

**Mestrado Profissional**  
**Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais**

**DANIELLE DE LIMA FARIAS**

**GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS DE CORRENTE E ESTIMATIVA DE  
*BACKGROUND* GEOQUÍMICO DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE  
TÓXICOS NA BACIA DO RIO PARAUAPEBAS – PARÁ**

**Belém / PA**

**2020**

**DANIELLE DE LIMA FARIAS**

**GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS DE CORRENTE E ESTIMATIVA DE  
*BACKGROUND* GEOQUÍMICO DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE  
TÓXICOS NA BACIA DO RIO PARAUAPEBAS – PARÁ**

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 DS).

Orientador: Prafulla Kumar Sahoo, Dr  
Coorientador: Roberto Dall’Agnol, Dr

**Belém / PA**

**2020**

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F224 Farias, Danielle de Lima  
Geoquímica de sedimentos de correntes e estimativa de *Background*  
geoquímico de elementos potencialmente tóxicos na Bacia do Rio  
Parauapebas - Pará. / Danielle de Lima Farias. – Belém, PA, 2020.  
18 f.: il.

Dissertação (mestrado) -- Instituto Tecnológico Vale, 2015.

Orientador: Prafulla Kumar Sahoo, Dr.

Coorientador: Roberto Dall'Agnol, Dr.

1. Geoquímica - *Background*.
2. Sedimentos de corrente - Rio Parauapebas (PA).
3. Rio Parauapebas - Carajás, Serra dos (PA). I. Título.

CDD.23 ed. 579.3098115

Bibliotecário(a) responsável: Nisa Gonçalves. CRB: 2 - 525

**DANIELLE DE LIMA FARIAS**

**GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS DE CORRENTE E ESTIMATIVA DE  
*BACKGROUND* GEOQUÍMICO DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE  
TÓXICOS NA BACIA DO RIO PARAUPEBAS – PARÁ**

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 DS).

Data da aprovação:

Banca examinadora:

---

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

---

Dr. José Tasso Felix Guimarães  
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

---

Dr. Rômulo Simões Angélica  
Membro externo – Universidade Federal do Pará (UFPA)

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Ivan e Rita.

Aos meus irmãos, Djavan, Dinilson, Dirceu e Daniel.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, razão da minha existência, que em sua infinita bondade permitiu que eu chegasse até aqui.

Aos meus queridos pais, Ivan e Rita, por todo amor e cuidado, por sempre apoiarem minhas escolhas, ainda que não tão bem compreendidas. Espero um dia poder chegar perto de retribuir todo o esforço que vocês fizeram e continuam fazendo por mim. Eu amo vocês.

Aos meus amados irmãos, Djavan, Dinilson, Dirceu e Daniel, meus maiores incentivadores, que por incontáveis vezes, com todo amor e carinho do mundo me apoiaram com palavras de ânimo, simples caronas e, até mesmo, aquele dinheiro para as passagens. Não foi fácil, mas eu consegui, e devo isso a vocês.

Ao meu orientador, Dr. Prafulla Kumar Sahoo, pela oportunidade, por ter acreditado em mim desde o começo, por me indicar os melhores caminhos e com toda a sua competência me auxiliar de maneira tão singular, ainda que passando por momentos difíceis. Palavras não são suficientes para expressar a minha gratidão.

Ao meu co-orientador, Dr. Roberto Dall'Agnol, pelos preciosos momentos de orientação sempre envoltos por sua leveza, sua sabedoria tão característica. Grata pela oportunidade de estar sob sua orientação, um profissional que seguidas vezes me estimulou e fez com que eu percebesse que embora houvesse dificuldades, sim, eu seria capaz superá-las.

Ao pesquisador Clóvis Maurity, sempre solícito, por ter contribuído com essa pesquisa, especialmente na viagem a Carajás, compartilhando um pouco de sua vasta experiência.

Aos colegas Leandro Quaresma, Jair Júnior, Gessica Silva, Gabriel Salomão e Gabriel Martins, por terem se disponibilizado a estar comigo sanando dúvidas e trocando ideias.

Aos demais membros do GGARH, que de alguma forma contribuíram com esta pesquisa.

Aos pesquisadores, Leonardo Trevelin e Wilson Nascimento, profissionais admiráveis, que conduziram as disciplinas de modo ímpar, permitindo que eu repensasse o real conceito de docência.

Aos membros da biblioteca, Nisa Gonçalves e Eddie Saraiva, por serem atenciosos e impecáveis, sempre concedendo todo o suporte necessário.

Aos amigos da biblioteca, minha xará Danieli, Lana beira-mar, menino Ney, Felipe *oldspice*, Paulo chefe e Mateus (quando dava o ar da graça). Vocês tornaram os meus dias mais alegres.

Aos companheiros de mestrado, Amanda Campos, Juan Lacarra, Márcia Ribeiro, Duane Azevedo, Mariana Figueiredo, Juliano Cunha, Amanda Gandra e Érika Sousa, pelo apoio durante esta jornada, principalmente, no período de execução das disciplinas.

Aos amigos, Juliane Cavalcante, Lúcia Merencio, Nátaly Karyme, Keyvilla Aguiar, Mateus Morais, Thyarllie Cossoutaza, Tamires Mayane, Cristina Campos, Daniela Farias, Patrícia Cavalcante, Kamila Nascimento e Janayna, por me acompanharem de perto, desde os momentos mais difíceis, sempre torcendo pelo meu sucesso. Gratidão.

A todos aqueles que trabalham no Instituto Tecnológico Vale, que possibilitaram um ambiente propício para a realização desta pesquisa.

Por fim, mais uma vez, muito obrigada a todos.

*Quanto mais me aprofundo na  
Ciência mais me aproximo de Deus.*

*Se soubéssemos o que era  
aquilo que estávamos fazendo, não  
seria chamado de pesquisa.*

Albert Einstein



## RESUMO

A Bacia do Rio Parauapebas (BRP) compõe o conjunto de sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI), que ao longo dos anos tem exibido expressiva alteração nas formas de uso e ocupação do solo, o que tem tornado evidente a necessidade de estudos locais. A BRP foi o objeto de estudo da presente pesquisa, a qual teve como objetivo avaliar o comportamento geoquímico dos sedimentos ativos de corrente e estimar faixas de *background* para Al, Fe e elementos potencialmente tóxicos. Para este projeto foram coletadas 190 amostras de sedimentos de corrente ao longo do ano de 2017. Após a amostragem, os sedimentos foram submetidos a um pré-tratamento que incluía secagem, desagregação e peneiramento. A fração menor que 80 *mesh* (0,177mm) de cada amostra foi encaminhada para análise, em laboratório certificado, que por meio de Espectrometria de Massa por Plasma Acoplado Indutivamente (do inglês, *ICP-MS*) permitiu identificar e quantificar a concentração de 51 elementos (Al, Ag, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Ca, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, La, Li, Mn, Mg, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Si, Sn, Sr, Ta, Ti, Te, Th, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr). Aqueles que apresentaram até 30% das amostras com teores abaixo do limite de detecção foram submetidos ao método de substituição simples. A análise descritiva apontou que os dados não possuem uma distribuição normal, em razão disso, foram submetidos a duas transformações ( $\log_{10}$  e *clr*) para a realização da análise multivariada, a qual incluiu correlação de *Spearman*, agrupamento hierárquico e análise de componentes principais. Os mapas geoquímicos de Al, Fe e elementos potencialmente tóxicos foram construídos com base na técnica de interpolação *IDW* utilizando como referência o *datum* WGS84, através do *software* QGIS versão 2.18. Para o cálculo de *background* foram empregadas as técnicas de representação *boxplot*, mediana  $\pm 2$  \* desvio absoluto da mediana, iterativa  $2\sigma$ , função de distribuição calculada e percentis (75, 90, 95 e 98). Todos os procedimentos estatísticos foram conduzidos com o auxílio dos *softwares* Excel e R. Os únicos elementos que mostraram concentrações acima do teor considerado prejudicial, disposto no CONAMA n° 454, foram cobre, cromo e níquel. As técnicas iterativa  $2\sigma$ , percentil 75 e função distribuição calculada mostraram os intervalos mais adequados para o *background* natural, enquanto que para o *background* ambiental os valores entregues pela *TIF* e percentil 98 foram os mais realistas. A presente pesquisa indicou que embora haja um histórico de intensa alteração no uso e cobertura do solo da bacia, fontes geogênicas são as principais contribuintes na assinatura geoquímica dos sedimentos e, além disso, é necessário que as peculiaridades da área de estudo sejam cautelosamente observadas, principalmente quando trata-se da definição de limiares legais.

