013), e ainda, de acordo com outros autores (TYLMANN, 2005; SOUZA-FILHO et al., 2016), essas diferenças geoquímicas podem ser resultantes dos processos físicos-químicos aos quais esses sedimentos foram submetidos.

Os resultados de todas as análises realizadas nesta pesquisa, revelaram similaridades entre os sedimentos das lagoas. A estatística descritiva mostrou em geral valores de mediana muito semelhantes entre as lagoas LB1 e LB2 e entre LB3 e LB4, surgiu também possível similaridade em porções de LB2 e LB3. Esse comportamento foi visualizado também na análise dos dados normalizados por CCS (Fig. 8), confirmados com a avaliação dos dados normalizados por condrito (Fig. 19) e pelas razões elementares (Tabela 6) que mostrou que as razões entre LB1 e LB2 são mais similares ao material da bacia do que as outras duas (LB3 e LB4), que se apresentaram como uma mistura de características entre si e com o material da bacia e material de referência, menos o FFB. Outra constatação foi observada no PCA, que revelou para as amostras de sedimento, levando em consideração os scores de cada PC, que as lagoas LB1 e LB2 apresentam maior grau de similaridade entre algumas amostras mais superficiais, do que as profundas, que se assemelham mais as de LB3, assim como as que equivalente profundidade de LB3 com LB4 (Fig. 14).

6.4 FATORES E PROCESSOS QUE CONTROLAM A DISTRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS NO SEDIMENTO

Os resultados apontam que a porção mais orgânica dos perfis sedimentares analisados é visualizada nas lagoas LB1 e LB2 que foram os perfis de faixa mais superficiais, por tanto comportamento coerente com o esperado em função da profundidade analisada, sendo esses lagos os mais rasos, dentre os quatro analisados, foram mais correlacionados com a fração orgânica também no PCA sugerindo que essas lagoas possam ser semelhantes as lagoas preenchidos da Serra Sul (Sahoo et al., 2017), onde foram encontrados valores significativos de TOC. A análise de PCA com cluster das amostras de sedimento baseando-se nos dados transformados por clr (Fig. 15b) mostrou associações claras, como o grupo 2 composto por (P-F-Hg-Se-Pb-Mo-TS-As-TOC-Si), que mostra que a matéria orgânica é a principal controladora da distribuição desses elementos nos sedimentos das lagoas (Kainz e Lucotte, 2006; Gao et al., 2000), confirmado pelas correlações positivas entre esses elementos, como por exemplo Se com TOC ($r=0,71$), indicando que de fato a

matéria orgânica controla a distribuição dos elementos nos sedimentos. Esse comportamento pode ser visualizado (Fig. 15) que une em uma só figura as variáveis e as amostras de sedimento, indicando que as amostras mais superficiais coincidem estatisticamente com a associação de variáveis representativas de porções orgânicas.

A origem dos elementos ligados a matéria orgânica podem estar relacionada com fontes autóctones, visto que, a vegetação de canga (fonte alóctone) não poderia fornecer detritos orgânicos suficientes para serem transportados por escoamento superficial até a porção central da lagoa (SAHOO et al., 2015, 2016). Essa característica possivelmente favorece maior contribuição da matéria orgânica de fontes autóctones, como espículas de esponja silicosas, algas e vegetação aquática, em função da maior disponibilidade de luz (TOLU et al., 2017).

Nas lagoas da Serra da Bocaina os principais elementos identificados nos sedimentos são $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3$ que correspondem a grande parte do total inorgânico, seguido do TiO_2 e P_2O_5 CaO , Na_2O e K_2O que são menos abundantes em relação a Al , com concentrações fortemente influenciadas pelos processos de lateritização, que resultam em plagioclásio e dissolução de K-feldspato (NESBITT; YOUNG, 1984; BABECHUK et al., 2014).). Essas lagoas apresentaram influência predominantemente detrítica. A variabilidade geoquímica dos detritos nos sedimentos das lagoas é possivelmente controlada pela diferença litogeoquímica das crostas ferruginosas da área de captação das lagoas, onde as características morfológicas das bacias influenciam significativamente nas taxas de sedimentação (CZARNECKA; DWORNICZAK, 2016), bem como insumos de matéria orgânica (TOLU et al., 2017).

O grupo 1, definido pela análise de PCA, que tem entre outros elementos o Al , V , Cr , Ga e Sc , são indicativos de rochas máficas nos sedimentos e dão sinais das rochas parentais que originaram as crostas lateríticas da Serra Bocaina, que são as rochas metavulcânicas (Cr , V) da Formação Parauapebas. Comportamento similar foi observado em Sahoo et al. (2018) nas lagoas Violão, Amendoim e Três Irmãs.

O grupo 3 nos sedimentos que apresentam – (Hf - Zr e ETR's) é uma associação que retrata um comportamento característico desses minerais pesados que é a hospedagem de ETR's com Y , que durante o processo de intemperismo se mantiveram estáveis, permanecendo com uma forte associação geoquímica como nas lateritas, comportamento claramente observado nos sedimentos das lagoas.

Nas amostras de rocha o principal agrupamento formado foi o grupo 1 (Hf, Zr, Ti, Y, associados a maioria dos ETRP) e o grupo 2 (ETRL), que são significativamente semelhantes ao grupo 3 dos sedimentos, como pode ser observado na Figura 15, confirmando a presença da assinatura da crosta.

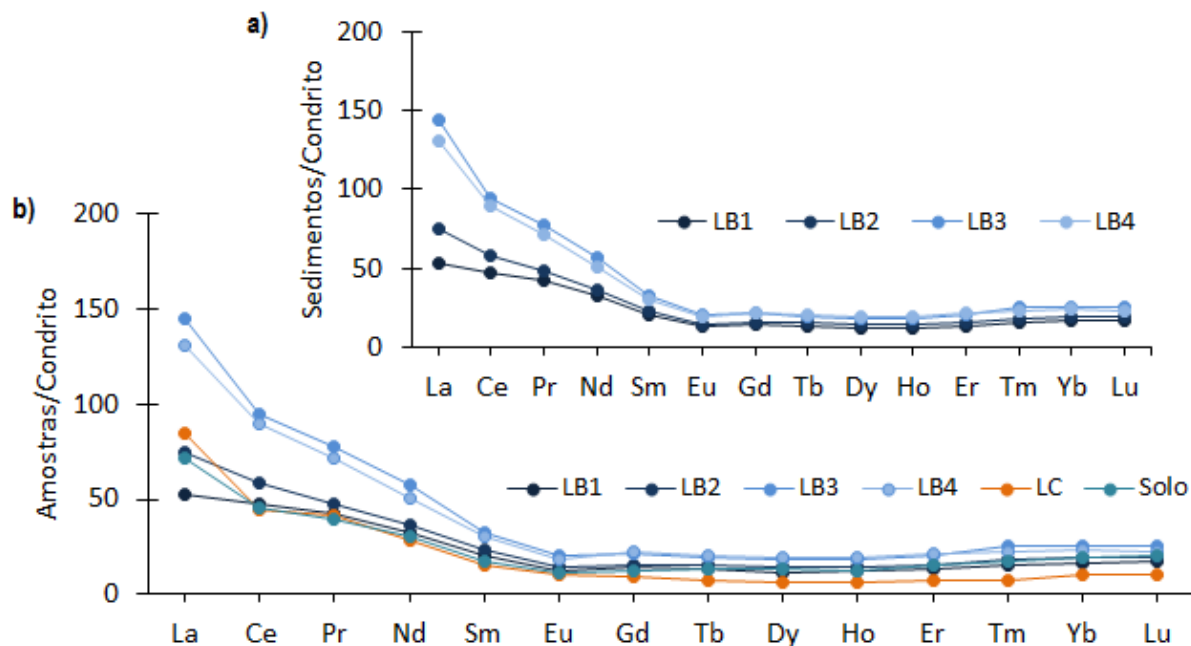
Trabalhos realizados por Costa e Aratijo (1996) relataram em seus estudos que a associação de Ti-Zr-Y e ETRs em crostas lateríticas e solos é devido à presença de zircão e anatásio, o que indica claramente que os processos geoquímicos são atribuídos à mineralogia das unidades geológicas da área de captação da bacia. O comportamento observado quanto às associações geoquímicas entre ETRL e ETRP em sedimentos e lateritas indicam diferente mobilidade durante a formação de laterita (BRAUN et al., 1990; HILL et al., 2000; SANEMATSU et al., 2010). Alguns autores, como Davy e EL-Ansary (1986), Cao et al. (2001), Marker et al. (1991), atribuem esse comportamento ao baixo pH, Eh e alta atividade de CO₂ que facilitam a mobilização de ETRL de minerais primários transportados em solução. Os ETRs mobilizados, posteriormente, podem ser retrabalhados ou reprecipitados mais tarde em minerais secundários, bem como em revestimentos superficiais amorfos, dependendo das condições ambientais, principalmente em condições de alto pH e oxidação (CAO et al., 2001; KARADAĞ et al., 2009; NESBITT, 1979). Alguns minerais Fe/oxihidróxidos (goethita, hematita e óxidos amorfos) são considerados como bons sequestradores, porém foi identificado uma fraca correlação entre ETRL e o Fe₂O₃, podendo ser consequência do pH baixo ou a presença de ETRs nas lateritas (SANEMATSU et al., 2011).

6.5 RELAÇÃO GEOQUÍMICA ENTRE OS SEDIMENTOS E ROCHAS DA BACIA – AVALIAÇÃO DA PROVENIÊNCIA

As assinaturas identificadas são em grande parte similares às lateritas, pois o grupo 3 dos sedimentos (Zr-Hf-Y-ETR) é em grande parte similar ao grupo 1 e 2 das rochas, que juntos apresentam os mesmo elementos dos sedimentos. A associação elementar que permaneceu nos sedimentos reflete a geologia da bacia de contribuição das lagoas, podendo estar relacionada às rochas metavulcânicas que segundo Martins et al. (2017) são enriquecidas em grande partes desses elementos da assinatura, então considerando que a geologia da bacia, as condições de intemperismo e processos de lateritização influenciam a assinatura (COSTA et al., 1999; AL-KHIRBASH et al., 2014; DAVY e EL-ANSARY, 1986; MARKER et al., 1991; SAHOO et al., 2017). A comparação entre as razões elementares (Al/K, Ti/K, Al/Ti, Ti/Th, Th/Sc, Al/V, Al/Cr, Al/Ga, Ti/Gd, Al/La,

V/Cr, La/Th, Ce/Ce*, Eu/Eu*), com os materiais de referência, indicaram proporções bem semelhantes de variação para as lagoas LB1 com LB2 e o material da bacia, enquanto que LB3 e LB4 mostrou uma mistura de características do material da bacia com o material de referência, no entanto, essa metodologia por si só, não é o suficiente para explicar a proveniência desses elementos. A normalização dos ETRs em relação ao condrito (Fig. 19) é uma das mais importante ferramenta de esclarecimento destes fatores que revelou que os sedimentos apresentam o mesmo comportamento que o material da bacia.

Figura 20 – A) Gráfico com os valores sedimentares normalizados por Condrito, somente para os ETRs (mg/kg). B) Amostras de sedimento (n=44), crosta laterítica (LC) (n=14) e solo (n=2), todas normalizadas por Condrito.



Fonte: Próprio autor, (2018).

Pelo PCA a demonstração da relação do material da bacia de contribuição com os sedimentos das lagoas se dá com a similaridade do grupo 2 das rochas e o grupo 3 dos sedimentos, onde ambos contém elementos que são tipicamente classificados como imóveis durante o processo de intemperismo (AL-KHIRBASH et al., 2014; HILL et al., 2000), essa associação é provavelmente afetada por fatores litogênicos, principalmente a contribuição das rochas fonte, a exemplo as metavulcânicas (Cr, V) e componentes siliciclásticos (Al, Sc, Ga). Esta assinatura geoquímica pode demonstrar uma relação direta com as ocorrências minerais nas rochas do domínio geológico

estudado. Dentre os elementos imóveis destaca-se o (Zr e Hf) que quando associados com alguns outros fornecem informações extremamente relevantes de origem e de processos atuantes na sedimentação, como por exemplo, a alta correlação do Ti com Zr e Hf visualizada nas associações de rocha, pode ser atribuída à presença de zircão (principal mineral contendo Zr nas lateritas), com rutilo, anatásio e titanita com zircão no perfil laterítico (KARADAĞ et al., 2009) e ainda de acordo com Barros et al., 2005, que diz que razões de Zr / Hf próximas a 40 são indicativas de que variações internas do zircão possam ter ocorrido, esse comportamento foi visualizado tanto nos sedimentos quanto no material da bacia de contribuição.

Os resultados vêm demonstrando que as diferenças litológicas na bacia influenciam as composições geoquímicas e controlam o padrão de enriquecimento e distribuição dos elementos no sedimento das lagoas (GRUNKY et al., 2014). Ao observarmos a composição da bacia de Carajás que é composta principalmente por rochas metavulcânicas, máficas e intermediárias da Formação Parauapebas associada a Formações ferríferas bandadas (FFB) (Fig. 2) (GIBBS et al., 1986; OLSZEWSKI et al., 1989), pode-se identificar as possíveis rochas geradoras de crostas e solos lateríticos estudados, sabendo-se que maiores concentrações de Al_2O_3 , TiO_2 e Zr em lateritas aluminosas podem ser derivadas de rochas metavulcânicas. Conforme relatado por Martins et al. (2017), as rochas metavulcânicas têm como característica a alta abundância de Al, Ti, Zr, P e ETRs, por outro lado esses elementos são altamente depleciados no FFB. Por tanto a interpretação de todos os proxies utilizados nessa pesquisa é de fundamental importância para o entendimento dos processos atuantes e origem geoquímica dos sedimentos, sendo indispensável interpretar as relações genéticas entre todas as amostras coletadas (rocha, solo e sedimento) para esclarecimento da contribuição de cada um nos sedimentos.

A análise de PCA indica que os sedimentos não estão diretamente relacionados às rochas fontes primárias como (FFB) e sim fortemente correlacionadas com as crostas e solos que são produtos do intemperismo sofrido das rochas de origem. A análise de PCA das amostras com o material de referência (Fig. 17) e de LDA (Fig. 18) fortaleceram essa interpretação, mostrando total distinção das amostras de sedimento, (LC) e solo das amostras de FFB e crosta e solo enriquecidos em Fe. A análise de elementos traços imóveis (Ti, Th, Zr, Hf, V, Cr e ETRs), mostrou que esses elementos nos sedimentos são capazes de esclarecer sua origem e proveniência, configurando-se como a principal ligação das rochas com os sedimentos, refletindo a influência da litologia dominante na bacia.

7 CONCLUSÃO

Os dados geoquímicos geralmente são dados volumosos e apresentam características muito particulares que exigem total atenção desde seu preparo no controle de qualidade até a interpretação de seus resultados. A transformação clr que eliminou possíveis interferências do dado fechado e o tratamento estatístico empregado, foram essenciais para a determinação da importância de cada fator que influencia a geoquímica dos sedimentos. Conhecendo o comportamento das amostras e a relação com os elementos analisados, foi possível indicar a assinatura de cada uma das quatro lagoas da Serra Bocaina, bem como comprovar claramente que há influência das diferentes litologias da bacia na composição dos sedimentos.

Os principais fatores geológicos que controlam a distribuição e o enriquecimento dos elementos no sedimento são: litologia da bacia, morfologia e profundidade das lagoas, níveis de intemperismo e proporções entre elementos orgânicos e inorgânicos. Esse banco de dados apresenta grande variação entre crosta laterítica ferruginosa e crosta laterítica ferruginosa aluminosa, pois concentrações de Al, Ti, P e alguns elementos traços como Zr, Cr somado aos ETR's são significativamente mais elevadas em crostas lateríticas enriquecidas em Al (semelhante ao observado nessa pesquisa) e solo do que em composições ferruginosas.

O PCA nos sedimentos mostrou uma associação geoquímicas de teor mais orgânico, entre alguns elementos com P.F e TOC, que foram compatíveis com as lagoas LB1 e LB2, os perfis mais rasos da pesquisa. Mostrou ainda a assinatura detrítica comum entre os sedimentos da Serra Bocaina e sua crosta laterítica: Zr-Hf-Y-ETRs (Grupo 3, sedimento) similar ao grupo 1 e 3 das rochas, por tanto, mantendo a mesma assinatura visualizada no PCA para as rochas, sendo melhor evidenciado nas lagoas LB3 e LB4, com profundidades maiores, e por isso retrataram características um pouco distintas das demais lagoas, sendo o LB4 mais similar ao material fonte do que ao material alterado de crosta laterítica.

Essas associações são controladas pelo processo de lateritização e pela litologia da bacia de contribuição, sendo estes elementos indicadores diretos ou indiretos da geoquímica dos sedimentos das bacias inativas. Os resultados da análise do PCA juntamente com LDA, mostram claramente que os sedimentos das lagoas não estão diretamente relacionados às rochas-fonte, mas são principalmente derivados do seu produto intemperizado como a crostas de laterita ferruginosa e solos da bacia enriquecidos em Al.

Por fim, essa pesquisa confirmou com a assinatura geoquímica de cada lagoa a influência da litologia da bacia, confirmando que os sedimentos podem ser utilizados como uma importantíssima ferramenta de esclarecimento de processos atuantes na bacia, além de trazer informações de milhares de anos antes de contribuições antrópicas, podendo reproduzir condições ambientalmente originais. As informações trazidas nessa pesquisa de mineralização da laterita, relações *source-sink* e proveniência elementar para a Serra Bocaina, podem fornecer subsídios para o entendimento de processos geoquímicos que ocorreram e ainda ocorrem em escala regional na Serra de Carajás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEDINI, A.; CALAGARI, A. A.; MIKAEILIB, K. Geochemical Characteristics Of Laterites: The Ailibaltalu Deposit, Iran. **Bulletin of the Mineral Research and Exploration**, v. 148, p. 69–84, 2014.
- AGUILERA, X. S. et al. Tropical high Andes lakes: a limnological survey and an assessment of exotic rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). **Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters**, v. 36, n. 4, p. 258–268, 2006.
- AITCHISON, J., 1986. The statistical analysis of compositional data: Chapman and Hall, 19 London, 416 p.
- AL-KHIRBASH, S., SEMHI, K., RICHARD, L., NASIR, S., 2014. Rare earth element mobility during laterization of mafic rocks of the Oman ophiolite. **Arab J. Geosci.** 7, 5443–5454.
- ALTHOFF, F. J., P. BARBEY & A. M. BOULLIER, 2000. 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral Province, Brazil). **Precambrian Research** 104(3-4): 187-206.
- ANAND, R.R., ASPANDIAR, M.F., NOBLE, R.R.P., 2016. A review of metal transfer mechanisms through transported cover with emphasis on the vadose zone within the Australian regolith. **Ore Geol. Rev.** 73, 394–416.
- AUDRY, S., GROBOIS, C., BRIL, H., SCHAFER, J., KIERCZAK, J., BLANC, G., 2010. Post-depositional redistribution of trace metals in reservoir sediments of a mining/smelting impacted watershed (the Lot River, SW France). **Appl. Geochem.** 25, 778–794.
- BABECHUK, M.G., WIDDOWSON, M., KAMBER, B.S., 2014. Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chem. Geol.* 363, 56-75.
- BABEESH, C., LONE, A., ACHYUTHAN, H., 2017. Geochemistry of Manasbal lake sediments, Kashmir: weathering, provenance and tectonic setting. *J. Geol. Soc. India* 89, 563–572.
- BERNTSSON, A., JANSSON, K. N., KYLANDER, M. E., DE VLEESCHOUWER, F., AND BERTRAND, S., 2015, Late Holocene high precipitation events recorded in lake sediments and catchment geomorphology, Lake Vuoksajvatje, NW Sweden: *Boreas*, v. 44, no. 4, p. 676-692.
- BLAIS, J. M. .; KALFF, J. The influence of lake morphometry on sediment focusing. **Limnology and Oceanography**, v. 40, n. 3, p. 582–588, 1995.
- BOGGS, J., SAM, 2006. Principles of Sedimentology and Stratigraphy, 4th ed. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ, 217 – 223.

BOUSSAFIR, M. et al. Petrographical and geochemical study of modern lacustrine sedimentary organic matter (Lagoa do Caçó, Maranhão, Brazil): relationship between early diagenesis, organic sedimentation and lacustrine fillings. **Org. Geochem.**, v. 47, p. 88–98, 2012.

BRAHNEY, J., BALLANTYNE, A. P., KOCIOLEK, P., SPAULDING, S., OTU, M., PORWOLL, T., AND NEFF, J. C., 2014, Dust mediated transfer of phosphorus to alpine lake ecosystems of the Wind River Range, Wyoming, USA: *Biogeochemistry*, v. 120, no. 1-3, p. 259-278.

BRIDGE, J. .; DEMICCO, R. Earth surface processes, landforms and sediment deposits. In: **J. BRIDGE & R. DEMICCO (Ed.) Cambridge University, New York.** [s.l: s.n.]. p. 462–472, 2008.

BUSH, M. B. et al. 2004. Amazonian paleoecological histories: One hill, three watersheds. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 214, n. 4, p. 359–393, 2004.

CANHAM, C. D., PACE, M. L., WEATHERS, K. C., MCNEIL, E. W., BEDFORD, B. L., MURPHY, L., AND QUINN, S., 2012, Nitrogen deposition and lake nitrogen concentrations: a regional analysis of terrestrial controls and aquatic linkages: *Ecosphere*, v. 3, no. 7.

CAO, X., CHEN, Y., WANG, X., DENG, X., 2001. Effects of redox potential and pH value on 9 the release of rare earth elements from soil. **Chemosphere** 44, 655–661.

CARITAT, P., GRUNSKY, E.C., 2013. Defining element associations and inferring geological processes from total element concentrations in Australian catchment outlet sediments: Multivariate analysis of continental-scale geochemical data. *Appl. Geochem.* 33, 104–126.

CARITAT, P., MAIN, P.T., GRUNSKY, E.C., MANN, A.W., 2017. Recognition of geochemical footprints of mineral systems in the regolith at regional to continental scales. *Aust. J. Earth Sci.* 64, 2017- Issue 8.

CARVALHO, F., SCHULTE, L., 2013. Morphological control on sedimentation rates and patterns of delta floodplains in the Swiss Alps. **Geomorphology** 198, 163–176.

CORDEIRO, R. C. et al. Biogeochemical indicators of environmental changes from 50 Ka to 10 Ka in a humid region of the Brazilian Amazon. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 299, n. 3–4, p. 426–436, 2011.
core or log data. **J. Sediment. Pet.** 58, 820e829.

COSTA, M. L. et al. Geochemical exploration of the Maicuru alkaline-ultramafic-carbonatite complex, northern Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 40, n. 1–3, p. 193–204, 1991.

COSTA, M.L., ARATIJO, E.S., 1996. Application of multi-element geochemistry in Au phosphate-bearing lateritic crusts for identification of their parent rocks. *J. Geochem. Explor.* 57, 257–272.

COSTA, M.L., CARMO, M.S., BEHLING, H., 2005. Mineralogia e geoquímica de sedimentos lacustres com substrato laterítico na Amazônia brasileira”. In.: Revista Brasileira de Geociências 35, 165-176.

COX, R., LOWE, D.R., CULLERS, R.L., 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. **Geochim. Cosmochim. Acta** 59 (14), 2919-2940.

CZARNECKA, K., DWORNICZAK, J., 2016. Influence of lake basin morphology on recent sedimentation rates based on the example of Lake Raduńskie Górne, N Poland. **Limnol. Rev.** 16, 3, 121–128.

DALL’AGNOL, R., D. C. OLIVEIRA, C. N. LAMARÃO, 2013. Archean granitoid magmatism and geologic evolution of the Transition Subdomain of the Carajás Province, southeastern Amazonian craton Brasil. **Magmatismo granitoide arqueano e evolução geológica do Subdomínio de Transição da Província Carajás, sudeste do Cráton Amazônico, Brasil** v: 8, n:3, p: 251-256.

DALL’AGNOL, R., M. A. OLIVEIRA, J. A. C. ALMEIDA, F. J. ALTHOFF, A. A. S. LEITE, D. C. OLIVEIRA & C. E. M. BARROS, 2006. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian craton. **Abstracts of Symposium on magmatism, crustal evolution, and metallogenesis of the Amazonian craton** 1: 99-150.

DALL’AGNOL, R., Z. S. SOUZA, F. J. ALTHOFF, C. E. M. BARROS, A. A. S. LEITE & X. S. JORGE JOÃO, 1997. General aspects of the granitogenesis of the Carajás metallogenic province. **Extended Abstracts of the International Symposium on Granites and Associated Mineralizations** 1: 135-161.

DAS, K.R., AHMR, I., 2016. A brief review of tests for normality. **American Journal of Theoretical and Appl. Stat.** 5, 5-12.

DAULTREY, S., 1976. Principal component analysis. Geo Abstracts, University of East Anglia, Norwich, U.K., CATMOG 8, 50 pp.

DAUNIS-I-ESTADELLA, J., BARCELÓ-VIDAL, C., BUCCIANI, A. 2006. Exploratory compositional data analysis. In: Bucianti, A., Mateus-Figueras, G., Pawlowsky-Glahn, V. (eds). *Compositional Data Analysis*.

DAVY, R., EL-ANSARY, M., 1986. Geochemical patterns in the laterite profile at the Boddington gold deposits, Western Australia. *J. Geochem. Explor.* 26, 119-144.

DIETZE, E. et al. Basin morphology and seismic stratigraphy of Lake Donggi Cona, north-eastern Tibetan Plateau, China. **Quaternary International**, v. 218, n. 1–2, p. 131–142, 2010.

EGOZCUE, J., PAWLOWSKY-GLAHN, V., MATEU-FIGUERAS, G. AND BARCÉLO-VIDAL, C., 2003. Isometric log ratio transformations for compositional data analysis. **Math. Geol.** 35, 41 279-300.

EL-LEIL, I.A., EL-DESOKY, H.M., SHAFEA, E.A., 2017. Geochemistry, diagenesis and mineral associations of laterite deposits along the contact zone of Precambrian basement rocks and nubia sandstone between wadi dungash and wadi shait, south eastern desert. *Egypt. J. Am. Sci.* 13 (8), 32-54.

ENGSTROM, D. R., AND SWAIN, E. B., 1986, The Chemistry Of Lake-Sediments In Time And Space: **Hydrobiologia**, v. 143, p. 37-44.

EPPINGER R.G., GILES S.A., LEE G.K., SMITH S.M. 2015. *Second projet de renforcement institutionnel du secteur minier de la republique Islamique de phase II: Geochemistry database creation, data quality assessment, and geochemical maps - Final report on compilation and validation of geochemical data. United States Geological Survey, Virginia.* p. 60.

FRASE, S., NÉDÉLEC A., POITRASSON F., STRAUSS H., THOMAZO C., NOGUEIRA A., 2011. Iron and sulphur isotopes from the Carajás mining province (Pará, Brazil): Implications for the oxidation of the ocean and the atmosphere across the Archaean–Proterozoic transition. **Chemical Geology**, 289 (2011) 124–139.

FILZMOSER, P., HRON, K., REIMANN, C., 2009. Principal component analysis for1 compositional data with outliers. **Environmetrics** 20, 621–632.

FILZMOSER, P., HRON, K., TOLOSANA-DELGADO, R., 2016. Statistical analysis of geochemical compositions: Problems, perspectives and solutions. **Appl. Geochem.** 75, 169-170.

FITRIANTO, A., Chin, L.Y., 2016. Assessment normality for data with different sample sizes using SAS, MINITAB, and R. *ARN J. Eng. Appl. Sc.*, 11, No. 18, September, 2016.

FRIZZO, S. J; LICHT, O.A.B., 2007. Estatística uni e bivariada aplicadas à prospecção geoquímica. In: Licht, O.A.B., Mello, C.S.B & Silva, C.R. (Eds). *Prospecção Geoquímica de Depósitos Minerais Metálicos e não metálicos, óleo e gás. SBGq/CPRM. Rio de Janeiro, 778p.* Cap 20, p. 619-660.

GAO, S., TANJI, K.K., PETERS, D.W., HERBEL, M.J., 2000. Water selenium speciation and sediment fractionation in a California Flow-Through wetland system. **J Enviro. Qual.** 29, 1275-1283.

GERANIAN, H., MOKHTARI, A.R., COHEN, D.R., 2013. A comparison of fractal methods and 11 probability plots in identifying and mapping soil metal contamination near an active 12 mining area, **Iran. Sci. Tot. Env.** 463, 845-854.

GHASEMI, A., ZAHEDIASL, S., 2012. Normality tests for statistical analysis: a guide for non statistians. *Int. J. Endocrinol. Metab.* 10, 486-489.

- GIBBS, A. K.; WIRTH, K. R. . Geologic setting of the Serra dos Carajas iron deposits, Brazil. In: **Chauvel, J.J. (Ed.), Ancient Banded Iron Formations (Regional Presentations). Theophrastus, Athens.** [s.l: s.n.]. p. 83–102, 1990.
- GODDARD, J., KIRBY, A., 1976. An introduction to factor analysis. University of East Anglia, U.K., CATMOG series No. 7, 39 pp.
- GOLDER, 2011. Projeto Área Mínima de Canga. Similaridade das paisagens de savana metalófila. Golder Associates: Belo Horizonte.
- GRUNKY, E.C., CARITAT, P., MUELLER, U.A., 2017. Using surface regolith geochemistry to map the major crustal blocks of the Australian continent. *Gondwana Res.* 46, 227-239.
- GRUNSKY, E.C., 2010. The interpretation of geochemical survey data. *Geochem. Explor. Env.* A. 10, 27-74.
- GRUNSKY, E.C., MUELLER, U.A., CORRIGAN, D., 2014. A study of the lake sediment geochemistry of the Melville Peninsula using multivariate methods: Applications for predictive geological mapping. *J. Geochem. Explor.* 141, 15-41.
- GUIMARAES, J. T. . et al. Holocene history of a lake filling and vegetation dynamics of the Serra Sul dos Carajas, southeast Amazonia. **An. Acad. Bras. Ciência**, v. 24, 2016a.
- GUIMARÃES, J.T.F., SAHOO, P.K., SOUZA-FILHO, P.W.M., MAURITY, C.W., SILVA, J.R.O., COSTA, F.R., DALL’AGNOL, R., 2016b. Late Quaternary environmental and climate changes registered in lacustrine sediments of the Serra Sul de Carajás, southeast Amazonia. **Journal of Quaternary Science Sci.** DOI: 10.1002/jqs.2839.
- GUIMARAES, J. T. F. et al. Mineralogical and geochemical influences on sediment color of Amazon wetlands analyzed by visible spectrophotometry. **Acta Amaz.**, v. 43, p. 331–342, 2013.
- GUIMARÃES, J. T. F.; SAHOO, P. K.; REIS, L. S. Modern pollen rain raises doubts about the intensity and extension of the Last Glacial Cycle in Carajás: A reply to D’Apolito et al. **The Holocene**, n. 4, 2017.
- HALL, K. et al. Weathering in cold regions: some thoughts and perspective. **Progress in Physical Geography**, v. 26, p. 577–63, 2002.
- HARRASSOWITZ H., 1926: Laterit. Material und Versuch erdgeschichtlicher Auswertung. – Fortschritte der Geologie und Paläontologie, 4, 14. Berlin. In: Oliveira E.P. 2006. Caracterização bio-físico-químico-mineralógica e micromorfológica de um perfil de alteração de granitognaisses de Curitiba, PR. MS Dissertation. **Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica**, 197 p.

HERMANOWSKI, B. et al. Paleoenvironmental dynamics and underlying climatic changes in southeast Amazonia (Serra Sul dos Carajás, Brazil) during the late Pleistocene and Holocene. **Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology**, v.365-366, p.227-246, 2012.

HERRON, M.M., 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J. Sediment. Petrol* 58, 820-829.

HILL, I.G., WORDEN, R.H., MEIGHAN, I.G., 2000. Geochemical evolution of a palaeolaterite: 42 the interbasaltic Formation, Northern Ireland *Chem. Geol.* 166, 65-84.

HUNT, A., OLDFIELD, F., BLOEMENDAL, J., BOYLE, J.F., CHIVERRELL, R.C., LYONS, R., SHEN, Z., WILLIAMS, E.R., W. BALSAM. 2017. To what extent have laterites contributed to the geochemical, surface reflectance and magnetic properties of adjacent tropical soils? Evidence from Niger and Burkina Faso. *Earth Surf. Proc. Land.* 42, 2554-2569.

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade: **Projeto Bocaina: Diagnóstico da Biodiversidade da Serra da Bocaina, PA. 2013.**

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade: Estudo diagnóstico e análise de relevância. Serra da bocaina – ESPELEOLOGIA. 2014. **Atendimento de condicionante da Licença Prévia N. 436/2012 do Projeto Ferro Carajás S11D**, definida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis – IBAMA.

JELINOWSKA, A., CARVALLO, C., WESZTERGOM, V., TUCHOLKA, P., MENVIELLE, M., SZARKA, L., KOHLBECK, F., SCHOTT, J.J., 2000. Some magnetic properties of sediments from lake Ferto (Neusiedlersee) region, Austria-Hungary. **Acta Geod. Geoph. Hung.** 35, 255-264.

JIN, Z. et al. Geochemistry of Daihai Lake sediments, Inner Mongolia, north China: Implications for provenance, sedimentary sorting, and catchment weathering. **Geomorphology**, v. 80, n. 3–4, p. 147–163, 2006.

JÖRESKOG, K.G., KLOVAN, J.E. AND REYMENT, R.A., 1976. Geological factor analysis. **Elsevier Scient. Publ. Co.**, 178 pp.

KAINZ, M., LUCOTTE, M., 2006. Mercury concentrations in lake sediments – revisiting the 11 predictive power of catchment morphometry and organic matter composition. **Water Air Soil Pollut.** 170, 1–17.

KARADAĞ, M.M., KÜPELİ, S., ARYK, F., AÝHAN, A., DOYEN, V.Z., 2009. Rare earth element 14 (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortaş bauxite deposit (Seydişehir/Konya – Southern Turkey). **Chem. Erde.** 69, 2, 143-159.

KARUNAKARAN, C., SINHA ROY, S., 1981. Laterite profile development linked with polycyclic geomorphic surfaces in South Kerala. In: Proceedings of the International Seminar on Lateritisation Processes, pp. 221-231. **Trivandrum**, India.

KIRKWOOD, C., EVERETT, P., FERREIRA, A., LISTER, B., 2016. Stream sediment geochemistry as a tool for enhancing geological understanding: An overview of new data from south west England. *J. Geochem. Explor.* 163, 28-40.