**Palavras-chave:** *Background* geoquímico. Sedimentos de corrente. Rio Parauapebas. Bacia do rio Itacaiúnas. Carajás (PA).

## ABSTRACT

The Parauapebas River Basin (BRP) is part of the set of sub-basins of the Itacaiúnas River Basin (BHRI), which over the years has exhibited a significant change in the forms of land use and occupation, which has made evident the need local studies. The BRP was the study object of the present research, which aimed to assess the geochemical behavior of active stream sediments and to estimate background ranges for Al, Fe and potentially toxic elements. For this project, 190 samples of stream sediments were collected throughout 2017. Then sampling, the sediments were subjected to a pre-treatment that includes drying, disintegration and sifting. The fraction less than 80 mesh (0.177 mm) of each sample was sent for analysis, in a certified laboratory, which, using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), allowed to identify and quantify the concentration of 51 elements (Al, Ag, Cr, Au, B, Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Ca, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, Em, La, Li, Mn, Mg, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Si, Sn, Sr, Ta, Ti, Te, Th, Tl, U, V, W, Y, Zn and Zr). Those that presented up to 30% of the samples with levels below the detection limit were submitted to the simple substitution method. The descriptive analysis pointed out that the data do not have a normal distribution, therefore, they were subjected to two transformations ( $\log_{10}$  and  $\ln$ ) to perform the multivariate analysis, which included Spearman correlation, hierarchical grouping and principal component analysis. The geochemical maps of Al, Fe and potentially toxic elements were built based on the IDW interpolation technique using the datum WGS84 as a reference, using the QGIS software version 2.18. For the background calculation, the boxplot representation techniques were used, median  $\pm 2$  \* absolute deviation from the median, iterative  $2\sigma$ , calculated distribution function and percentiles (75, 90, 95 and 98). All statistical procedures were conducted using the Excel and R software. The only elements that showed concentrations above the content considered harmful, provided for in CONAMA No. 454, were copper, chromium and nickel. The  $2\sigma$  iterative, 75th percentile and calculated distribution function techniques showed the most suitable intervals for the natural background, while for the environmental background the values delivered by MAD was the most realistic. The present research indicated that although there is a history of intense alteration in the use and coverage of the basin's soil, geogenic sources are the main contributors to the geochemical signature of the sediments and, in addition, it is necessary that the peculiarities of the study area be carefully observed, especially when it comes to setting legal thresholds.

**Keywords:** Geochemical background. Stream sediments. Parauapebas River. Itacaiúnas River Basin. Carajás (PA).

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	13
2.1	GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS .....	13
2.2	BACKGROUND GEOQUÍMICO .....	15
2.2.1	Conceitos .....	15
2.2.2	Estimativa dos valores de background.....	16
2.2.2.1	Técnicas estatísticas para determinação de background .....	16
2.2.2.1.1	<i>Representação boxplot (Turkey's Inner Fence – TIF).....</i>	16
2.2.2.1.2	<i>Mediana <math>\pm 2</math> * desvio absoluto da mediana .....</i>	16
2.2.2.1.3	<i>Iterativa <math>2\sigma</math> .....</i>	17
2.2.2.1.4	<i>Função distribuição calculada .....</i>	17
3	CONCLUSÃO .....	17
	REFERÊNCIAS .....	18

## 1 INTRODUÇÃO

Estudos geoquímicos em sedimentos ativos de corrente vêm sendo utilizados, historicamente, na identificação de áreas com concentrações anômalas de elementos que possuem relevante interesse para a exploração mineral (YOUSEFI; CARRANZA; KAMKAR-ROUHANI, 2013). Contudo, sob o ponto de vista ambiental, as pesquisas geoquímicas também têm assumido grande importância, especialmente, quanto à definição de faixas de *background*, que dentre as mais diversas possibilidades, podem auxiliar na avaliação de riscos potenciais de contaminação, assim como na identificação de teores naturais de uma área (RODRIGUES; NALINI JUNIOR, 2009).

O *background* geoquímico é conceituado como uma medida relativa que diferencia as concentrações que ocorrem naturalmente daquelas com contribuição antropogênica (MATSCHULLAT; OTTENSTEIN; REIMANN, 2000) e, em face as mais diversas formas de mudança no uso e cobertura do solo registradas na Amazônia desde a década de 70 (LAURANCE, 1998; LAURANCE; GOOSEM; LAURANCE, 2009), tem sido empregado como uma indispensável ferramenta na gestão ambiental.

Um dos maiores e mais importantes distritos minerais do mundo, a Província Mineral de Carajás, está estabelecida na Amazônia e hospeda jazidas de ferro, cobre, manganês, níquel, ouro e estanho (LAFON; MACAMBIRA, 1992; ZUCCHETTI, 2007; SHIMIZU, 2012). Ainda neste cenário, cabe destacar a Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas, que abriga os principais projetos de mineração da Vale na região Norte e, tem apontado expressivas mudanças em razão da acelerada expansão na ocupação populacional e da atividade econômica nas últimas décadas (SOUZA-FILHO et al., 2016).

Dada a importância econômica e social da BHRI, o Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável está desenvolvendo o projeto de pesquisa intitulado “*Background* Geoquímico da Bacia do Rio Itacaiúnas”, que tem por objetivo elaborar mapas geoquímicos e estabelecer valores de *background* para os elementos químicos de maior interesse para a mineração e com maior potencial para causar danos ambientais. Futuramente, este conjunto de informações servirá de base para

a avaliação de possíveis impactos antropogênicos, e também norteará a tomada de decisões a respeito de ações mitigadoras a serem desenvolvidas na área.

Este estudo busca responder as seguintes questões:

- Quais as características geoquímicas dos sedimentos de corrente na área de estudo?
- Há anomalias geoquímicas nesta área? De que elementos? Qual é origem dessas anomalias?
- Qual é o *background* geoquímico dos elementos potencialmente tóxicos em sedimentos de corrente na região?
- Como os elementos estão distribuídos ao longo desta bacia? Quais fatores controlam esta distribuição?

A presente pesquisa integra o projeto mencionado e visa compreender o comportamento geoquímico dos sedimentos ativos de corrente, bem como estabelecer valores de *background* geoquímico para Al, Fe e elementos potencialmente tóxicos (As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, V e Zn) na Bacia do Rio Parauapebas, situada na porção Centro-Sul da BHRI. A Produção Técnica no Apêndice traz mais detalhes sobre esta pesquisa.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS**

Classificado como um material sedimentar de constituição variada, o sedimento ativo de corrente é um produto composto resultante do intemperismo e erosão das unidades litológicas situadas a montante da área sob observação (CPRM, 2003; SHAHRESTANI; MOKHTARI; FATEHI, 2019) e, em razão de suas condições de formação, tem sido utilizado como referência para realizar a caracterização geoquímica de seu ambiente de ocorrência, fornecendo subsídios para mapeamento geoquímico, pesquisas voltadas para a prospecção mineral e, inclusive, estudos metalogenéticos de detalhe (RANASINGHE et al., 2008; ABREU et al., 2015).