LANDIM, P.M.B.; MELLO, C.S.B; SERRA, A.C.S.; MACEDO, A.B. 2007. Metodologia estatística multivariada em geoquímica. In: Licht, O.A.B., Mello, C.S.B & Silva, C.R. (Eds). *Prospecção Geoquímica de Depósitos Minerais Metálicos e não metálicos, óleo e gás. SBGq/CPRM*. Rio de Janeiro, 778p. Cap 20, p. 619-660.

LATRUBESSE, E., 2012. Amazon lakes. In: Bengtsson, L., Herschy, R., Fairbridge, R. (Eds.), *Lakes and Reservoirs*. Springer Verlag, pp. 13-26.

LAVAL, B. et al. Modeling circulation in lakes: Spatial and temporal variations. ***Limnology and Oceanography***, v. 48, n. 3, p. 983–994, maio 2003.

MAGNUSSON, W. E.; Mourão, G. Estatística sem matemática: a ligação entre as questões e a análise. Curitiba: 2003.

MARKER, A., FRIEDRICH, G., CARVALHO, A., MELFI, A., 1991. Control of the distribution of Mn, Co, Zn, Zr, Ti and REEs during the evolution of lateritic covers above ultramafic complexes. *J. Geochem. Explor.* 40(1), 361-383.

MARTIN; J.F.; DOYNE; J.C.. 1927. Laterite and lateritic soils in Sierra Leone, *Journal of agricultural science*. In: Autret; P. 1983. Latérites et Gravelleux Latéritiques. **Institut des Sciences at des Techniques de L'équipement et de L'environnement Pour le Développement** . Paris 38 p.

MARTINS, P.L.G., TOLEDO, C.L.B., SILVA, A.M., CHEMALE, Jr F., SANTOS, J.O.SS., ASSIS, L.M., 2017. Neoproterozoic magmatism in the southeastern Amazonian Craton, Brazil: Petrography, geochemistry and tectonic significance of basalts from the Carajás Basin. ***Precambrian Res.*** 302, 340-357.

MAURITY, C. W.; KOTSCHOUBEY, B. 1995. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1 Serra dos Carajás - PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. ***O Carste***, v. 7, p. 331–362, 1995.

MCLENNAN, S. M.; TAYLOR, S. R. Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends. ***Journal of Geology***, v. 99, n. 1–21, 1991.

MCLENNAN, S.M., HEMMING, S., MCDANIEL, D.K., HANSON, G.N., 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. Geological Society of America Special Paper. In: Johnsson, M.J., Basu, A. (Eds.), *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*, vol. 284. **Geological Society of America**, pp. 21-40, 1993.

MEDINA; J. 1970. Solos residuais. Seminários sobre propriedades mecânicas do solo. Instituto Alberto Luiz Coimbra Rio de Janeiro. In: Fumió B.L.C. 1982. Barragens de terra sobre solos

porosos: análise de soluções de drenagem na fundação. MS Dissertation. Universidade Federal do Rio de Janeiro, **Instituto Alberto Luiz Coimbra Rio de Janeiro**, 90 p.

MELLICANT, E., 2017. Geochemical signatures of parent materials and lake sediments in northern Minnesota. Master of Arts Thesis. Kansas State University, Manhattan, Kansas.

MORAES, B. C. DE et al. Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 207–214, 2005.

MOTTA João Gabriel **Geologia do Platô N6 – Província Mineral De Carajás (PA)**. 2011.68 f Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP - Universidade Estadual Paulista Campus de Rio Claro (SP), 2011.

MUELLER, U.A., GRUNSKY, E.C., 2016. Multivariate spatial analysis of lake sediment geochemical data; Melville Peninsula, Nunavut, Canada. *Appl. Geochem.* 75, 247-262.

MURIITHI, F.K. 2015. Centered Log-Ratio (clr) Transformation and Robust Principal Transformation and Robust Principal Component Analysis of Long-Term NDVI Data Reveal Vegetation Activity Linked to Climate Processes. **Journal Climate** 2015, 3, 135-149.

NESBITT, H.W., 1979. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering 10 of a granodiorite. *Nature* 279:206–210.

NESBITT, H.W., YOUNG, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutite. *Nature* 299, 715e717.

NESBITT, H.W., YOUNG, G.M., MCLENNAN, S.M., KEAYS, R.R., 1996. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implication for provenance studies. *J. Geol.* 104, 525-542.

NETO, M. M. J. 2004. Estatística multivariada. *Revista de Filosofia e Ensino*. Disponível em: http://www.criticanarede.com/cien_estatistica.html.

NOGUEIRA, A. C. 1995. Análise faciológica e aspectos estruturais da Formação Águas Claras, Região Central da Serra dos Carajás-Pará. Dissertação de Mestrado, **Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará**, Belém.

NUNES JA, SCHAEFER CEGR, FERREIRA JÚNIOR WG, NERI AV, CORREA GR, AND ENRIGHT NJ. 2015. Soil-vegetation relationships on a banded ironstone ‘island’, Carajás Plateau, Brazilian Eastern Amazonia. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 87(4): 2097-2110.

OLIVEIRA, S. M. B. DE et al. 2009. Lacustrine sediments provide geochemical evidence of environmental change during the last millennium in southeastern Brazil. In: **Chemie der Erde - Geochemistry**. v. 69, p. 395–405.

OLSZEWSKI, W. J. et al. The age, origin, and tectonics of the Grão Pará Group and associated

rocks, Serra dos Carajás, Brazil: Archean continental volcanism and rifting. **Precambrian Research**, v. 42, n. 3–4, p. 229–254, 1989.

PAIKARAY, S.; BANERJEE, S.; MUKHERJI, S. Geochemistry of shales from the Paleoproterozoic to Neoproterozoic Vindhyan Supergroup: Implications on provenance, tectonics and paleoweathering. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 32, n. 1, p. 34–48, 2008.

PANAHI, A., CHEN, Q., BONHAM-CARTER G.F., 2004. Modelling lake sediment geochemical distribution using principal component, indicator kriging and multifractal power-spectrum analysis: a case study from Gowganda, Ontario. *Geochem. Explor. Environ. A*, 4, 59-70.

PARSA, M., MAGHSOUDI, A., YOUSEFI, M., SADEGHI, M., 2016. Recognition of significant multi-element geochemical signatures of porphyry Cu deposits in Noghdouz area, NW Iran. **J. Geochemistry Exploration**. 165, 111-124.

PAWLOWSKY-GLAHN, V., EGOZCUE, J. J. 2006. Compositional data and their analysis: an introduction. In: Bucianti, A., Mateus-Figueras, G., Pawlowsky-Glahn, V. (eds). *Compositional Data Analysis in Geosciences: From Theory to Practice*. **Geological Society**, London, Special Publication 264, 1-10.

PILÓ, L. B.; AULER, A. S.; MARTINS, F. Carajás National Forest: Iron Ore Plateaus and Caves in Southeastern Amazon. In: **Landscapes and Landforms of Colombia**. [s.l: s.n.]. p. 1–210, 2015.

PINHEIRO, R. V. . O Contexto Geológico das Cavernas do Pará. **Espéleo Amazônico – GEP.Belém**, v. 2, p. 13–14, 1987.

POTTER, P.E., MAYNARD, J.B., DEPETRIS, P.J., 2005. Mud and Mudstones: Introduction and Overview. **Springer, New York**, p. 297.

R CORE TEAM (2018). R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria**. URL <https://www.R-project.org/>.

RANASINGHE, P. N. et al. Statistical evaluation of stream sediment geochemistry in interpreting the river catchment of high-grade metamorphic terrains. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 103, n. 2–3, p. 97–114, 2009.

REIMANN, C., CARITAT, P., GEMAS Project Team., NGSA Project Team., 2012a. New soil composition data for Europe and Australia: Demonstrating comparability, identifying continental-scale processes and learning lessons for global geochemical mapping. *Sci. Total Environ.* 416, 239-252.

REIMANN, C., FILZMOSER, P., 2000. Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data,” **Environ. Geol.** 39, 1001–1014.

REIMANN, C., FILZMOSER, P., GARRETT, R.G., 2002. Factor analysis applied to regional 6

geochemical data: problems and possibilities. **Appl. Gechem.** 17, 185-206.

REIMANN, C., FIZMOSER, P., FABIAN, K., HRON, K., BIRKE, M., DEMETRIDES., A., DINELLI, E., LADENBERGER, A., The GEMAS Project Team, 2012b. The concept of compositional data analysis in practice – Total major element concentrations in agricultural and grazing land soils of Europe. *Sci. Total Environ.* 426, 196-210.

ROY, P. D. et al. Geochemistry of late quaternary tephra-sediment sequence from north-eastern basin of Mexico (Mexico): Implications to tephrochronology, chemical weathering and provenance. **Revista Mexicana de Ciencias Geológicas**, v. 29, n. 1, p. 24–38, 2012.

ROY, P.D., CABALLERO, A.M., LOZANO, R., SMYKATZ-KLOSS, W., 2008. Geochemistry of late quaternary sediments from Tecocomulco lake, central Mexico: implication to chemical weathering and provenance. *Chem. Erde* 68, 383–393.

SAHOO, P. K. et al. 2015. Use of multi-proxy approaches to determine the origin and depositional processes in modern lacustrine sediments: Carajás Plateau, Southeastern Amazon, Brazil. **Applied Geochemistry**, v. 52, p. 130–146, 2015a.

SAHOO, P.K., SOUZA-FILHO, P.W.M., GUIMARÃES, J.T.F., ET AL., SILVA, M.S., COSTA, F.R., MANES, C.L.O., OTI, D., SILVA JUNIOR, R.O., DALLAGNOL, R., 2015b. A multi-proxy geochemical study of surface sediments in a plateau lake of Carajás in the southeastern Amazon region: implication for provenance and post-depositional processes. *Appl. Geochem.* 52, 130-146.

SAHOO, P.K., GUIMARÃES, J.T.F., SOUZA-FILHO, P.W.M., SILVA, M.S., MAURITY, C.W., POWELL, M.A., RODRIGUES, T.M., SILVA, D.F., MARDEGAM, S.F., NETO, A.E.F., DALLAGNOL, R., 2016a. Geochemistry of upland lacustrine sediments from Serra dos Carajás, Southeastern Amazon, Brazil: Implication for catchment weathering, provenance, and sedimentary processes. *J. South Am. Earth Sci.* 72, 178-190.

SAHOO, P.K., GUIMARÃES, J.T.F., SOUZA-FILHO, P.W.M., SILVA, MARCIO., SILVA JÚNIOR, R., PESSIM, G., MORAES, B., PESSOA, P.F.P., RODRIGUES, T.M., COSTA, M., DALLAGNOL, R., 2016b. Influence of seasonal variation on the hydro-biogeochemical characteristics of two upland lakes in the Southeastern Amazon, Brazil. *An. Acad. Brasil. Cienc.* (2016) 88(4): 2211-2227.

SAHOO, PK., GUIMARÃES, J.T.F., SOUZA-FILHO, P.W.M., SILVA, M.S., JUNIOR, W.N., POWELL, M.A., REIS, L.S., PESSENDA, L.C.R., RODRIQUE, T.M., SILVA, D.F., COSTA, V.L., 2017. Geochemical characterization of the largest upland lake of the Brazilian Amazonia: Impact of provenance and processes. **J. S. Am. Earth Sci.** 80, 541-558.

SANEMATSU K, MORIYAMA T, SOTOUKY L, WATANABE Y. 2011. Mobility of Rare Earth Elements in Basalt-Derived Laterite at the Bolaven Plateau, Southern Laos, *Resour. Geol.* 61, 2, 140–158.

SCHELLMANN, W., 1981. Considerations on the definition and classification of laterites. In: Proceedings of the International Seminar on Lateritisation Processes, IGCP 129 and IAGC, Trivandrum, India. **Oxford and IBH Publishing Company, New Delhi**, p. 1-10.

SCHELLMANN, W., 1986. A new definition of laterites. **Geol. Surv. India Mem.** 120, 1-7.

SCHMITT, R.A., SMITH, R.H., LASCH, J.E., MOSEN, A.W., OLEHY, D.A., VASILEVSKIS, J., 1963. Abundances of the fourteen rare-earth elements, scandium, and yttrium in meteoritic and terrestrial matter. **Geochim. Cosmochim. Acta** 27, 577-622.

SCHNURREMBERGER, D.; RUSSEL, J.; KELTS, K. Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components. **Journal of Paleolimnology**, v.29, p.141-154, 2003.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. . An analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965.

SIFEDDINE, A. et al. Delivery and deposition of organic matter in surface sediments of Lagoa do Caçó (Brazil). **Journal of Paleolimnology**, v. 45, n. 3, p. 385-396, 2011.

SILVA, M.S., GUIMARÃES, J.T.F., SOUZA-FILHO, P.W.M., SAHOO, P.K., COSTA, F.R., SILVA, J.R.O., RODRIGUES, T.M., COSTA, M.F., 2018. Morphology and morphometry of upland lakes over lateritic crust, Serra dos Carajás, southeastern Amazon region. *An. Acad. Brasil. Cienc.* 90, 1309-1325.

SINCLAIR, A.J., BLACKWELL, G.H., 2004. Applied Mineral Inventory Estimation, Cambridge University Press. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.

SINGH, M.; SHARMA, H. J. 2005. Tobschall. Weathering of the Ganga alluvial plain, northern India: implications from fluvial geochemistry of the Gomati River. **Applied Geochemistry**, 20, 1-21.

SIQUEIRA, A. C. A., C. MAGINI, E. L. DANTAS 2014. Lateritas do Domínio Médio Coreaú – Comportamento geoquímico de mantos lateríticos do Noroeste do Estado do Ceará. **Brazilian Journal of Geology**, 44(2): 249-264.

SMOL, J. P., BIRKS, H. J. B., AND LAST, W. M., 2001, Tracking environmental change using lake sediments. Volume 3: Terrestrial, algal, and siliceous indicators: Tracking environmental change using lake sediments. Volume 3: Terrestrial, algal, and siliceous indicators, p. xxv + 371 pp.-xxv + 371 pp.

SOUZA, S. Z., R. DALL'AGNOL, F. J. ALTHOFF, A. A. S. LEITE & C. E. M. BARROS, 1996. Carajás Mineral Province: geological, geochronological and tectonic constraints on the Archean evolution of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrain and the Carajás block. **Extended Abstracts of the Symposium on Archean Terranes of South America Platform** 1: 31-32.

SOUZA-FILHO, P.W.M., GUIMARÃES, J.T.F. SILVA, M.S., Costa, F.R., Sahoo, P.K., Maurity, C.W., Dall'agnol, R., 2016. Basin morphology, sedimentology and seismic stratigraphy of an upland lake from Serra dos Carajás, southeastern Amazon, Brazil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 11(1), 71-83.

SUN, X., ZHENG, Y., WANG, C., ZHAO, Z., GENG, X. 2016. Identifying geochemical anomalies associated with Sb–Au–Pb–Zn–Ag mineralization in North Himalaya, southern Tibet. **Ore Geol. Rev.** 73, 1–12.

TALBOT, M. R.; ALLEN, P. A. Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy. In: **H. G. READING (Ed.)**. 3rd. ed. Wiley-Blackwell, New York: [s.n.]. p. 83–124, 1996.

TANAKA, K. et al. Rare earth element geochemistry of Lake Baikal sediment: its implication for geochemical response to climate change during the Last Glacial/Interglacial transition. **Quaternary Science Reviews**, v. 26, n. 9–10, p. 1362–1368, 2007.

TAYLOR, S.R., MCLENNAN, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, Oxford, pp. 1–190.

TOLBERT, G. E. et al. The Recently Discovered Serra dos Carajás Iron Deposits, northern Brazil. **Economic Geology**, v. 66, n. 7, p. 985–994, 1971.

TOLOSANA-DELGADO, R. 2008, Compositional Data Analysis in a Nutshell, www.sediment.uni-goettingen.de/staff/tolosana/extra/CoDaNutshell.pdf.

TOLU, J., RYDBERG, J., MEYER-JACOB, C., GERBER, L., BINDLER, R., 2017. Spatial variability of organic matter molecular composition and elemental geochemistry in surface sediments of a small boreal Swedish lake. *Biogeosciences* 14, 1773–1792.

TYLMANN, W., 2005. Lithological and geochemical record of anthropogenic changes in recent sediments of a small and shallow lake (Lake Pusty Shaw, northern Poland), **J. Paleolimnol.** 33, 313–325.

VAN DEN BOOGAART, K.G., TOLOSANA-DELGADO, R., 2013. Analyzing Compositional Data 1 With R, **Springer**.

VASQUEZ, M. L.; ROSA-COSTA, L. T. 2008 da (Org.). **Geologia e recursos minerais do Estado do Pará**: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Pará. Belém: CPRM, 2008. 328 p. il. color. escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil (PGB).

WALKER, R.G., 1992. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: Walker, R.G., James, N.P. (Eds.), *Facies Models - Response to Sea Level Change*, second ed. **Geological Association of Canada, Ontario**, p. 1-14.

WANG, W., ZHAO, J., CHENG, Q., 2014. Mapping of Fe mineralization-associated geochemical signatures using logratio transformed stream sediment geochemical data in eastern Tianshan,

China. **J. Geochemistry Exploration.** 141, 6–14.

WEDEPOHL, K. H. The composition of the continental crust. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 59, n. 7, p. 1217–1232, 1995.

WEIRICH, F. H. A study of the nature and incidence of density currents in a shallow glacial lake. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 76, n. 3, p. 396–413, 1986.

WOJCIECH, T., 2005. Lithological and geochemical record of anthropogenic changes in recent sediments of a small and shallow lake (Lake Pustu Staw, northern Poland). **Journal of paleolimnology** 33, 313-325.

XIAO, S., LIU, W., YANG, S., LAI, Z., 2010. Pervasive autocorrelation of the chemical index of alteration in sedimentary profiles and its paleoenvironmental implications. *Sedimentology* 57, 670-676.

YOUSEFI, M., CARRANZA, E.J.M., KAMKAR-ROUHANI, A., 2013. Weighted drainage catchment basin mapping of stream sediment geochemical anomalies for mineral potential mapping. **J. Geochemistry Exploration.**, 128, 88-96.

ZHOU, J., MA, D., PAN, J., NIE, W., WU, KAI., 2008. Application of multivariate statistical approach to identify metal sources in sediments and Waters: a case study in Yangzhong, China. **Environmental Geology** 54, 373-380.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela descritiva do banco de dados.

Apêndice A. Dados analíticos dos lagos (Serra Bocaina, Amazonia) sedimentos e material de rocha e solo, Brazil.

Parâmetros		SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	MnO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	LOI	C	S		
Unidades		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
Limite de detecção (DL)		0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-	0,01	0,01		
Amostras ID	Sedimentos	Longitude_WGS1984	Latitude_WGS1984	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	MnO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	LOI	C	S
LB1 25-30	LB1	-49,88916667	-6,308055556	39,79	3,12	23,11	4,85	0,02	0,01	0,03	0,01	0,08	1,64	26,4	8,03	0,11
LB1 30-35				43,79	3,15	23,92	4,9	0,03	0,01	0,03	0,01	0,09	1,53	22,26	5,65	0,1
LB1 35-40				40,47	3,43	25,84	8,26	0,03	0,01	0,03	0,01	0,08	1,33	20,18	4,12	0,09
LB1 40-45				37,19	3,73	27,73	9,94	0,06	0,01	0,02	0,04	0,08	1,26	20,43	3,83	0,09
LB1 45-50				37,63	3,57	26,99	10,8	0,05	0,01	0,02	0,03	0,08	1,18	18,56	3,5	0,08
LB2 30-35	LB2	-49,905	-6,313611111	37,32	3,23	22,68	3,36	0,03	0,01	0,02	0,02	0,08	1,03	30,94	11,4	0,04
LB2 35-40				45,49	3,17	24,67	3,47	0,04	0,01	0,02	0,03	0,07	1,03	22,42	5,65	0,04
LB2 40-45				46,5	3,27	26,12	3,43	0,04	0,01	0,02	0,03	0,07	0,95	18,2	3,16	0,03
LB2 45-50				43,51	3,5	27,32	5,11	0,05	0,01	0,02	0,03	0,08	0,98	18,67	3,26	0,03
LB2 50-55				43,02	4,01	27,29	4,99	0,05	0,01	0,02	0,03	0,08	1,03	19,26	4,2	0,02
LB2 55-60				46,53	4,08	26,42	5,31	0,06	0,01	0,02	0,04	0,09	1,13	16,36	2,59	0,01
LB2 60-65				39,66	3,81	29,09	7,91	0,05	0,01	0,02	0,04	0,08	1,23	17,78	2,18	0,01
LB2 65-70				42,43	3,78	28,45	8,07	0,05	0,01	0,02	0,03	0,08	1,3	14,66	2,08	0,01
LB2 70-75				37,94	3,96	28,47	10,63	0,06	0,01	0,02	0,03	0,08	1,29	15,62	2,02	0,01
LB2 75-80				32,1	4,1	28,62	17,24	0,06	0,01	0,02	0,03	0,08	1,39	15,06	1,63	0,01
LB2 80-85				30,5	4,51	29,87	15,31	0,06	0,01	0,02	0,03	0,08	1,38	16,65	2,5	0,01
LB2 85-90				23,94	4,49	30,28	22,58	0,06	0,01	0,02	0,03	0,07	1,49	15,34	1,75	0,01
LB2 90-95				21,1	4,32	29,46	24,74	0,07	0,01	0,02	0,03	0,06	1,43	17,14	2,67	0,01
LB2 95-100				16,63	4,23	31,05	26,28	0,09	0,01	0,02	0,04	0,08	1,32	18,84	2,76	0,01
LB3 130-135	LB3	-49,90972222	-6,313611111	48,26	3,52	22,24	8,55	0,13	0,02	0,03	0,04	0,18	0,3	16,54	4,77	0,03
LB3 135-140				53,24	3,79	22,09	7,28	0,14	0,03	0,02	0,04	0,21	0,18	13	2,76	0,02
LB3 140-145				50,35	3,68	18,32	15,68	0,14	0,03	0,02	0,04	0,22	0,18	10,98	1,7	0,03
LB3 145-150				47,4	3,54	15,86	21,59	0,13	0,03	0,02	0,04	0,2	0,19	10,59	1,59	0,02
LB3 150-155				49,55	3,73	17,32	17,61	0,12	0,03	0,02	0,05	0,21	0,15	11,12	1,87	0,01
LB3 155-160				41,99	3,86	18,84	21,79	0,1	0,02	0,02	0,03	0,21	0,19	12,66	2,23	0,01
LB3 160-165				46,97	4,4	20	15,08	0,12	0,03	0,05	0,03	0,26	0,15	12,84	2,62	0,01
LB3 165-170				47,38	4,56	25,76	7,64	0,12	0,02	0,03	0,03	0,22	0,17	13,48	2,33	0,01
LB3 170-175				36,25	5,35	35,36	7,17	0,07	0,01	0,02	0,02	0,1	0,66	14,5	1,2	0,01
LB3 175-180				35,97	5,21	35,59	7,76	0,06	0,01	0,02	0,03	0,1	0,75	14,5	1,1	0,01
LB3 180-185				38,41	5,25	35,68	6,29	0,06	0,01	0,02	0,02	0,09	1,04	13,65	0,83	0,01
LB3 185-190				36,95	5,24	36,55	6,62	0,05	0,01	0,02	0,03	0,08	1,64	13,61	0,61	0,01
LB3 190-195				33	5,58	38,08	8,17	0,06	0,01	0,03	0,03	0,09	2,4	13,54	0,63	0,02
LB3 195-200				33,28	5,56	36,91	8,78	0,07	0,01	0,03	0,03	0,1	2,1	13,65	0,75	0,01
LB3 200-205				34,48	5,16	34,48	8,46	0,07	0,01	0,02	0,03	0,11	1,16	16,12	1,95	0,01
LB3 205-210				33,9	5,57	33,49	9,23	0,08	0,02	0,02	0,01	0,11	0,97	17,22	2,83	0,02
LB3 210-215				37,41	4,99	34,91	6,6	0,07	0,01	0,02	0,02	0,1	0,38	15,84	1,41	0,01
LB3 215-220				34,57	5,31	34,45	9,42	0,07	0,02	0,02	0,02	0,1	0,45	16,15	1,39	0,03
LB3 220-225				35	4,94	36,02	7,91	0,06	0,01	0,02	0,02	0,1	0,39	15,61	1,39	0,02
LB3 225-230				16,11	5,06	48,1	13,59	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,91	15,85	1	0,03
LB3 230-235				12,56	5,01	49,4	14,89	0,03	0,01	0,01	0,04	0,01	1,01	15,98	0,9	0,02
LB3 235-243				17,2	4,81	46,36	13,66	0,04	0,02	0,01	0,04	0,03	0,86	16,19	0,96	0,03
LB4 120-125	LB4	-49,93416667	-6,328611111	49,63	4,01	22,23	4,12	0,11	0,03	0,02	0,02	0,31	0,06	19,83	7,43	0,04
LB4 125-130				49,18	3,78	21,57	3,88	0,11	0,02	0,02	0,02	0,32	0,05	21,28	8,34	0,05
LB4 145-150				38,15	2,93	15,56	19,37	0,12	0,05	0,04	0,02	0,28	0,09	23,58	9	0,07

Apêndice A. Dados analíticos dos lagos (Serra Bocaina, Amazonia) sedimentos e material de rocha e solo, Brazil.

			Parâmetros	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	MnO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	LOI	C	S	
			Unidades	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
			Limite de detecção (DL)	0,01		0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-	0,01	0,01
			Parâmetros	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	MnO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	LOI	C	S	
			Unidades	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
			Limite de detecção (DL)	0,01		0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-	0,01	0,01
Amostras ID	Rocha	Longitude WGS1984	Latitude WGS1984	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	MnO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	LOI	C	S	
LB1-01	LB1	−49,8892790359	−6,3074289914	1,27	2,52	24,75	53,13	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01	0,48	16,6	0,44	0,05	
LB1-02		−49,8893210292	−6,3079989608	1,13	1,82	28,88	50,34	0,04	0,08	0,01	0,01	0,01	0,34	17,36	0,18	0,03	
LB1-03		−49,8892709892	−6,3079660200	1,83	2,52	27,09	50,28	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	1,11	16,46	0,5	0,04	
LB2-01	LB2	−49,9051859602	−6,3139259722	2,9	2	17,72	61,17	0,04	0,09	0,01	0,01	0,01	1,32	14,51	0,47	0,06	
LB2-02		−49,9049049988	−6,3138780277	1,08	2,23	20,91	60,8	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,53	13,39	0,52	0,12	
LB3-01		−49,9090810306	−6,3147469796	4,59	1,82	21,21	57,78	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,33	14,22	0,46	0,06	
LB3-02	LB3	−49,9092070106	−6,3142210152	2,55	1,08	11,21	74,49	0,05	0,08	0,01	0,01	0,01	0,48	9,11	0,24	0,03	
LB3-03		−49,9096909817	−6,3140999805	7,81	1,26	11,46	68,41	0,05	0,1	0,01	0,01	0,01	0,6	10,5	0,27	0,03	
LB3-04		−49,9103890266	−6,3141500205	2,34	2,79	23,86	55,36	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,88	14,39	0,5	0,06	
LB3-05		−49,9105020147	−6,3145660143	2,37	2,66	21,85	59,97	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,97	13,16	0,36	0,05	
LB3-06		−49,9099639803	−6,3150169607	0,94	2,67	21,93	59,8	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,47	13,45	0,34	0,09	
LB4-01	LB4	−49,9345569871	−6,3281519897	0,79	2,76	24,67	55,89	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,44	15,13	0,52	0,08	
LB4-02		−49,9337400030	−6,3282109983	0,68	2,68	23,18	58,09	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,4	14,13	0,47	0,1	
LB4-03		−49,9329909962	−6,3289669622	0,81	2,86	22,79	57,78	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,55	15,07	0,58	0,07	
LB4-04		−49,9337379914	−6,3294230215														
Amostras ID	Solo	Longitude WGS1984	Latitude WGS1984	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	MnO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	LOI	C	S	
LB1-02	LB1 solo	−49,8893210292	−6,3079989608	16,72	4,49	27,44	35,57	0,09	0,04	0,07	0,05	0,04	0,7	15,1	6,2	0,09	
LB3-01	LB3 solo	−49,9090810306	−6,3147469796	27,79	5,02	25,71	35,11	0,1	0,03	0,04	0,07	0,07	0,97	4	0,64	0,12	
Material de referência ferruginosos																	
AM-Ti1-01	Lagoa três irmãs	Fe-Rock		0,84	0,22	1,55	91,21	0,09	0,02	0,01	0,01	0,01	0,76	4,34	0,9	1	
AM-Ti1-03		Fe-Rock		0,66	0,16	1,5	95,05	0,08	0,02	0,01	0,01	0,01	0,51	1,99	1	0,9	
AM-Ti1-05		Fe-Rock		0,71	0,47	2,97	88,92	0,08	0,02	0,01	0,01	0,01	0,73	5,11	1,7	2,7	
AM-Ti1-07		Fe-Rock		0,66	0,27	2,82	94,78	0,12	0,02	0,02	0,04	0,01	0,11	2,3	0,7	1	
Soil_VL1	Lago Violão	Fe-Soil		4,7	0,36	2	80,7	0,04	0,02	0,02	0,01	0,03	0,55	11	1,6	1,3	
Soil_VL2		Fe-Soil		3,1	0,61	3,5	78,3	0,03	0,02	0,025	0,01	0,04	0,88	15,2	2,3	0,9	
Soil_VL3		Fe-Soil		5,8	0,47	2,3	83,7	0,02	0,03	0,033	0,015	0,024	0,67	8,3	1,8	1,7	
Soil_VL4		Fe-Soil		4,2	0,55	3,1	80,7	0,02	0,025	0,01	0,01	0,03	0,53	12,2	1,5	1,9	
Material de referência primários																	
			BIF	46,61	0,01	0,05	50,71	0,02	0,07	0,01	0,01	0,01	0,01	1,5	0,3	0,05	
			UCC	64,92	0,52	14,63	4,42	0,07	2,24	4,12	3,46	3,45	0,15	4	0,4	0,45	
			Condrite														

Apêndice A. Dados analíticos dos lagos (Serra Bocaina, Amazonia) sedimentos e material de rocha e solo, Brazil.

			Parâmetros	Ba	Sr	Rb	Pb	Sc	Th	U	Zr	Hf	Nb	Y	Cu	Zn	As	Se	Mo	Hg	V	Cr	Ga	Co	Ni		
			Unidades	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		
			Limite de detecção (DL)	1	0,5	0,1	0,1	1	0,2	0,1	5	0,1	5	0,1	0,1	1	0,5	0,5	0,1	0,01	8	20	0,5	0,2	0,1		
			Parâmetros	Ba	Sr	Rb	Pb	Sc	Th	U	Zr	Hf	Nb	Y	Cu	Zn	As	Se	Mo	Hg	V	Cr	Ga	Co	Ni		
			Unidades	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		
			Limite de detecção (DL)	1	0,5	0,1	0,1	1	0,2	0,1	5	0,1	5	0,1	0,1	1	0,5	0,5	0,1	0,01	8	20	0,5	0,2	0,1		
Amostras ID	Material da bacia	Longitude WGS1984	Latitude WGS1984	Ba	Sr	Rb	Pb	Sc	Th	U	Zr	Hf	Nb	Y	Cu	Zn	As	Se	Mo	Hg	V	Cr	Ga	Co	Ni		
LB1-01	LB1	−49,8892790359	−6,3074289914	21,6	9	0,2	9,7	24,6	20,5	3,73	516	13,5	30,4	11,5	15,9	2	9,8	0,4	5,12	0,01	449	230	43,1	1,1	2,9		
LB1-02		−49,8893210292	−6,3079989608	39,3	13,7	0,2	3,8	22,4	16,3	1,79	323	8,4	17,7	8,8	28,3	15	4,2	0,3	2,73	0,35	485	370	32,8	1	3,8		
LB1-03		−49,8892709892	−6,3079660200	12,9	6	0,2	6,6	18,7	27,2	3,55	605	14,5	32	13,1	25,8	14	17	0,4	8,54	0,02	442	330	44,1	1	4,7		
LB2-01	LB2	−49,9051859602	−6,3139259722	24,8	5,7	0,3	5,4	16,2	23,6	2,63	468	12,3	25,6	10,5	37,6	29	15,9	0,5	4,99	0,02	339	230	27,8	2,3	5,9		
LB2-02		−49,9049049988	−6,3138780277	30,3	14	0,4	3,7	19,8	24,2	2,52	475	11,8	26,9	11,2	20,5	4	4	0,3	3,71	0,13	425	270	37,7	0,2	1,5		
LB3-01		−49,9090810306	−6,3147469796	26	12,1	0,2	4,3	23,3	22,2	2,23	379	9	21,8	10,3	40,4	5	4,6	0,3	6,32	0,16	635	290	37,1	0,4	1,9		
LB3-02	LB3	−49,9092070106	−6,3142210152	16	8,3	0,2	4,7	16,3	16,85	1,64	231	5,7	12	8,4	328	10	5,4	0,3	4,48	0,09	380	210	25,2	2,7	10		
LB3-03		−49,9096909817	−6,3140999805	13,1	4,1	0,2	8,6	19,1	10,25	2,04	208	4,6	11,4	11,8	505	14	6,6	0,5	2,63	0,09	270	370	22,2	3,5	16,9		
LB3-04		−49,9103890266	−6,3141500205	31,1	12,9	0,2	5,9	19,7	27,3	3,02	579	14,3	33,7	13,7	34,6	10	4,6	0,3	4,26	0,03	407	300	46,6	0,3	1,5		
LB3-05		−49,9105020147	−6,3145660143	29,7	13,7	0,3	4,4	16,4	26,6	2,49	539	13,8	31,6	13,5	18	5	5,5	0,3	3,22	0,01	386	240	40	0,4	1,5		
LB3-06		−49,9099639803	−6,3150169607	32,1	16,3	0,2	4,5	12,3	25,5	2,44	538	13,4	31,3	15,4	20,2	4	3	0,3	2,82	0,25	373	600	41	0,5	2,4		
LB4-01	LB4	−49,9345569871	−6,3281519897	35,6	18,5	0,2	4	16,2	27,9	2,68	551	14	34,4	17,2	10,1	2	2,7	0,3	3,48	0,3	482	770	46,8	0,2	2		
LB4-02		−49,9337400030	−6,3282109983	34	17	0,2	3,6	15,9	27,2	2,65	553	13,6	32,3	16,4	13,3	2	2,3	0,3	2,86	0,1	398	570	45	0,2	1,3		
LB4-03		−49,9329909962	−6,3289669622	35,9	18	0,2	4,2	17,5	25	3,11	600	14,2	35,2	16,8	16,3	2	4,6	0,4	5,01	0,04	639	670	50,6	0,2	1,6		
LB4-04		−49,9337379914	−6,3294230215																								
Amostras ID	Material da bacia	Longitude WGS1984	Latitude WGS1984	Ba	Sr	Rb	Pb	Sc	Th	U	Zr	Hf	Nb	Y	Cu	Zn	As	Se	Mo	Hg	V	Cr	Ga	Co	Ni		
LB1-02	LB1 SOIL	−49,8893210292	−6,3079989608	18,3	10,8	1,6	12,5	20,3	31,3	4,84	1015	25,4	49,4	20,6	46,5	25	1,6	0,2	3,47	0,21	372	270	46,9	1,1	6,7		
LB3-01	LB3 SOIL	−49,9090810306	−6,3147469796	42,2	16,8	2,2	16,6	15,9	35,8	5,17	1255	31,1	58,9	29,1	39	21	0,4	0,3	3,71	0,05	435	310	57,3	0,8	4,6		
Material de referência ferruginosos																											
AM-TI1-01	Lagoa três irmãs	Fe-Rock		0,17	0,03	7,8	5,1	0,5	4,9	2,9	4,82	0,66	70	1,8	4,2	3,2	7,6	9	3,6	0,5	1,35	0,01	74	50	7,2		
AM-TI1-03		Fe-Rock		0,19	0,03	8,5	3,4	0,5	2,6	5,3	3,86	0,5	45	1,1	3,1	2,9	9,8	2	4,4	0,9	1,06	0,02	47	30	6,3		
AM-TI1-05		Fe-Rock		0,32	0,09	9,6	6,8	0,3	7,9	9,9	10,2	0,92	138	3,7	7,3	4,6	40,1	3	9,6	0,8	1,97	0,08	221	80	15,5		
AM-TI1-07		Fe-Rock		0,17	0,05	10,7	4,9	0,5	4,3	3,7	8,72	0,66	78	2,2	3,6	3,5	9	2	2,8	0,2	0,99	0,04	105	40	9,5		
Soil_VL1	Lago Violão	Fe-Soil		4,2	0,05	15	4,2	0,4	9	3,6	5,6	1,7	87	2,1	4,4	4,5	26	13	4,7	0,9	1,3	0,12	35	50	5,2		
Soil_VL2		Fe-Soil		6,2	0,07	21	8,2	0,5	15,4	4,2	7,2	2,2	185	5,2	11,4	7,2	15,4	34	2,4	0,7	2,1	0,05	89	111	10,2		
Soil_VL3		Fe-Soil		2,7	0,04	18	7,1	0,4	13,2	2,8	4,3	1,5	123	3,1	6,7	5,2	17	26	7,1	0,5	1,5	0,09	71	88	8		
Soil_VL4		Fe-Soil		6,2	0,03	20	6,8	0,3	12	5,6	5,4	1,6	153	4,5	9,4	7,2	21,3	15	5,2	1,2	1,6	0,14	79	96	8,1		
Material de referência primários																											
		BIF		7	0,7	0,8	2,1	1	0,2	0,1	1	0,1	0,1	2,6	11,6	16	0,6	0,5	0,5	0,01	19	34	0,5	0,4	20		
		UCC		668	316	110	17	7	10	2,5	237	5,8	26	20,7	14	52	2	0,1	1,4	0,056	53	35	14	12	18,6		
		Condrite																									