Os sedimentos permanecem em constante contato com a água e ambos constituem um sistema aberto, sujeito à alteração por poluentes de qualquer natureza. Isto pode ter implicações tanto positivas, do ponto de vista da exploração

mineral, quanto negativas, se considerado o lançamento de grandes volumes de contaminantes no ambiente através de atividades antropogênicas, que se constituem em fontes potenciais de elementos-traço para água e sedimentos, tais como a queima de carvão, exploração de depósitos minerais e geração de efluentes urbanos (KABATA-PENDIAS; MUKHERJEE, 2007).

O transporte de sedimentos está fortemente associado a fenômenos hidrológicos e geomorfológicos, os quais são reflexo dos processos que ocorrem à montante da região observada (FORSTNER, 1989; MOREIRA; BOAVENTURA, 2003). Cerca de 99% dos contaminantes estão armazenados em sedimentos e a sua mobilidade é comumente determinada pelo pH, condições redox e presença no meio de agentes complexantes, como a matéria orgânica dissolvida e ânions inorgânicos (SALOMONS, 1998).

A legislação brasileira que trata de qualidade de sedimentos é quase inexistente e, nesse contexto, destaca-se a resolução nº 454 (CONAMA, 2012), a qual estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento de material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional, e define valores guia para arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, níquel e zinco, com base em dois níveis: o primeiro é o teor limite abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota; o segundo é o teor limite acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota (Tabela 1).

**Tabela 1** – Níveis de classificação do material a ser dragado (em unidade de material seco)

Metais e semi-metais (mg/kg)	Água doce	
	Nível 1	Nível 2
Arsênio	5,9	17
Cádmio	0,6	3,5
Chumbo	35	91,3
Cobre	35,7	197
Cromo	37,3	90
Mercúrio	0,17	0,486

---

Níquel	18	35,9
Zinco	123	315

---

**Fonte:** CONAMA, 2012 (modificado).

Todos os valores apresentados na tabela acima foram extraídos do banco de dados do Conselho Canadense de Ministros do Meio Ambiente (do inglês, *Canadian Council of Ministers of the Environment - CCME*), logo, designados para ambientes com características distintas da realidade brasileira e, em razão disso, quando considerados como limites legais para o cenário brasileiro, precisam ponderar os contrastes territoriais.

Nesse contexto, torna-se evidente que a distribuição de elementos químicos em sedimentos está associada não somente com as suas respectivas concentrações, mas de igual modo com as interações físicas e químicas no meio em que se encontram, pois estão constantemente submetidos a influências naturais e antrópicas (CARMO; BOAVENTURA; OLIVEIRA, 2005).

## 2.2 BACKGROUND GEOQUÍMICO

### 2.2.1 Conceitos

A terminologia *background* geoquímico foi utilizada pela primeira vez em meados de 1960 em pesquisas de prospecção mineral e, consistia unicamente na identificação de concentrações normais e anomalias, ambas naturais, indicativas de possíveis depósitos (HAWKES; WEBB, 1962; REIMANN; GARRETT, 2005; KICIŃSKA; TUREK, 2017). Desde então, tem sido crescente a discussão a respeito de seu conceito por especialistas.

Diferentemente, nas ciências ambientais, o uso desse termo reside em identificar e distinguir as fontes de contribuição, sejam elas naturais ou antropogênicas (GALUSZKA; MIGASZEWSKI, 2011). Outra designação assinala o *background* como um intervalo representativo da concentração natural de um dado elemento, em um ambiente específico, levando em consideração as variáveis temporais e espaciais (GALUSZKA, 2007).

Em face as variadas denominações de *background*, dois importantes conceitos precisam ser esclarecidos. Denominado como *background* natural, o primeiro, faz

menção aos teores cuja origem é reflexo de processos naturais, não relacionados com contribuições resultantes de ações humanas (MATSCHULLAT; OTTENSTEIN; REIMANN, 2000; REIMANN; GARRETT, 2005). O segundo, intitulado como *background* ambiental, está associado a concentrações cuja proveniência seja de fontes naturais, somadas as antropogênicas difusas (PANNO et al., 2006; MIKKONEN et al., 2017).

Para Matschullat, Ottenstein e Reimann (2000) o termo *background* muitas vezes é empregado de maneira imprecisa, o que demonstra uma falta de concordância na sua aplicação. Outras nomenclaturas, inclusive, têm sido usados como sinônimos, tais como *threshold* e *baseline*.

McQueen (2008) e Cidu e Biddau (2017) assinalam que *threshold* corresponde a valores que definem os limites inferior e superior da variação de *background*. *Baseline* é conceituado por Salminen e Gregorauskiene (2000) como a variação predominante na concentração de um elemento em uma área. Embora estejam relacionados, Reimann e Garrett (2005) não aconselham o uso de *baseline* e *background* como sinônimos, uma vez que, segundo eles, de modo geral na literatura, o primeiro corresponde a um valor constante e o segundo a um intervalo de valores.

### **2.2.2 Estimativa dos valores de *background***

De acordo com Gałuszka e Migaszewski (2011), existem três métodos para estimar o *background*: diretos (geoquímicos), indiretos (estatísticos) e integrados. Os métodos diretos são baseados em valores médios contidos em amostras da crosta, dados referentes a acúmulos em formações pré-civilizatórias, sem interferências antrópicas; os métodos indiretos são baseados em técnicas gráficas e estatísticas, as quais permitem remover os *outliers* presentes nos resultados; já os métodos integrados consistem em associações dos métodos supracitados, ou seja, amostras obtidas em áreas preservadas submetidas a análises estatísticas (MATSCHULLAT; OTTENSTEIN; REIMANN, 2000; GAŁUSZKA; MIGASZEWSKI, 2011).



### 2.2.2.1 Técnicas estatísticas para determinação de *background*

#### **2.2.2.1.1 Representação boxplot (Turkey's Inner Fence – TIF)**

Baseia-se na frequência acumulada dos elementos, sendo os valores distribuídos em um diagrama, no qual delimita-se um retângulo onde está contida a mediana e que tem como limites inferior e superior, respectivamente, os quartis 25 e 75. Este intervalo interquartis estendido 1,5 vezes para cima e para baixo define o *fence* superior e *fence* inferior, respectivamente. Os valores entre esses limites são chamados de valores adjacentes e os pontos além dos limites são denominados *outliers*, os quais em levantamentos geoquímicos são considerados geralmente como indicativos de influência antropogênica (GAŁUSZKA, 2007; MORETTIN; BUSSAB, 2012).

#### **2.2.2.1.2 Mediana $\pm 2$ \* desvio absoluto da mediana**

A partir do conjunto de dados log-transformados, a mediana e o desvio absoluto da mediana são calculados e, a partir deles são obtidos os respectivos limites inferior (utilizando operador negativo) e superior (utilizando operador positivo) em escala log. Para obter o intervalo de *background* os resultados necessitam ser transformados para escala real (REIMANN et al., 2018).

#### **2.2.2.1.3 Iterativa $2\sigma$**

Consiste no cálculo da média e o desvio padrão sobre o conjunto de dados original, a partir do qual é obtido um novo intervalo de valores. Os valores situados externamente a este intervalo são descartados e este processo é repetido até que todos os valores resultantes se enquadrem; a média ( $\pm 2\sigma$ ) calculada a partir desse novo conjunto de dados resulta na faixa de *background* (URRESTI-ESTALA et al., 2013). Segundo os autores citados, após obter o intervalo dos valores de referência, é necessário submetê-lo ao teste de Lilliefors para verificar se os dados estão ajustados a uma distribuição normal.