Apêndice A. Dados analíticos dos lagos (Serra Bocaina, Amazonia) sedimentos e material de rocha e solo, Brazil.

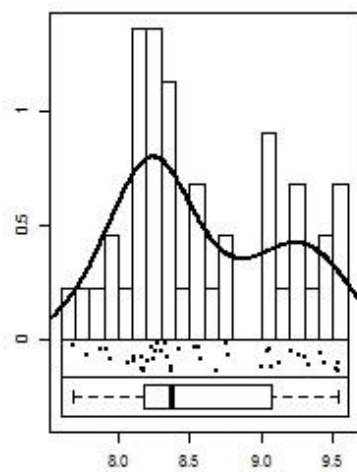
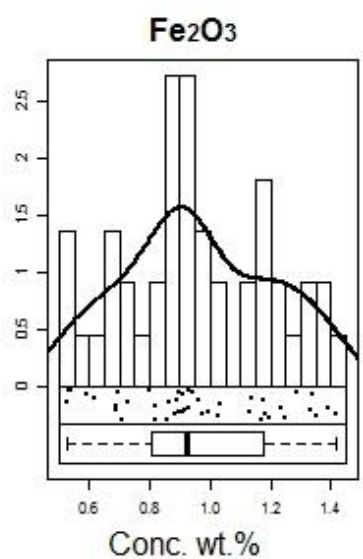
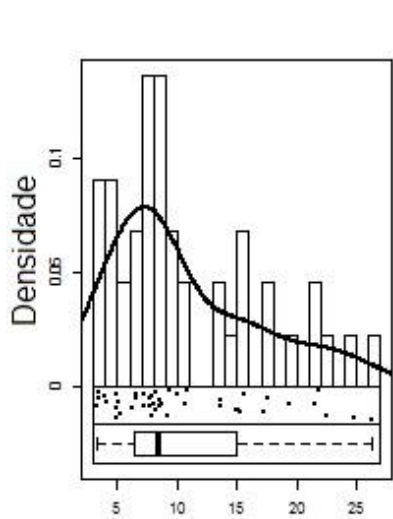
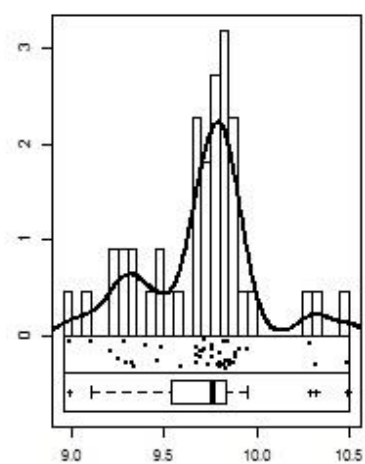
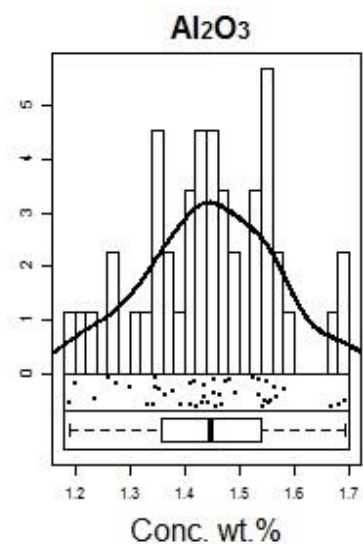
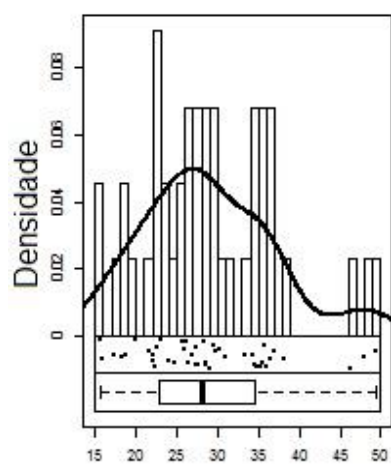
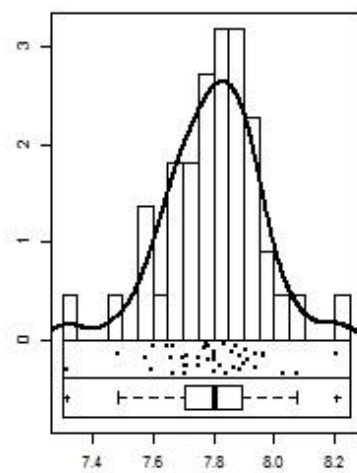
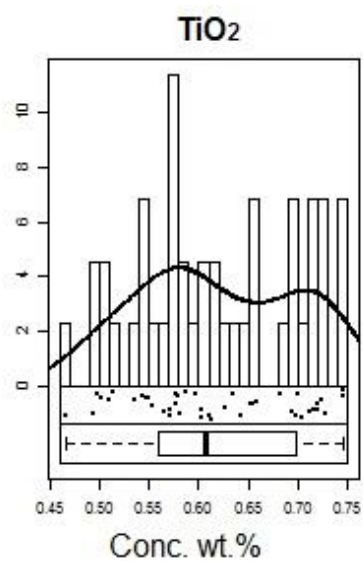
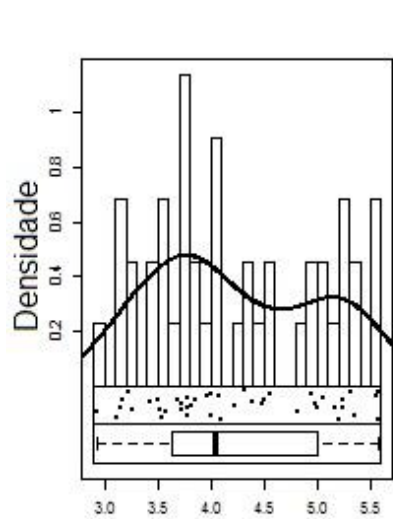
		Parâmetros		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		Unidades		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
		Limite de detecção (DL)		0,1	0,1	0,02	0,2	0,5	0,02	0,05	0,01	0,05	0,02	0,03	0,01	0,05	0,01
Amostras ID	Sedimentos	Longitude WGS1984	Latitude WGS1984	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
LB1 25-30	LB1	-49,88916667	-6,308055556	15,3	36,4	4,61	16,9	3,47	0,76	3,34	0,56	3,49	0,85	2,62	0,43	3,53	0,56
LB1 30-35				13,2	31,4	3,96	15,7	3,11	0,79	2,95	0,57	3,33	0,75	2,48	0,44	3,22	0,51
LB1 35-40				15	37,3	4,92	18,7	3,56	0,93	3,65	0,59	3,79	0,77	2,83	0,47	3,45	0,57
LB1 40-45				20,7	51,2	6,16	23,5	4,19	0,96	4,27	0,65	4,2	0,95	2,99	0,56	3,85	0,66
LB1 45-50				23,2	52,1	6,29	22,7	4,3	0,99	4,04	0,68	4,12	0,94	2,81	0,48	3,6	0,6
LB2 30-35	LB2	-49,905	-6,313611111	17,7	40,1	4,84	17,4	3,66	0,87	3,47	0,59	3,93	0,82	2,62	0,47	3,51	0,53
LB2 35-40				9,5	21,7	2,86	12,3	2,51	0,73	2,81	0,51	3,4	0,79	2,74	0,43	3,4	0,58
LB2 40-45				8,6	20,2	2,65	10,7	2,73	0,65	2,39	0,44	3,15	0,72	2,66	0,41	3,38	0,53
LB2 45-50				10,8	25,5	3,4	14	3,29	0,79	2,92	0,54	3,66	0,8	2,71	0,48	3,64	0,6
LB2 50-55				13,7	31,7	3,85	15,5	2,91	0,9	3,48	0,6	3,89	0,93	3,11	0,53	3,96	0,69
LB2 55-60				14,5	34,8	4,22	16,4	3,49	0,79	3,57	0,69	4,26	0,97	3,13	0,51	4,11	0,69
LB2 60-65				19,3	47,4	5,82	22,6	4,64	1,21	4,35	0,73	4,45	1,02	3,41	0,58	4,12	0,63
LB2 65-70				25,3	52,5	6	21,4	3,65	0,99	4,02	0,68	4,28	0,89	3,29	0,52	4,04	0,6
LB2 70-75				33,6	71,6	7,99	28,8	5,36	1,41	5,26	0,83	5,37	1,16	3,91	0,57	4,23	0,72
LB2 75-80				30,6	62,1	6,72	23,1	4,3	1,14	4,43	0,84	4,9	1,12	3,45	0,56	4,29	0,68
LB2 80-85				36,1	74,2	8,39	30,2	5,43	1,25	5,54	0,93	5,77	1,34	4,36	0,67	5,15	0,8
LB2 85-90				32,6	64	6,65	25,1	4,71	1,04	4,41	0,77	5,02	1,11	3,39	0,61	4,43	0,75
LB2 90-95				45,8	87,5	9,26	33,9	6,21	1,32	5,74	0,89	6,02	1,22	4,04	0,63	4,84	0,77
LB2 95-100				48,2	86,7	9,04	33,8	6,03	1,31	5,27	0,88	5,46	1,14	3,68	0,58	4,3	0,66
LB3 130-135	LB3	-49,90972222	-6,313611111	42,6	80,7	8,37	33	5,78	1,3	5,4	0,91	6,14	1,26	3,88	0,69	4,95	0,78
LB3 135-140				43,3	77,8	8,41	32,3	5,82	1,4	6,04	1	6,36	1,4	4,66	0,76	5,37	0,88
LB3 140-145				37,8	70,7	7,06	27,5	5,3	1,3	5,45	1,01	6,66	1,43	4,47	0,7	5,19	0,81
LB3 145-150				36,3	72,5	7,51	28,4	5,39	1,24	5,58	0,96	6,68	1,35	4,56	0,72	5,27	0,86
LB3 150-155				38,9	71,1	7,26	26,7	4,73	1,11	5,31	0,84	5,81	1,3	4,19	1,95	5,11	0,78
LB3 155-160				39,3	73,8	7,34	29	5,19	1,08	5,63	0,97	6	1,34	4,21	0,73	5,48	0,85
LB3 160-165				45,8	84	8,72	35,1	6,26	1,44	6,62	1,11	7,15	1,64	5,11	0,81	6,14	0,96
LB3 165-170				46,4	86,3	8,59	34,3	6,18	1,45	6,59	1,17	7,66	1,68	5,4	0,88	6,45	0,99
LB3 170-175				50,1	87,7	9,35	35	5,41	1,34	5,54	0,88	5,87	1,27	4,23	0,69	5,34	0,84
LB3 175-180				45,5	80,2	8,72	33,1	5,37	1,31	5,08	0,89	5,93	1,39	3,88	0,63	5,16	0,85
LB3 180-185				45,3	78,3	8,5	32,3	5,56	1,25	4,92	0,89	5,66	1,22	4,08	0,73	5,14	0,85
LB3 185-190				42,6	75,2	8,14	31,1	5	1,23	4,8	0,77	5,26	1,11	3,83	0,69	5,2	0,81
LB3 190-195				40,7	73,3	8,16	31,6	5,25	1,22	4,58	0,78	5,41	1,22	3,77	0,64	5,11	0,88
LB3 195-200				44,6	79,2	9,81	34,2	6,51	1,57	5,35	0,84	5,73	1,27	4,15	0,72	5,4	0,88
LB3 200-205				48,8	86	10,05	36,4	6,54	1,39	5,59	0,88	5,62	1,21	4,12	0,69	5,34	0,91
LB3 205-210				52,9	101	12	41,9	7	1,67	6,49	0,99	6,35	1,29	4,45	0,8	5,67	0,97
LB3 210-215				40	68,2	8,06	27,9	5,4	1,35	5,46	0,92	5,69	1,25	4,38	0,69	5,11	0,81
LB3 215-220				55,2	97,6	11,3	37,4	6,61	1,5	6,18	0,94	6,47	1,43	4,96	0,77	5,99	0,96
LB3 220-225				48,2	81,5	10,35	34,9	5,99	1,46	5,93	0,91	6,11	1,27	4,39	0,75	5,56	0,87
LB3 225-230				72,2	112	14,35	47,7	7,7	1,79	5,92	0,82	5,09	1,17	3,78	0,68	4,72	0,84
LB3 230-235				70,7	105	13,35	45,3	7,28	1,58	5,3	0,78	4,9	1	3,53	0,59	4,73	0,76
LB3 235-243				62,4	94,3	12,35	40,3	6,28	1,58	5,19	0,79	4,59	1,04	3,55	0,58	4,32	0,77
LB4 120-125	LB4	-49,93416667	-6,328611111	45,7	79,6	8,9	31,2	5,35	1,34	5,66	1,02	6,39	1,41	4,78	0,7	5,25	0,79
LB4 125-130				45,2	81,9	9,3	31,2	5,73	1,28	5,98	0,99	6,45	1,36	4,54	0,73	5,01	0,82
LB4 145-150				38,8	74,1	8,11	28,3	5,38	1,3	5,5	0,91	5,88	1,27	3,98	0,6	4,6	0,7