#### **2.2.2.1.4 Função distribuição calculada**

Baseia-se no princípio de que enriquecimento e empobrecimento são equilibrados em sistemas naturais. Considera que, em áreas sob influência

antropogênica, a função de distribuição tende a ser inclinada para valores mais altos, enquanto que os valores mais baixos situados entre o mínimo e a mediana correspondem a teores naturais, sem interferência humana, ou seja, são representativos do intervalo de *background* (MATSCHULLAT; OTTENSTEIN; REIMANN, 2000). Semelhantemente a aplicada na técnica anterior, os resultados devem ser avaliados pelo teste de Lilliefors (URRESTI-ESTALA et al., 2013).

### 3 CONCLUSÃO

A assinatura geoquímica dos sedimentos ativos de corrente da BRP revelou que a presença de determinados elementos está associada principalmente com a configuração geológica da região. Evidências apontaram que os cinturões norte e sul de mineralização de Cu situados na Bacia Carajás são os principais responsáveis pelas concentrações anômalas deste elemento. De modo semelhante, as formações ferríferas bandadas e as rochas metavulcânicas da Bacia Carajás também têm colaborado para a presença de Fe, assim como as rochas máfico-ultramáficas também apontaram contribuição na ocorrência de Ni, Cr e Co.

As diferentes técnicas de cálculo do *background* subsidiaram uma ampla faixa de resultados. O *background* natural foi mais bem representado por métodos que forneceram valores mais conservadores (iterativa  $2\sigma$ , percentil 75 e função distribuição calculada), enquanto que para o *background* ambiental resultados mais realistas foram considerados (MAD). As estimativas realizadas apontaram que os limites superiores de Cr, Cu e Ni excederam o nível 2 da resolução nº 454 de 2012. Portanto, é evidente que a legislação ambiental que rege os sedimentos no território brasileiro não contempla as peculiaridades regionais, especialmente, a da BRP.

### REFERÊNCIAS

ABREU, A.; GONÇALVES, M. A.; MATEUS, A. S.; TABORDA, R.; BATISTA, M. J. Geoquímica de sedimentos de corrente na prospecção de mineralizações de W-Sn e Metais preciosos na Zona Centro Ibérica. In.: CONGRESSO IBÉRICO DE GEOQUÍMICA, 10., Lisboa, 2015.

CIDU, R.; BIDDAU, R. Geochemical background values in aquatic systems. In.: NATIONAL MEETING ON HYDROGEOLOGY, 3., Cagliari, 14-16 jun. 2017. Disponível em: <http://ojs.unica.it/index.php/flowpath2017/article/download/2901/2490>.

CARMO, M. S.; BOAVENTURA, G. R.; OLIVEIRA, E. C. Geoquímica das águas da Bacia do Rio Descoberto. São Paulo, Brasil. **Quim. Nova**, v. 28, n. 4, p. 565-574, 2005.

GAŁUSZKA, A.; MIGASZEWSKI, Z. Geochemical background - an environmental perspective. **Mineralogia**, v. 42, n. 1, p. 7-17, 2011.

GAŁUSZKA, A. Different approaches in using and understanding the term "Geochemical Background"- practical implications for environmental studies. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 16, n. 3, p. 389-395, 2007.

KICIŃSKA, A. TUREK, K. Establishing geochemical background of elements present in soil and its application in the evaluation of soil pollution based on data collected in the Beskid Sądecki Region. **Geoinformatica Polonica**, v. 16, p. 87-99, set. 2017. DOI 10.4467/21995923GP.17.007.7194.

MATSCHULLAT, J.; OTTENSTEIN, R.; REIMANN, C. Geochemical background - Can we calculate it?. **Environmental Geology**, v. 39, n. 9, p. 990-1000, 2000.

MCQUEEN, K. G. Regolith Geochemistry In: SCOTT, K. M.; PAIN, C. F. **Regolith Science**. Canberra: CSIRO Publishing, 2008. p. 71-102. (capítulo 5).

MOREIRA, R. C. A.; BOAVENTURA, G. R. Referência geoquímica regional para a interpretação das concentrações de elementos químicos nos sedimentos da Bacia do Lago Paranoá - DF. **Quim. Nova**, v. 26, n. 6, p. 812-820, 2003.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística Básica**. 7. ed. São Paulo: Saraiva, 2012.

REIMANN, C.; GARRETT, R. G. Geochemical background - concept and reality. **Science of the total environmental**, v. 350, p. 12-27, 2005.

REIMANN, C.; FILZMOSER, P.; GARRETT, R. G. Background and threshold: Critical comparison of methods of determination. **Science of the Total Environment**, v. 346, n. 1-3, p. 1-16. 2005.

RODRIGUES, A. S. L.; NALINI JÚNIOR, H. A. Valores de background geoquímico e suas implicações em estudos ambientais. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 62, n. 2, p. 155-165, 2009.

SALMINEN, R.; GREGORAUSKIENE, V. Considerations regarding the definition of a geochemical baseline of elements in the surficial materials in areas differing in basic geology. **Applied Geochemistry**, v. 15, p. 647-653, 2000.

SOUZA-FILHO, P. W. M. *et al.* Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 167, p. 175-184. 2016. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26686070>. DOI 10.1016/j.jenvman.2015.11.039

URRESTI-ESTALA, B.; CARRASCO-CANTOS, F.; VADILLO-PÉREZ, I.; JIMÉNEZ-GAVILÁN, P. Determination of background levels on water quality of groundwater bodies: A methodological proposal applied to a Mediterranean River basin (Guadalhorce River, Málaga, southern Spain). **Journal of Environmental Management**, v. 117, p. 121-130, 2013.

WEDEPOHL, K. H. Handbook of geochemistry. Berlin: Springer Verlag, 1978. DOI [10.1002/jobm.19800200529](https://doi.org/10.1002/jobm.19800200529)

## **APÊNDICE**

## **PRODUÇÃO TÉCNICA ITV DS**

# **GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS ATIVOS DE CORRENTE E ESTIMATIVA DE *BACKGROUND* GEOQUÍMICO NA BACIA DO RIO PARAUPEBAS – PARÁ**

**Projeto *Background* Geoquímico da Bacia do Rio Itacaiúnas**

Danielle de Lima Farias  
Prafulla Kumar Sahoo  
Roberto Dall’Agnol

**Belém / PA  
Março / 2020**

<b>Título:</b> Geoquímica de sedimentos de corrente e estimativa de <i>background</i> geoquímico de elementos potencialmente tóxicos na Bacia do Rio Parauapebas – Pará	
<b>PROD. TEC. ITV DS - N000/2020</b>	Revisão
<b>Classificação:</b> ( ) Confidencial ( x ) Restrita ( ) Uso Interno ( ) Pública	00

**Informações Confidenciais** - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

**Informações Restritas** - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

**Informações de Uso Interno** - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

**Informações Públicas** - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F224 Farias, Danielle de Lima  
 Geoquímica de sedimentos de correntes e estimativa de *Background* geoquímico de elementos potencialmente tóxicos na Bacia do Rio Parauapebas - Pará. / Danielle de Lima Farias, Prafulla Kumar Sahoo, Roberto Dall’Agnol. – Belém, PA, 2020.  
 18 f.: il.

1. Geoquímica - *Background*. 2. Sedimentos de corrente - Rio Parauapebas (PA). 3. Rio Parauapebas - Carajás, Serra dos (PA). I. Sahoo, Prafulla Kumar. II. Dall’Agnol, Roberto. III. Título.