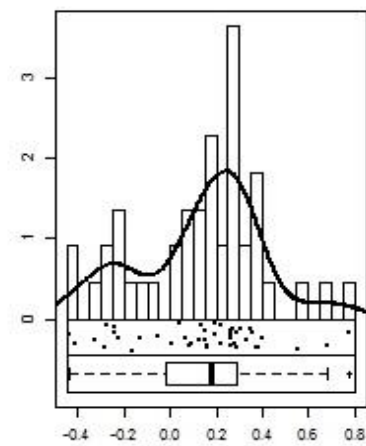
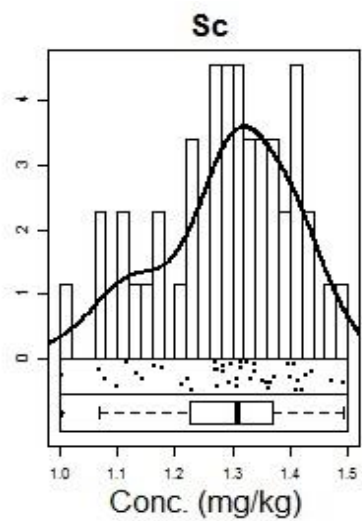
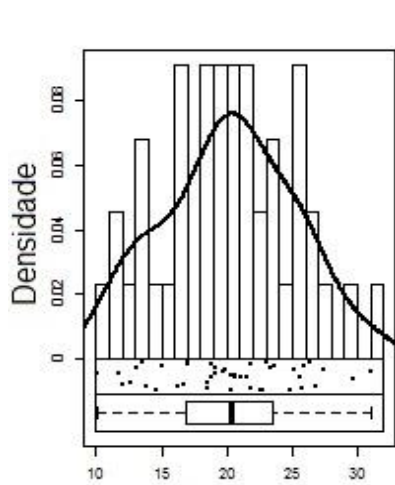
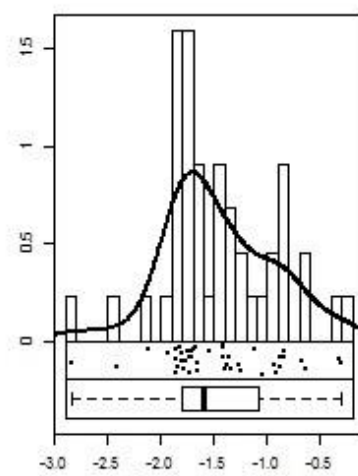
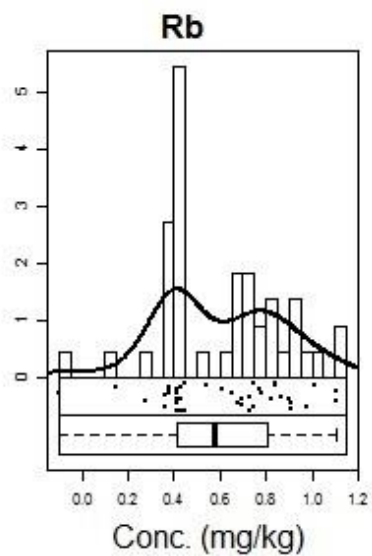
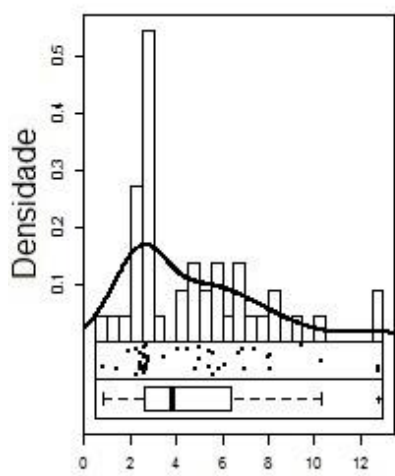
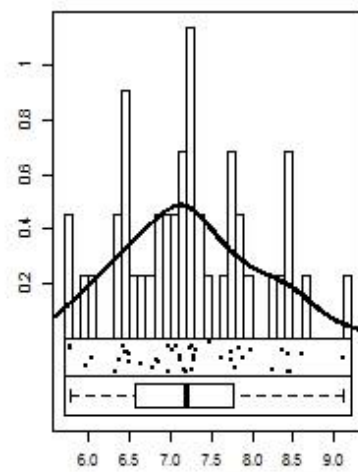
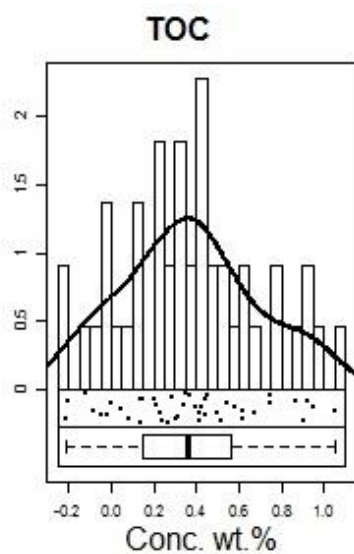
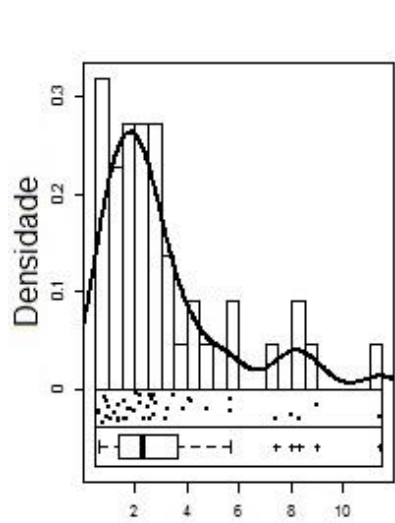
Apêndice A. Dados analíticos dos lagos (Serra Bocaina, Amazonia) sedimentos e material de rocha e solo, Brazil.

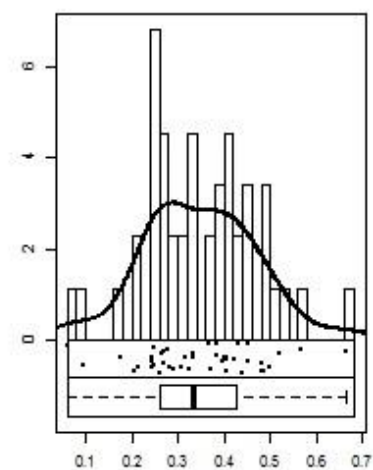
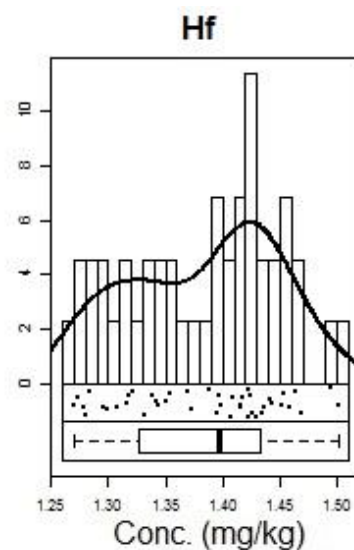
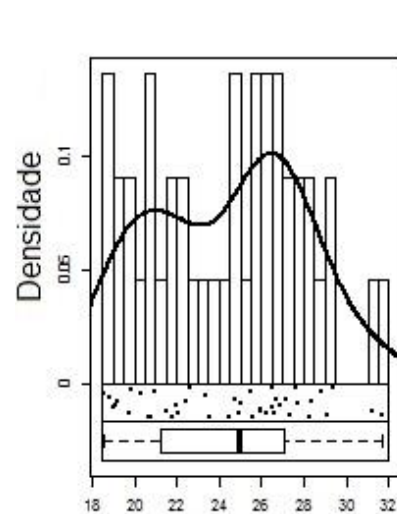
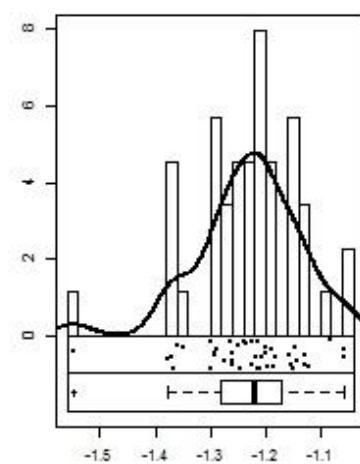
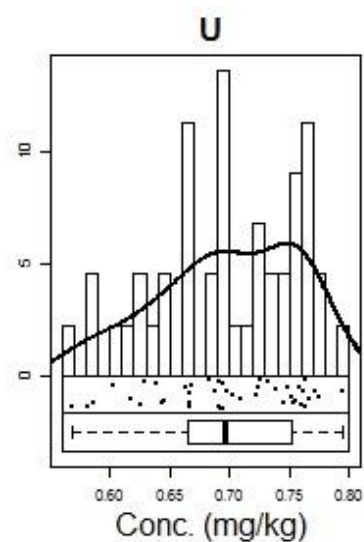
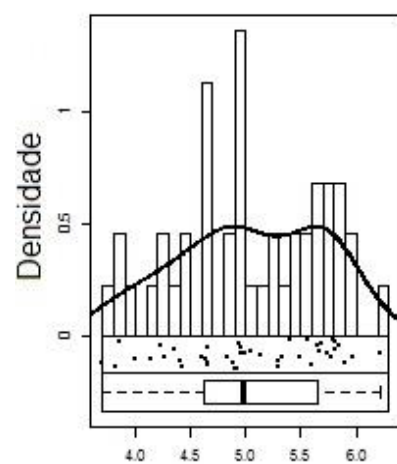
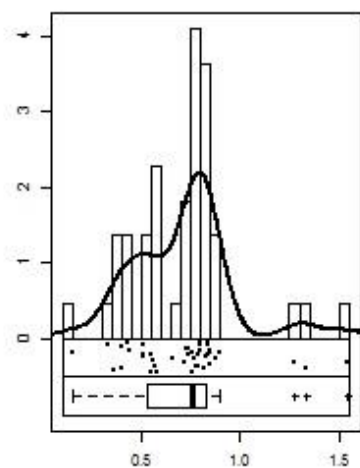
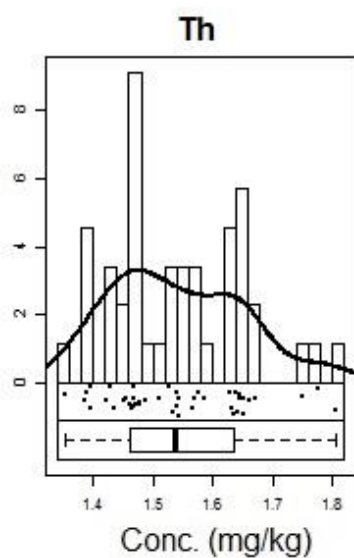
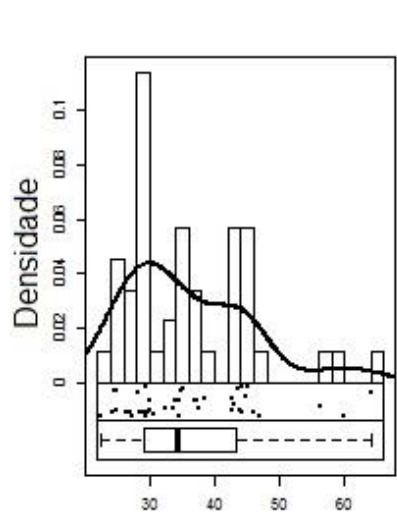
				Parâmetros	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
				Unidades	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
				Limite de detecção (DL)	0,1	0,1	0,02	0,2	0,5	0,02	0,05	0,01	0,05	0,02	0,03	0,01	0,05	0,01
				Parâmetros	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
				Unidades	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
				Limite de detecção (DL)	0,1	0,1	0,02	0,2	0,5	0,02	0,05	0,01	0,05	0,02	0,03	0,01	0,05	0,01
Amostras ID	Material da bacia	Longitude WGS1984	Latitude WGS1984	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
LB1-01	LB1	−49,8892790359	−6,3074289914	11,4	16,9	2,04	7,2	1,5	0,36	1,53	0,26	1,6	0,4	1,49	0,22	2,13	0,35	
LB1-02		−49,8893210292	−6,3079989608	26	37,7	4,83	15,9	2,23	0,59	1,66	0,29	1,41	0,35	1,08	0,19	1,46	0,25	
LB1-03		−49,8892709892	−6,3079660200	10,6	17,1	2,08	7,4	1,47	0,42	1,73	0,27	1,79	0,45	1,54	0,24	2,16	0,37	
LB2-01	LB2	−49,9051859602	−6,3139259722	9,5	15,4	1,84	6,5	1,17	0,34	1,41	0,25	1,54	0,38	1,3	0,19	1,74	0,27	
LB2-02		−49,9049049988	−6,3138780277	29,3	41,4	5,39	18,7	2,85	0,69	2,22	0,34	1,91	0,44	1,42	0,25	2,21	0,36	
LB3-01	LB3	−49,9090810306	−6,3147469796	31,3	42,2	5,66	18	3,13	0,58	2,1	0,29	1,66	0,4	1,43	0,21	1,84	0,32	
LB3-02		−49,9092070106	−6,3142210152	22	26,1	3,38	11,2	1,78	0,58	1,66	0,27	1,49	0,32	0,98	0,11	1,36	0,24	
LB3-03		−49,9096909817	−6,3140999805	22,7	21,7	3,06	9,4	1,66	0,62	1,74	0,31	1,96	0,43	1,49	0,2	1,52	0,25	
LB3-04		−49,9103890266	−6,3141500205	29,6	43,7	5,35	18,4	3,01	0,76	2,64	0,38	2,51	0,48	1,86	0,28	2,48	0,41	
LB3-05		−49,9105020147	−6,3145660143	31,1	44	5,68	19,6	3,01	0,77	2,51	0,41	2,4	0,46	1,68	0,23	2,19	0,34	
LB3-06		−49,9099639803	−6,3150169607	40	57,9	7,72	25,5	4,43	0,99	3,48	0,49	2,83	0,58	1,93	0,25	2,59	0,38	
LB4-01	LB4	−49,9345569871	−6,3281519897	43,3	63,9	8,34	28,4	4,96	1,07	3,77	0,6	2,95	0,65	2,12	0,31	2,62	0,42	
LB4-02		−49,9337400030	−6,3282109983	42,5	63	7,92	27,4	4,59	1,01	3,3	0,48	2,89	0,63	1,86	0,31	2,78	0,42	
LB4-03		−49,9329909962	−6,3289669622	42,7	62,6	7,99	26,5	4,41	0,9	3,41	0,57	3,07	0,61	1,96	0,24	2,42	0,38	
LB4-04		−49,9337379914	−6,3294230215															
Amostras ID	Material da bacia	Longitude WGS1984	Latitude WGS1984	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
LB1-02	LB1 SOIL	−49,8893210292	−6,3079989608	11,8	24,4	2,76	10,4	1,92	0,56	2,58	0,54	3,52	0,78	2,92	0,43	3,51	0,61	
LB3-01	LB3 SOIL	−49,9090810306	−6,3147469796	35,4	56,6	6,83	26,1	4,35	1,08	3,87	0,73	4,87	1,05	3,77	0,6	4,59	0,8	
Material de referência ferruginosos																		
AM-Ti1-01	Lagoa três irmãs	Fe-Rock		6,6	15,9	1,21	3,8	0,58	0,13	0,47	0,04	0,5	0,1	0,4	0,05	0,32	0,06	
AM-Ti1-03		Fe-Rock		6,4	8,7	1,1	3,6	0,63	0,16	0,66	0,07	0,4	0,07	0,3	0,03	0,14	0,04	
AM-Ti1-05		Fe-Rock		9,2	17	1,88	6	1,03	0,23	0,68	0,09	0,61	0,15	0,51	0,08	0,53	0,11	
AM-Ti1-07		Fe-Rock		15,5	29	2,1	5,4	0,71	0,17	0,48	0,05	0,45	0,07	0,36	0,06	0,41	0,08	
Soil_VL1	Lago Violão	Fe-Soil		5,1	8,7	1,3	4,1	0,46	0,21	0,5	0,12	0,43	0,07	0,42	0,06	0,48	0,1	
Soil_VL2		Fe-Soil		8,2	17,2	1,7	6,5	0,66	0,3	0,7	0,23	0,92	0,32	0,8	0,12	0,9	0,3	
Soil_VL3		Fe-Soil		4,2	13,2	0,9	5,2	0,5	0,25	0,9	0,11	0,6	0,2	0,64	0,08	0,62	0,18	
Soil_VL4		Fe-Soil		6,3	11,5	1,25	7,1	0,7	0,5	0,8	0,12	0,8	0,18	0,8	0,11	0,77	0,22	
Material de referência primários																		
		BIF		1,9	1,5	0,16	0,8	0,09	0,1	0,06	0,01	0,13	0,02	0,06	0,03	0,07	0,02	
		UCC		30	64	7,1	26	4,5	0,88	3,5	0,64	3,5	0,8	2,3	0,33	2,2	0,32	
		Condrite		0,33	0,88	0,122	0,6	0,18	0,069	0,26	0,047	0,322	0,071	0,21	0,03	0,209	0,034	

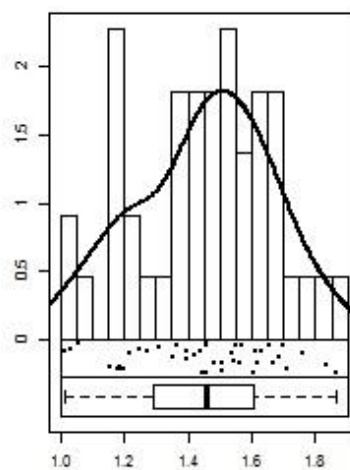
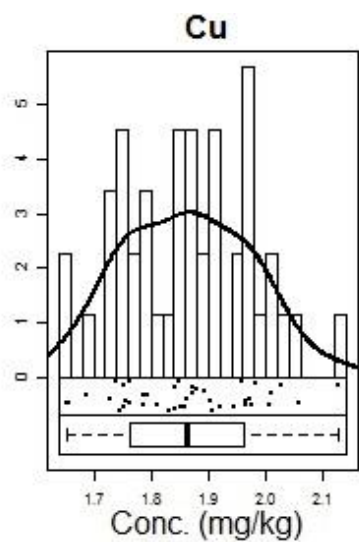
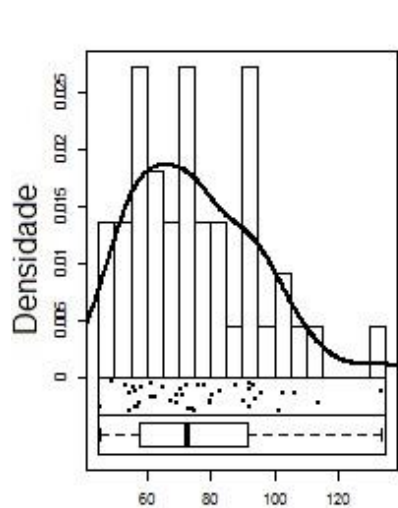
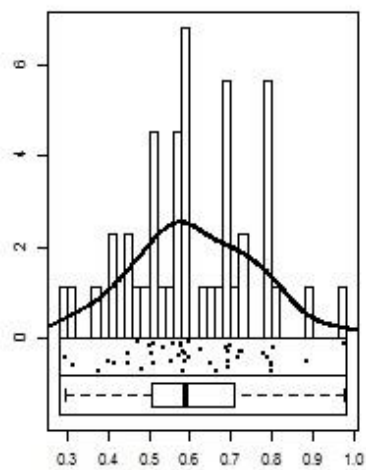
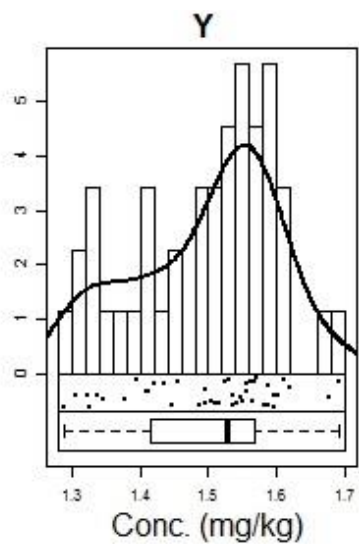
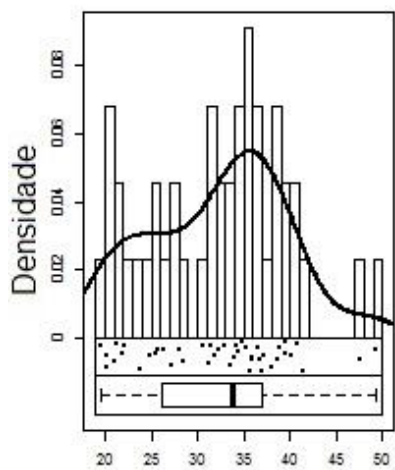
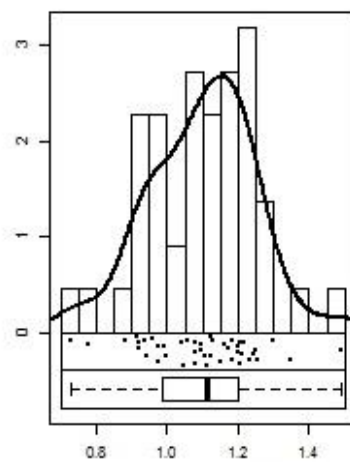
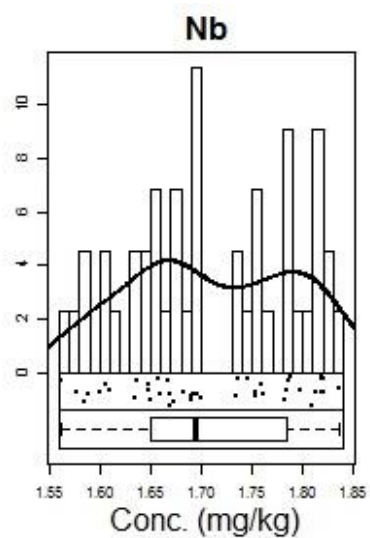
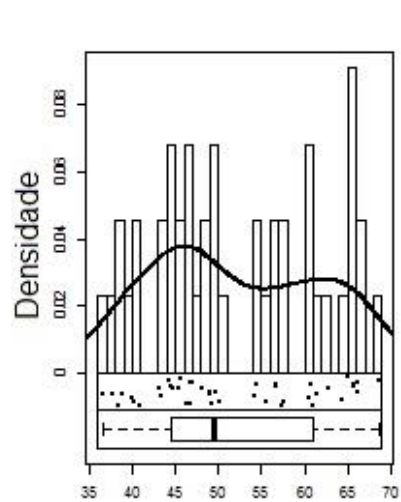
APÊNDICE B – Edaplot dos elementos:

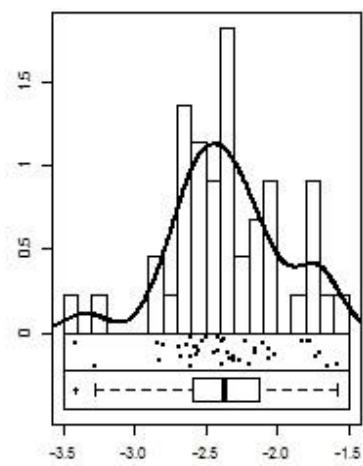
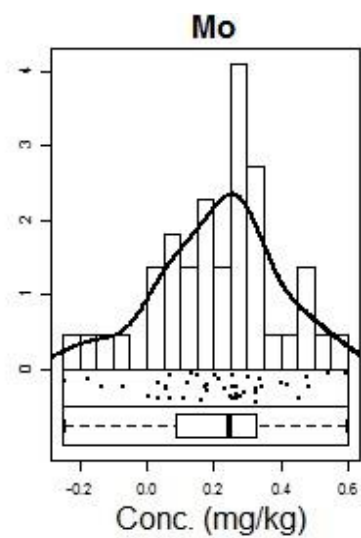
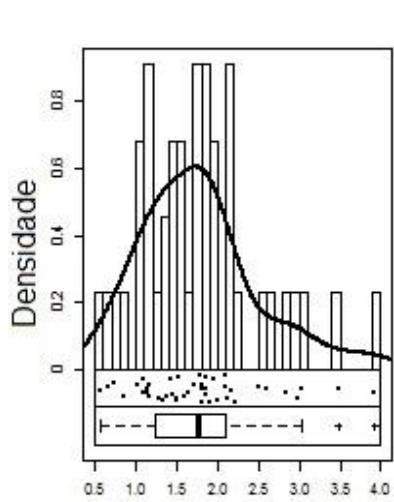
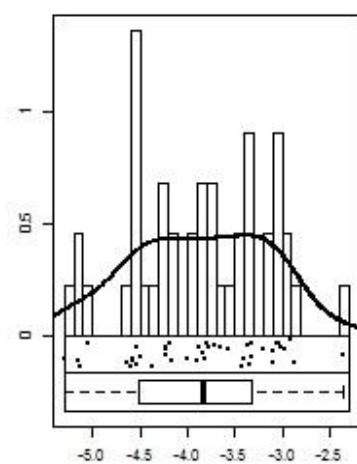
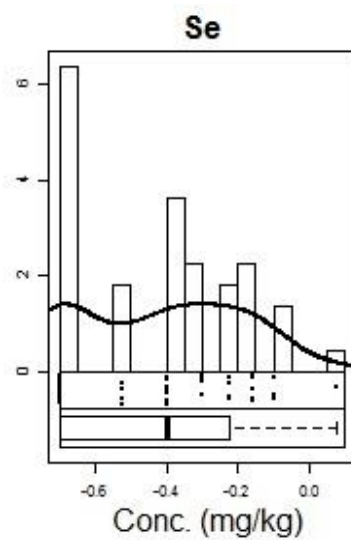
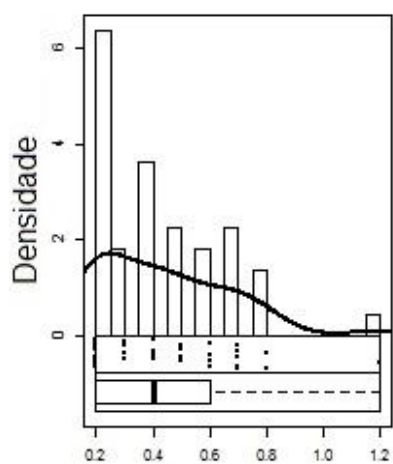
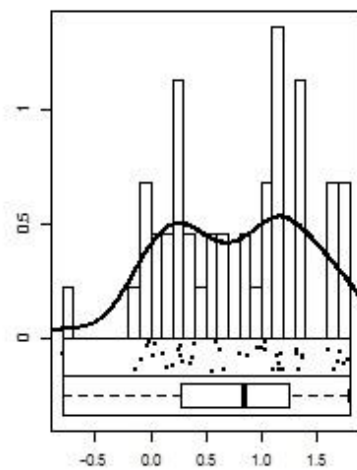
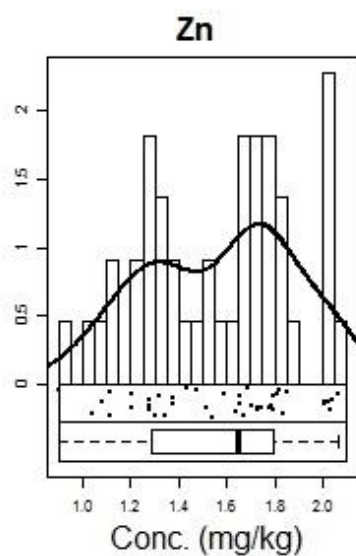
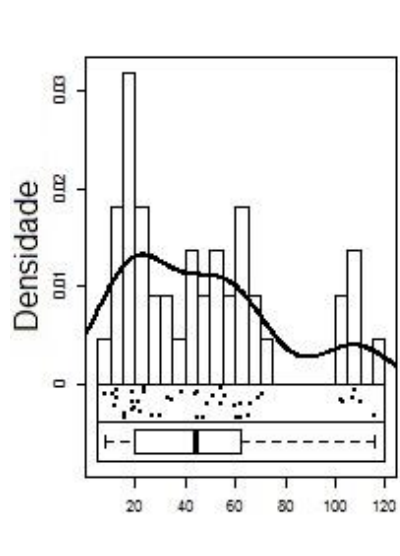
(TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TOC, Rb, Sc, Th, U, Hf, Nb, Y, Cu, Zn, Se, Mo, Hg, V, Cr, Ga, Pr, Nd, Sm,
Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb, Lu)

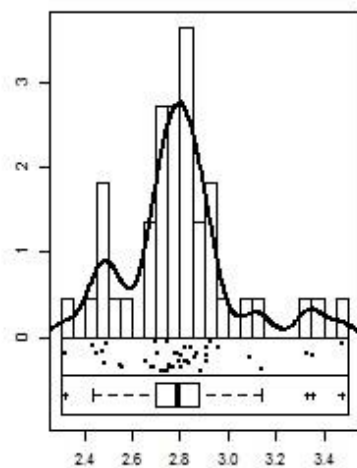
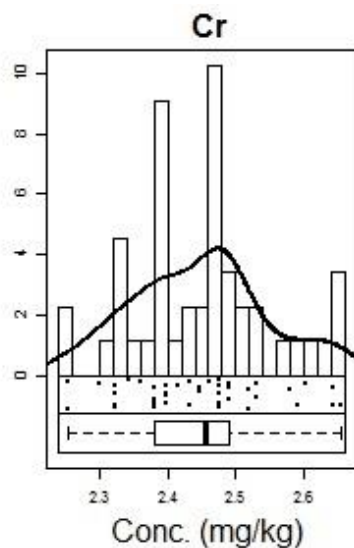
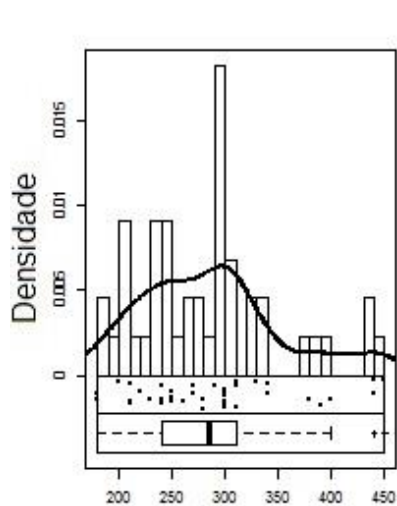
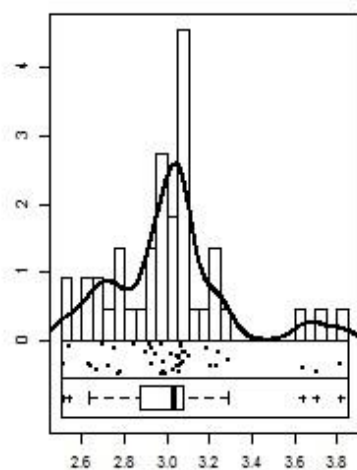
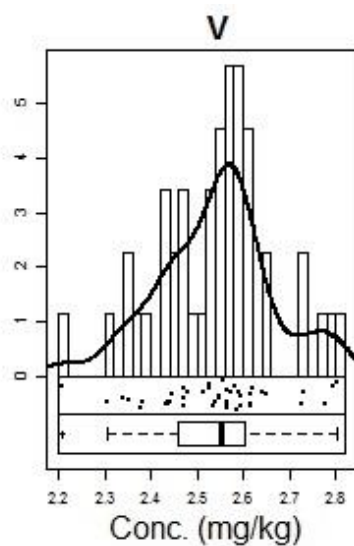
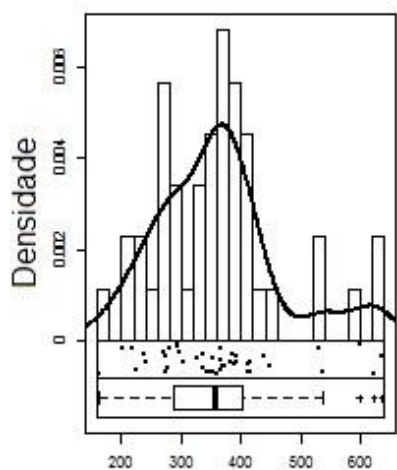
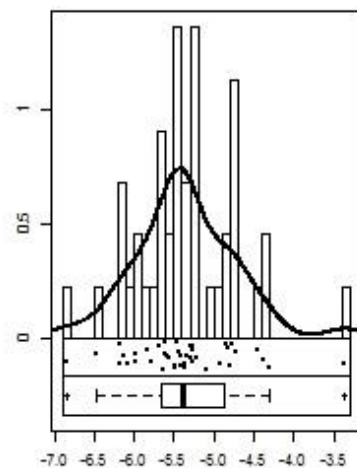
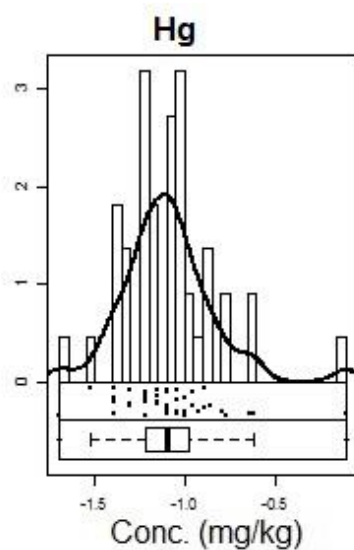
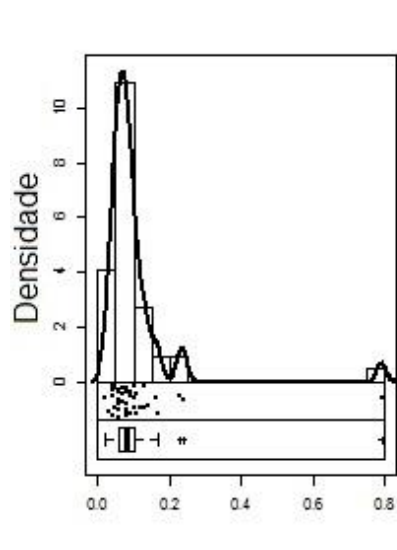