CDD.23 ed. 579.3098115

Bibliotecária Responsável: Nisa Gonçalves - CRB 2: 525

## RESUMO EXECUTIVO

Este relatório apresenta dados e informações que integram o projeto intitulado “*Background* Geoquímico na Bacia do Rio Itacaiúnas”, desenvolvido pelo Instituto Tecnológico Vale – ITV, e tem por objetivo compreender o comportamento geoquímico dos sedimentos ativos de corrente, bem como realizar a estimativa de *background* geoquímico para Al, Fe e elementos potencialmente tóxicos. A área sob investigação é a Bacia do Rio Parauapebas (BRP), que é uma das nove sub-bacias que compõem a Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI), na qual 190 amostras de sedimentos foram coletadas em 2017. As amostras foram analisadas em laboratório certificado, através de *ICP-MS*, que forneceu concentrações para 51 elementos. Análises descritiva e multivariadas foram aplicadas. Mapas geoquímicos foram construídos para Al, Fe e elementos potencialmente tóxicos e diferentes técnicas estatísticas foram empregadas na estimativa de *background* geoquímico destes mesmos elementos. Os resultados indicaram que fontes geogênicas são as principais contribuintes na assinatura geoquímica dos sedimentos, ainda que também existam influências antropogênicas. Cromo, Cu e Ni foram os elementos que ultrapassaram os limites do CONAMA Nº 454. As estimativas de *background* revelaram que as técnicas iterativas  $2\sigma$ , percentil 75 e função distribuição calculada mostraram os intervalos mais adequados para o *background* natural, enquanto que para o *background* ambiental os valores mais realistas foram entregues pela *MAD*. Por fim, constata-se que os limites legais precisam ser fundamentados em estudos, tais como este, que ponderem as mais diversas configurações ambientais.



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>7</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	7
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	7
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>7</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO .....	7
3.2	AMOSTRAGEM E MÉTODO ANALÍTICO .....	11
3.3	TRATAMENTO DOS DADOS .....	12
3.4	ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	13
<b>3.4.1</b>	<b>Estatística descritiva</b> .....	<b>13</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Estatística multivariada</b> .....	<b>13</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Estimativa dos valores de <i>background</i></b> .....	<b>14</b>
3.5	MAPEAMENTO GEOQUÍMICO .....	15
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>16</b>
4.1	ESTATÍSTICA DESCRITIVA E EXPLORATÓRIA .....	16
4.2	ESTATÍSTICA MULTIVARIADA .....	18
4.3	MAPAS GEOQUÍMICOS .....	24
4.4	VALORES DE <i>BACKGROUND</i> GEOQUÍMICO .....	34
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>37</b>
5.1	INFLUÊNCIA GEOGÊNICA <i>VERSUS</i> ANTROPOGÊNICA NOS SEDIMENTOS DA BRP .....	37
5.2	COMPARAÇÃO COM A ASSINATURA GEOQUÍMICA DOS DADOS DA CPRM .....	41
5.3	BACIA DO RIO PARUAPEBAS <i>VERSUS</i> BACIA DO RIO ITACAIÚNAS E SUAS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS .....	44
5.4	VALORES DE <i>BACKGROUND</i> E A LEGISLAÇÃO .....	46
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>51</b>
	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A geoquímica de sedimentos de corrente fornece informações sobre as características composicionais das rochas situadas na bacia, da qual os sedimentos são oriundos (COCKER, 1998). Em razão disto, foi empregada tradicionalmente em atividades de exploração mineral e na construção de mapas geoquímicos, que permitem detectar áreas com concentrações atípicas (anomalias) de determinados elementos, as quais podem ser indicativas de depósitos minerais nas proximidades (BOGEN; BOLVIKEN; OTTESEN, 1992; YOUSEFI; CARRANZA; KAMKAR-ROUHANI, 2013).

Porém, em tempos mais recentes, além de sua utilização na prospecção mineral, a geoquímica de sedimentos ativos de corrente passou a desempenhar um importante papel como ferramenta de avaliação e diagnóstico ambiental, pois fornece valiosas informações sobre os processos de intemperismo, erosão e transporte de elementos químicos que acontecem na área de drenagem da bacia observada (RANASINGHE et al., 2008). Ela permite, de modo geral, definir a existência tanto de anomalias naturais, quanto antropogênicas, bem como ponderar os seus impactos relativos no ambiente.

Os mais intensos processos de alteração de uso e cobertura do solo na Amazônia datam da década de 70, mas se intensificaram sobretudo ao longo dos anos 80 e 90, e são produto de atividades como a abertura de estradas e rodovias – como a Belém-Brasília e a Transamazônica, desenvolvimento de projetos de exploração mineral, implantação de projetos de colonização rural e expressiva expansão da agropecuária (LAURANCE, 1998; MONTEIRO, 2005; LAURANCE; GOOSEM; LAURANCE, 2009; SOUZA-FILHO et al., 2016).

A Província Mineral de Carajás situa-se no sudeste do estado do Pará e compreende o maior e mais importante distrito mineral da Amazônia, e um dos maiores do mundo, com jazidas de ferro, cobre, manganês, níquel, ouro e estanho (LAFON; MACAMBIRA, 1992; ZUCCHETTI, 2007; SHIMIZU, 2012). Tendo em vista a mudança acelerada no uso e ocupação do solo ocorrida nas últimas décadas na região, a presente pesquisa deverá contribuir tanto para o conhecimento acerca da influência geológica na assinatura geoquímica, quanto para o entendimento de eventuais ações antropogênicas, geradoras de impactos ambientais. Nesse

contexto, elaborar mapas geoquímicos e assim visualizar a distribuição dos elementos, deve permitir avanços na compreensão dos processos que controlam a dinâmica geoquímica.

Dentre os levantamentos geoquímicos realizados na região de Carajás, cabe destacar aqueles relativamente recentes realizados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2012, 2013), os quais contemplaram amostragem de solos na área de Canaã dos Carajás, cujos dados foram tratados e discutidos por Salomão (2018) e Salomão et al. (2019a), e de sedimentos de corrente na porção centro-sul da bacia do rio Itacaiúnas, abordados por Salomão et al. (2019b).

Tendo em vista a relevância econômica e social da bacia do rio Itacaiúnas para o estado do Pará e para a região, assim como o interesse que desperta para a Vale, por ser o principal foco de atuação da empresa na região Norte, o Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável está desenvolvendo o projeto de pesquisa intitulado “*Background* Geoquímico da Bacia do Rio Itacaiúnas”. Tal projeto visa elaborar mapas geoquímicos e estabelecer valores de *background* para os elementos químicos de maior interesse para a mineração e com maior potencial para causar danos ambientais. Objetiva, ainda, entender as interações geoquímicas na bacia supracitada. Este conjunto de informações servirá de base no futuro para a avaliação de possíveis impactos antropogênicos e norteará a tomada de decisões a respeito de ações mitigadoras a serem desenvolvidas na área.

A presente pesquisa se insere no referido projeto e tem como intuito elaborar mapas geoquímicos de sedimentos de corrente e estabelecer valores de *background* geoquímico de Al, Fe e elementos potencialmente tóxicos na Bacia do Rio Parauapebas (BRP), situada na região sudeste do estado do Pará, na porção centro-sul da BHRI. A bacia do Rio Parauapebas possui grande relevância no contexto regional porque nela estão situadas as minas de Fe de N4, N5 e S11D e a mina de cobre de Sossego. A cidade de Parauapebas é a segunda em população no sudeste do Pará e há anos o município se mantém como um dos maiores arrecadadores do país (IBGE, 2020).