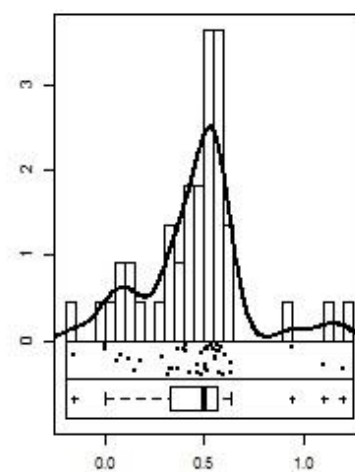
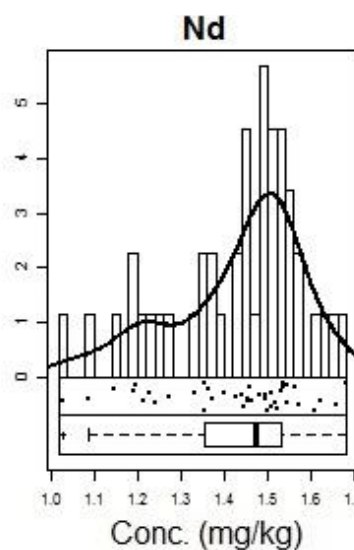
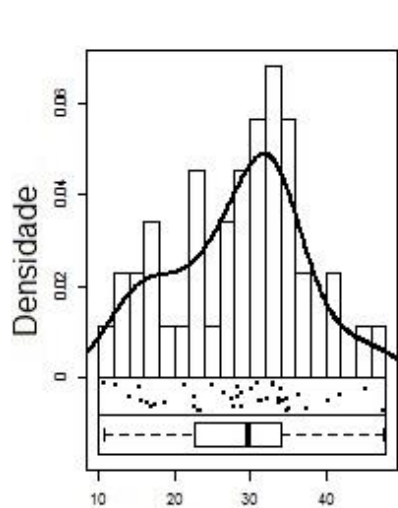
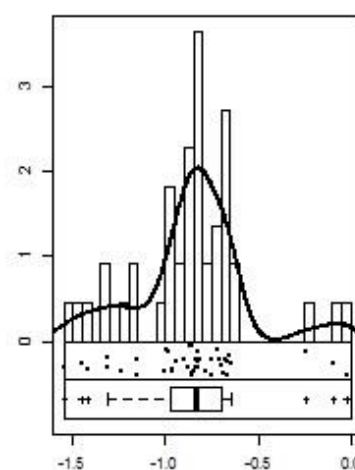
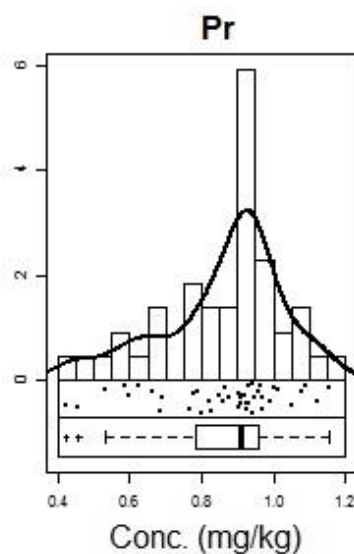
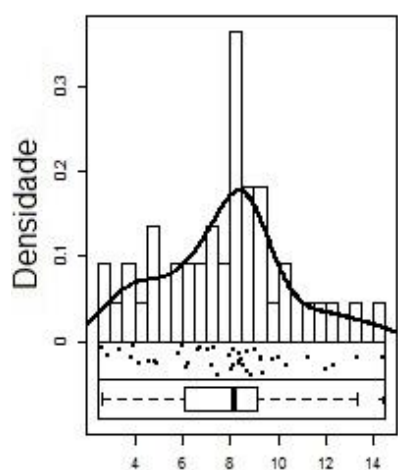
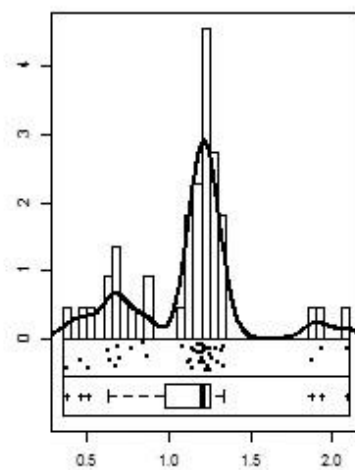
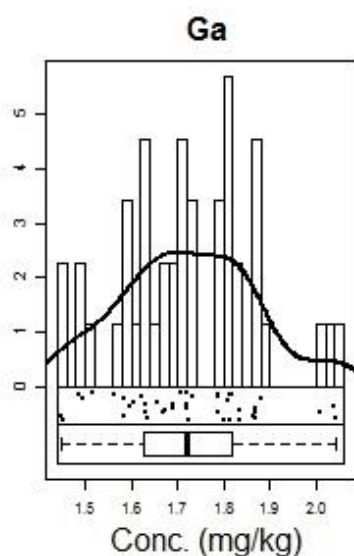
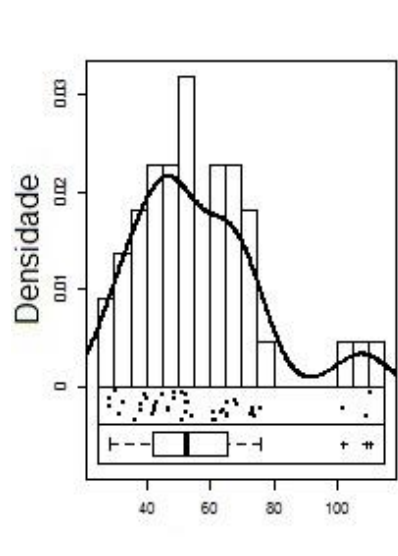


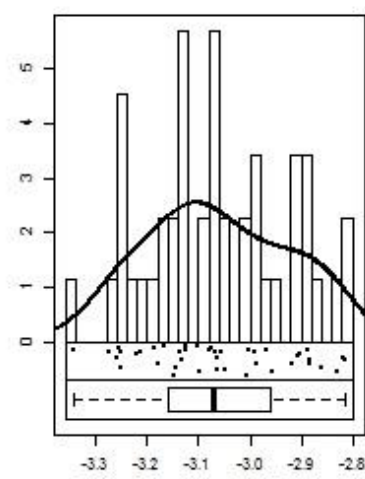
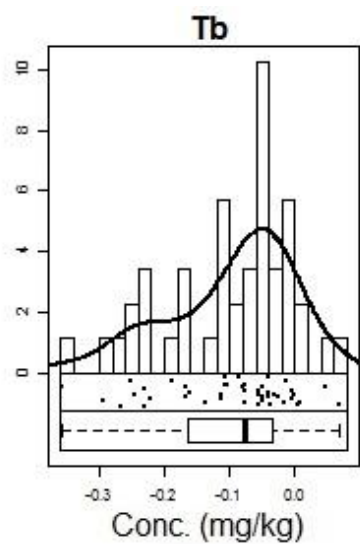
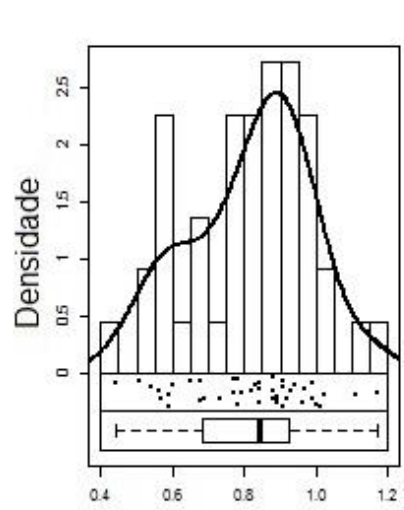
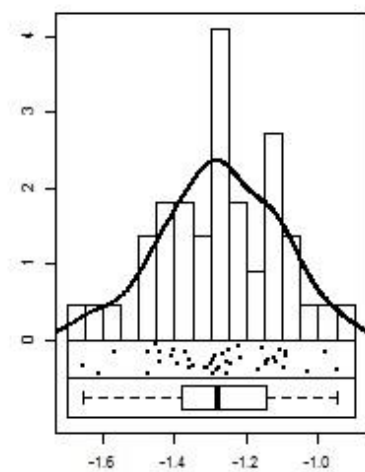
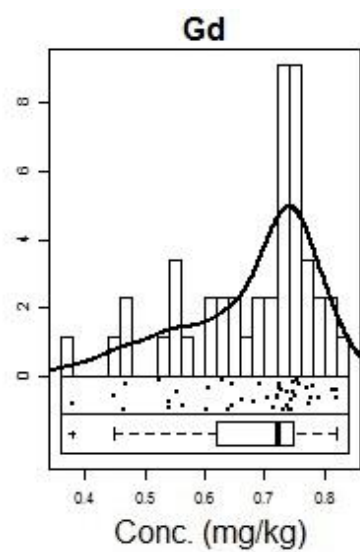
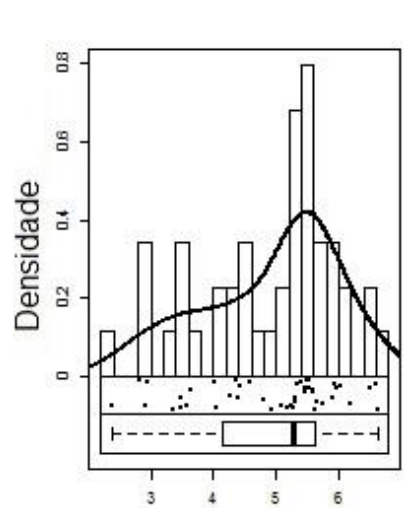
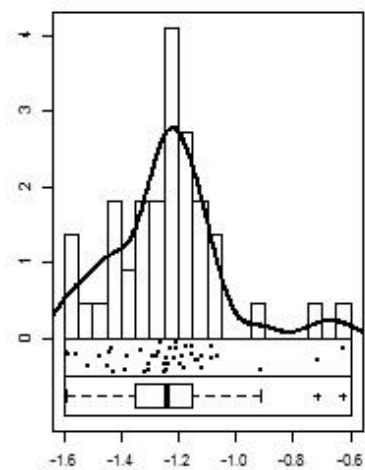
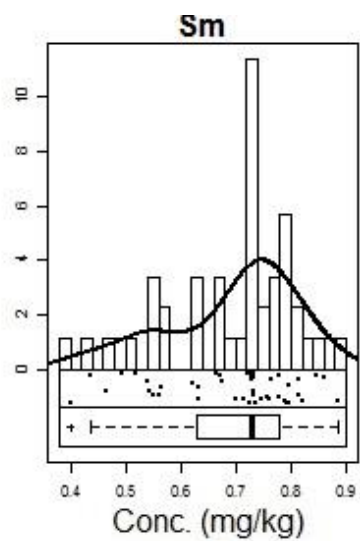
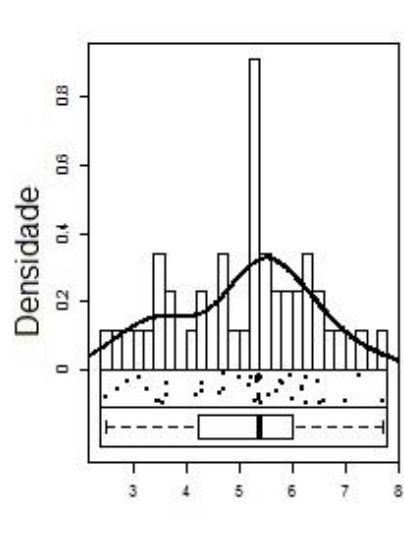


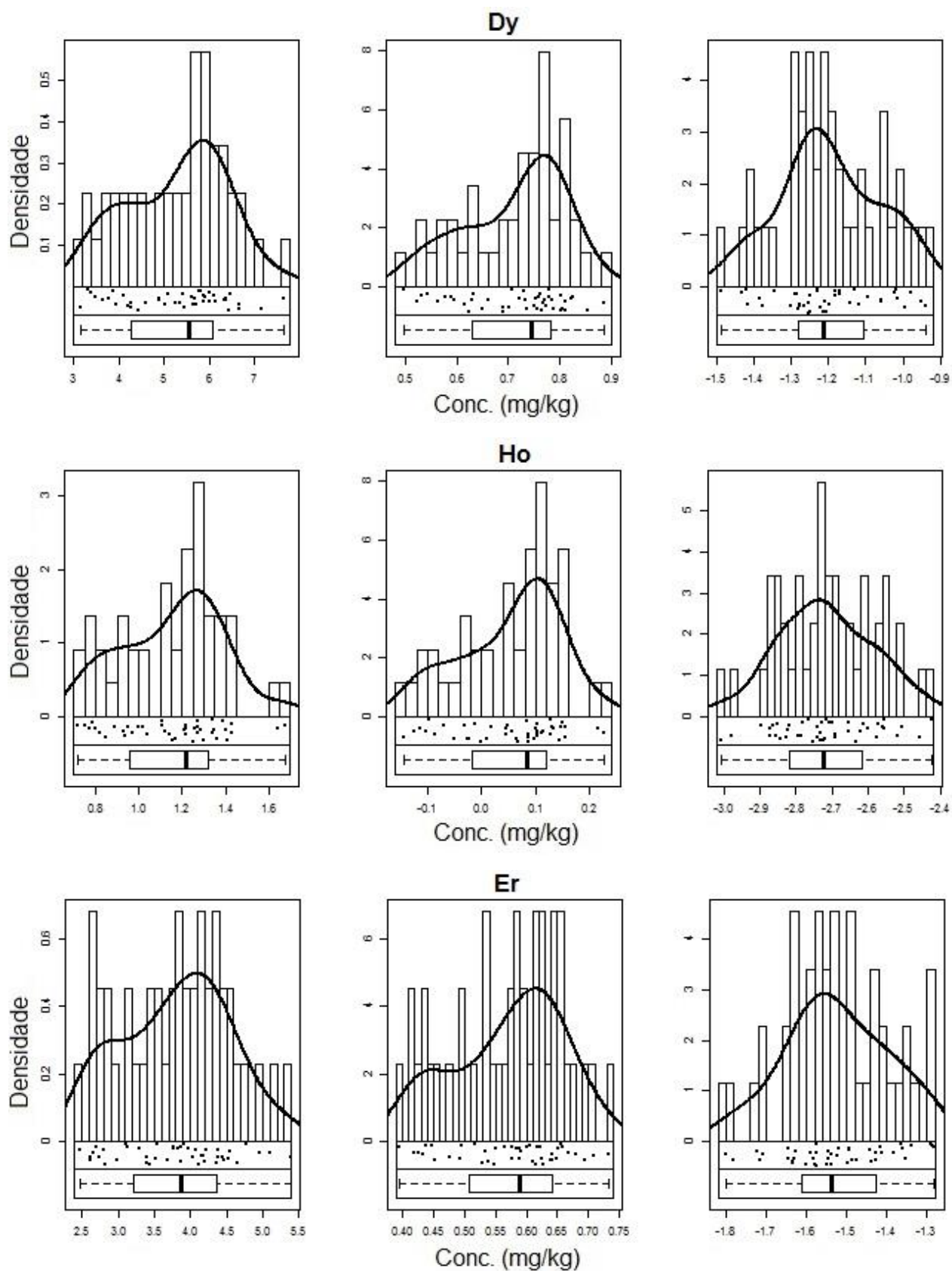


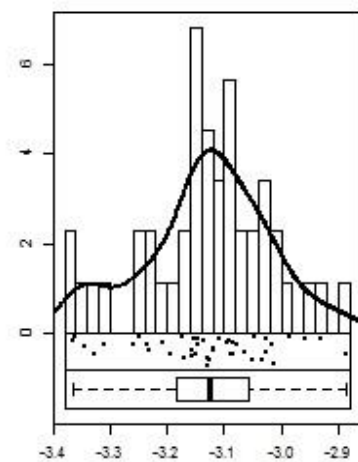
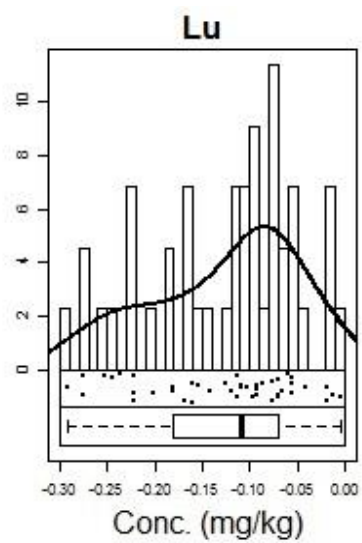
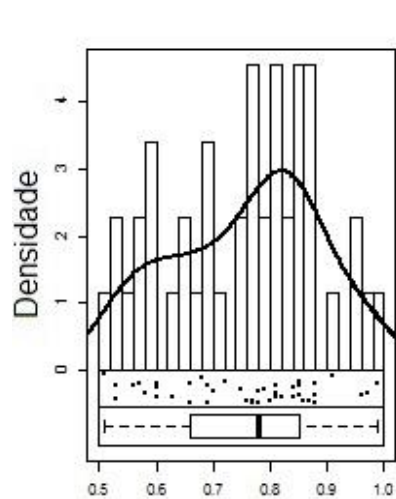
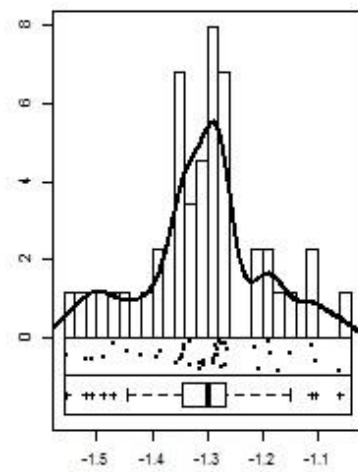
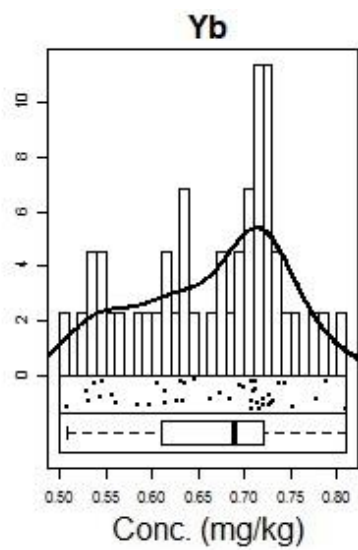
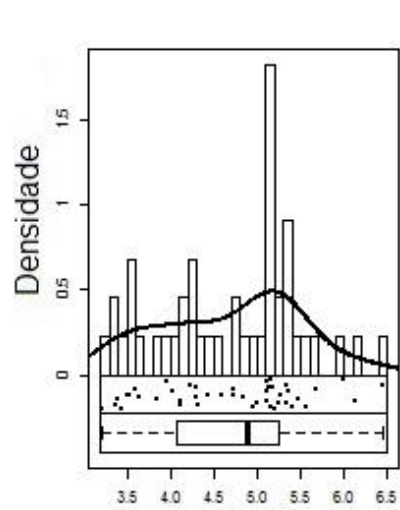












APÊNDICE C – BOXPLOT dos elementos:
(Ba, Pb, Th, U, Nb, Y, Cu, Zn, As, Se, Mo, Hg, V, Cr, Ga, Co, Ni)