Espera-se que os resultados obtidos através dessa pesquisa venham a constituir uma contribuição importante para o projeto maior da BHRI e, dessa forma, contribuir para a ampliação do conhecimento e para a gestão ambiental da bacia.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Compreender o comportamento geoquímico de sedimentos de corrente e estabelecer valores de *background* para Al, Fe e elementos potencialmente tóxicos (As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, V e Zn) na Bacia do Rio Parauapebas.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Elaborar mapas geoquímicos da distribuição de concentração de Fe, Al e dos elementos potencialmente tóxicos;
- b) Delinear as possíveis anomalias geoquímicas existentes e definir sua possível origem;
- c) Estabelecer intervalos de *background* geoquímico através de diferentes técnicas;
- d) Confrontar os resultados desta pesquisa com os resultados obtidos a partir de levantamentos geoquímicos pretéritos realizados pela CPRM.

## **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 ÁREA DE ESTUDO**

O projeto *Background* Geoquímico, em desenvolvimento na região de Carajás, abrange a Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (Figura 1B), a qual possui uma área de aproximadamente 42 mil km<sup>2</sup> e compreende nove sub-bacias dos rios: Sororó, Vermelho e Parauapebas, afluentes de sua margem direita; Cateté, Aquiri, Cinzento, Tapirapé e Preto, afluentes de sua margem esquerda.

A área de observação desta pesquisa é a Bacia do Rio Parauapebas, a qual cobre uma área de aproximadamente 9.604 km<sup>2</sup> (PINA NETO; SILVA JÚNIOR; DA SILVA, 2019) que engloba parte dos municípios de Marabá, Parauapebas, Curionópolis, Canaã dos Carajás, Água Azul do Norte e Xinguara, e, também, de áreas de conservação como a Floresta Nacional dos Carajás, o Parque Nacional dos Campos Ferruginosos e a Área de Proteção Ambiental do Igarapé Gelado (Figura 1).



**Figura 2** – Trecho do Rio Parauapebas sob a ponte de acesso a mina do Sossego (sentido S-N).

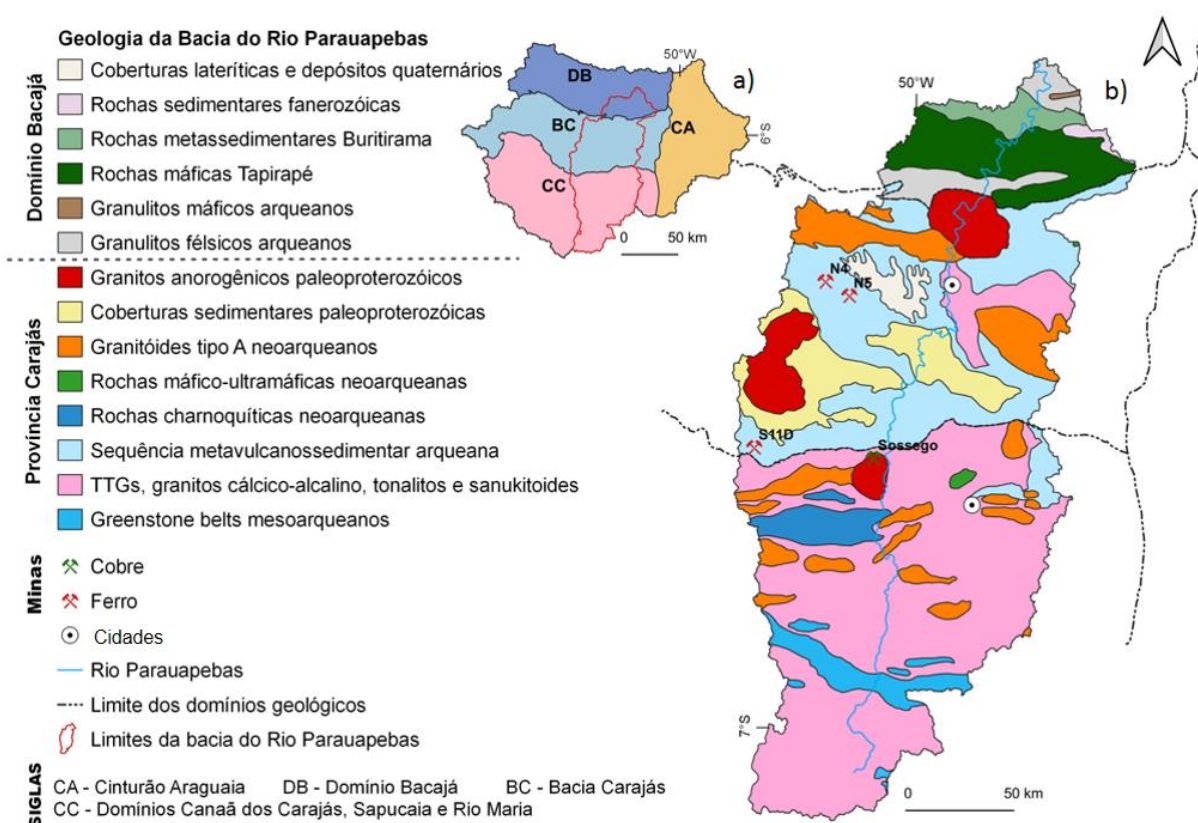


**Fonte:** própria autora, 2019.

A BRP apresenta uma intensa dinâmica de uso e ocupação do solo, baseada principalmente no desenvolvimento das atividades de agropecuária e exploração mineral (com minas ativas de ferro e cobre), além do crescimento populacional desordenado movido em parte pela oferta de emprego na região. Essas alterações de uso e cobertura do solo na região ocorreram desde a década de 70 (SOUZA-FILHO et al., 2016).

A região de estudo divide-se em dois grandes domínios tectônicos (Figura 3): Domínio Bacajá, localizado ao norte, constituído por rochas neoarqueanas a paleoproterozoicas; e a Província Carajás, subdividida na Bacia Carajás, de idade neoarqueana, e nos domínios Canaã dos Carajás, Sapucaia e Rio Maria, constituídos principalmente por rochas mesoarqueanas, seccionadas por corpos plutônicos neoarqueanos (VASQUEZ et al., 2008; DALL'AGNOL et al., 2017).

**Figura 3** – Mapa geológico: a) Domínios geológicos da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas, mostrando em destaque a BRP; b) Unidades litoestratigráficas da BRP.



Fonte: Vasquez et al., 2008 (adaptado).

No Domínio Bacajá, predominam granulitos félsicos e máficos do período Arqueano, rochas metamáficas da Formação Tapirapé e metassedimentares da Formação Buritirama, bem como rochas sedimentares fanerozóicas.

A Bacia Carajás – domínio onde estão situadas as minas de ferro (N4, N5 e S11D) – é composta predominantemente por uma sequência neoarqueana de rochas metavulcânicas máficas a félsicas, com formações ferríferas bandadas (FFB) associadas. Estas unidades são cortadas por granitoides subalcalinos neoarqueanos e por granitos anorogênicos tipo A paleoproterozoicos e parcialmente recobertas por coberturas sedimentares paleoproterozoicas e formações lateríticas cenozoicas (VASQUEZ et al., 2008; DALL’AGNOL et al., 2017).

Os domínios Canaã dos Carajás, Sapucaia e Rio Maria – onde estão situados os depósitos de níquel de Vermelho e a mina de cobre do Sossego – são constituídos em grande parte por rochas granitoides do tipo TTG, sanukitoides, leucogranodioritos e granitos, assim como por sequências de greenstone belts,

todos mesoarqueanos. Estas unidades são seccionadas por corpos charnoquíticos, máfico-ultramáficos, e de granitoides tipo A, de idade neoarqueana, bem como por granitos anorogênicos paleoproterozoicos (VASQUEZ et al., 2008; FEIO et al., 2013; DALL'AGNOL et al., 2017).

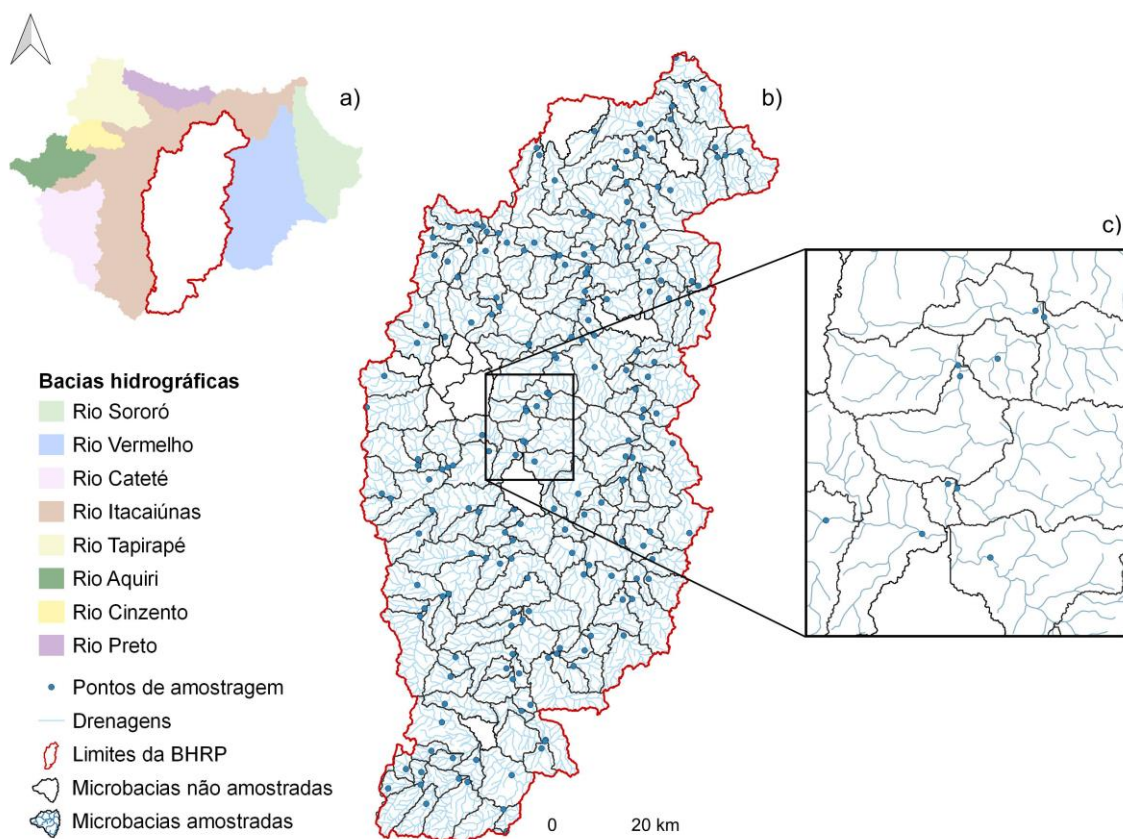
### 3.2 AMOSTRAGEM E MÉTODO ANALÍTICO

Os pontos de amostragem foram previamente determinados através de um sistema de informação geográfica — cruzando dados de topografia, geologia e uso e cobertura do solo — de modo que em cada microbacia fosse coletada apenas uma amostra e, além disso, que a localização de cada ponto amostrado pudesse traduzir a dinâmica da microbacia, situando-se então preferencialmente nas proximidades da foz da drenagem principal (Figura 4).

Durante os meses de fevereiro a novembro de 2017 um total de 200 amostras de sedimentos de corrente (incluindo 10 duplicatas) foram coletadas em 190 microbacias que compõem a BRP, estabelecendo uma densidade de amostragem de aproximadamente 1:50 km<sup>2</sup>. Devido à dificuldade de acesso em áreas de conservação cobertas por floresta e à proibição de entrada em algumas propriedades privadas, não foi possível realizar amostragem em 14 microbacias.



**Figura 4** – a) Sub-bacias hidrográficas da BHRI, com destaque para a BRP. b) Pontos de amostragem de sedimentos de corrente na BRP. c) Detalhe de b, exemplificando algumas das microbacias amostradas.



**Fonte:** própria autora, 2019.

Os sedimentos foram coletados em zonas com sedimentação ativa, próximas ao meio do canal; em seguida foram dispostos em bandejas de inox, armazenados em sacos plásticos e transportados para laboratório de preparação de amostras nas instalações da Vale na área do Viveiro em Carajás, onde foram submetidos a um pré-processamento que incluía secagem à 40°C, desagregação e peneiramento. As amostras, cada uma composta por uma alíquota de 50g com granulometria menor que 80 *mesh* (<0.177mm), foram enviadas para análise química nos laboratórios da ALS Brasil.

As amostras foram submetidas a ataque químico por água régia (código ALS: ME-MS41) e, posteriormente, analisadas por *Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry* (ICP-MS) que permitiu obter as concentrações de 51 elementos — Al, Ag, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Ca, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, La, Li,

Mn, Mg, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Si, Sn, Sr, Ta, Ti, Te, Th, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr.

### 3.3 TRATAMENTO DOS DADOS

Os resultados das análises de laboratório foram dispostos em planilha *Excel* para que fossem observados o percentual e o número total de amostras, por elemento, com concentração abaixo do Limite de Detecção (LD) do método analítico empregado. Os elementos que apresentaram mais de 30% de suas respectivas amostras com concentrações abaixo do LD não tiveram seus dados submetidos às análises estatísticas.

O método de substituição simples foi aplicado para os demais elementos que apresentaram percentual < 30% de amostras com concentrações abaixo do limite de detecção. Esse método, semelhantemente ao adotado por Reimann e Filzmoser (2000) e Reimann et al. (2008), consiste em substituir os valores menores que o LD por valor correspondente à metade do limite de detecção (LD/2) indicado para cada elemento, de acordo com o método analítico.

### 3.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

#### 3.4.1 Estatística descritiva

Para compreender as formas de distribuição e dispersão foram calculadas medidas de posição e variabilidade — mínimo, mediana, máximo, média, desvio padrão e coeficiente de variação — para todos os elementos selecionados.

Os dados geoquímicos são comumente caracterizados como sistemas numéricos fechados, o que pode gerar implicações em análises multivariadas (REIMANN et al., 2008). Por essa razão, foram realizadas transformações logarítmicas e *clr* (em inglês, *Centred LogRatio*) no conjunto de dados, semelhantemente ao adotado em outras pesquisas (MINOLFI et al., 2018; SAHOO et al., 2019).

O comportamento e a normalidade do conjunto de dados foram avaliados através dos gráficos Q-Q (Quantil-Quantil) e de análise exploratória de dados (combinação de histograma, diagrama de dispersão e *boxplot*), os quais foram construídos com base nos dados brutos e transformados ( $\log_{10}$  e *clr*). Devido à

subjetividade das técnicas gráficas, a normalidade também foi avaliada através da aplicação do Teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965).

Todas as técnicas supracitadas foram conduzidas através do *software* R versão 3.5.3 (R Core Team, 2019) e as transformações, em especial, contaram com o auxílio dos pacotes de análise *base* e *robCompositions*.

### **3.4.2 Estatística multivariada**

Para compreender as interações entre as variáveis, análises estatísticas multivariadas foram aplicadas sobre os três distintos conjuntos de dados (brutos,  $\log_{10}$  e *clr*). A correlação de *Spearman* forneceu uma matriz com os coeficientes que expressam o grau de extensão da relação entre os elementos, a um nível de significância de 0,01. Os coeficientes permitem classificar uma correlação como muito forte ( $r = \pm 0,9$  a  $\pm 1$ ), forte ( $r = \pm 0,7$  a  $\pm 0,89$ ), moderada ( $r = \pm 0,4$  a  $\pm 0,69$ ), fraca ( $r = \pm 0,1$  a  $\pm 0,39$ ) e muito fraca ( $0$  a  $\pm 0,1$ ) (SCHOBER; BOER; SCHWARTE, 2018).

Ao realizar a análise de agrupamento hierárquico, a distância euclidiana foi usada para definir a medida de similaridade entre as amostras e, para as variáveis, os coeficientes oriundos da correlação de *Spearman*. Para a formação dos *clusters*, o método de ligação entre grupos foi utilizado, tendo como base o *complete-linkage*.

A análise de componentes principais (em inglês, *Principal Component Analysis*) foi baseada no método de decomposição em valores singulares, com a finalidade de reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados na forma de componentes, explicando a variabilidade desempenhada por cada uma delas, assim como o peso exercido por cada variável. Todos os resultados foram obtidos com o auxílio dos pacotes de análise *corrplot*, *stats*, *dendextend*, *psych* e *factoextra* do *software* R versão 3.5.3 (R Core Team, 2019).

### **3.4.3 Estimativa dos valores de *background***

As faixas de *background* foram calculadas através de cinco técnicas estatísticas, que historicamente têm sido empregadas em estudos geoquímicos (MATSCHULLAT; OTTENSTEIN; REIMANN, 2000; REIMANN; FILZMOSE; GARRETT, 2005; URRESTI-ESTALA et al., 2013; REIMANN et al., 2018).

A representação *boxplot*, também denominada *Tukey Inner Fence*, calcula a faixa de *background* com base nos quartis. Inicialmente os dados foram transformados para a escala  $\log_{10}$ , em seguida, o primeiro e o terceiro quartil, bem como o intervalo interquartil, foram calculados para cada variável. Por fim, as informações foram inseridas nas equações 1 (para limite inferior de *background*) e 2 (para limite superior de *background*). Os produtos desse cálculo foram transformados para a escala real novamente. Todos os procedimentos foram feitos por meio do *software* R versão 3.5.3 (R Core Team, 2019).

$$\text{TIF(inferior)} = Q1 - 1,5 \cdot \text{IQR} \quad (1)$$

$$\text{TIF(superior)} = Q3 + 1,5 \cdot \text{IQR} \quad (2)$$

Onde:

Q1: primeiro quartil

Q3: terceiro quartil

IQR: intervalo interquartil (Q3 – Q1)

1,5: fator de multiplicação

A técnica comumente chamada de  $M_{\text{MAD}}$ , consiste no cálculo da mediana e o desvio absoluto da mediana para cada variável do conjunto de dados, também em escala  $\log_{10}$ . O produto final dessas medidas foi, em seguida, inserido na equação 3, na qual para o limite inferior de *background* usou-se o operador negativo e para o limite superior o operador positivo. Semelhantemente ao *boxplot*, os resultados também foram transformados para a escala real novamente. Todos os cálculos foram realizados através do *software* R versão 3.5.3 (R Core Team, 2019).

$$M_{\text{DAM}} = M \pm 2 * \text{DAM} \quad (3)$$

Onde:

$M_{\text{DAM}}$ : limite de *background* superior ou inferior

M: mediana

DAM: desvio absoluto da mediana

As estimativas de *background* construídas através das técnicas iterativa  $2\sigma$  e função de distribuição calculada foram realizadas por meio do *freeware* *Visual Basic*

*macro* denominado *VB Background*, o qual foi disponibilizado por Nakić, Posavec e Bacićani (2007). Em ambos os métodos, as concentrações foram inseridas na planilha (baseada no modelo de cada técnica) e, automaticamente, os intervalos foram calculados.

Embora sejam valores fixos, e não intervalos, o método de percentis (75, 90, 95 e 98), relativos a dada porcentagem de concentrações no conjunto de dados, também foi empregado na estimativa do limite superior de *background*. Os cálculos foram realizados através do *software* R versão 3.5.3 (R Core Team, 2019).

### 3.5 MAPEAMENTO GEOQUÍMICO

Os mapas geoquímicos de distribuição dos elementos foram construídos com base na técnica de interpolação IDW (em inglês, *Inverse Distance Weighting*) através do *software* QGIS (Equipe de Desenvolvimento do QGIS, 2016) versão 2.18 utilizando como referência o datum WGS84 (em inglês, *World Geodetic System* 1984). As concentrações dos principais elementos potencialmente tóxicos — As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, V e Zn, mais as de Al e Fe, foram representadas com base no modo de classificação quartil, expressando a tendência de distribuição destas variáveis na área de estudo.

## 4 RESULTADOS

Dentre os 51 elementos analisados, 10 deles apresentaram mais de 30% de suas respectivas amostras com concentrações abaixo do limite de detecção (Au, B, Ge, Na, Re, S, Sb, Ta, Te e W) e, por essa razão, não foram submetidos às análises estatísticas seguintes. Para os demais elementos que apresentaram porcentagem <30% de amostras abaixo do LD — Ag (6,2%), As (9,5%), Be (0,5%), Cd (12,1%), Ce (0,5%), Cs (2%), Hg (9,5%), In (12%), K (0,5%), Mg (0,5%), Se (29,8%), Sn (3,7%) e Tl (5,7%) — foi aplicado o método de substituição simples.

### 4.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA E EXPLORATÓRIA

Os resultados da estatística descritiva de Al, Fe e dos elementos potencialmente tóxicos (As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, V e Zn) são apresentados na forma de um resumo estatístico (Tabela 1), incluindo dados referentes ao limite de detecção, percentual de amostras abaixo do LD, mínimo, mediana, máximo, média, desvio padrão, coeficiente de variação e valores de

probabilidade de significância (baseados no teste de Shapiro-Wilk). A tabela completa com os 41 elementos pode ser observada no Apêndice A.

**Tabela 1** - Estatística descritiva de elementos potencialmente tóxicos mais Fe e Al em sedimentos ativos de corrente na Bacia do Rio Parauapebas e valores da probabilidade de significância (p-valor) do teste de normalidade Shapiro-Wilk aplicado sobre dados brutos e transformados ( $\log_{10}$  e clr). As concentrações de todos elementos estão em mg/kg, exceto os LD de Al e Fe, expressos em %.

Elementos	LD	%<LD	Mínimo	Mediana	Máximo	Média	DP	CV%	S-W Db	S-W $\log_{10}$	S-W clr
Al	0,01	-	1200	8950	41700	11565	8321	71,95	<0,05	<0,05	0,99
As	0,1	9,5	<0,1	0,3	7,9	0,67	1	150,31	<0,05	<0,05	0,38
Ba	10	-	20	70	770	91,26	79,86	87,5	<0,05	<0,05	0,65
Cd	0,01	12,1	<0,01	0,01	0,38	0,03	0,05	167,07	<0,05	<0,05	<0,05
Co	0,1	-	0,8	6,8	66,9	11,61	12,85	110,62	<0,05	<0,05	0,13
Cr	1	-	4	30	2630	58,86	196,2	333,35	<0,05	<0,05	<0,05
Cu	0,2	-	1,4	20,35	556	49,38	74,3	150,47	<0,05	<0,05	<0,05
Fe	0,01	-	4200	19750	354000	39305	48823	124,21	<0,05	<0,05	<0,05
Hg	0,01	9,5	<0,01	0,02	0,24	0,03	0,03	96,72	<0,05	<0,05	0,10
Mn	5	-	69	542,5	6420	815,13	911,11	111,77	<0,05	0,54	0,60
Mo	0,05	-	0,06	0,37	3,49	0,58	0,61	105,43	<0,05	<0,05	<0,05
Ni	0,2	-	1,1	6,9	273	15,77	32,16	204	<0,05	<0,05	<0,05
Pb	0,2	-	1,1	7,05	27,5	8,94	5,58	62,39	<0,05	0,10	0,06
Sn	0,2	3,7	<0,2	0,5	5,5	0,73	0,67	91,3	<0,05	<0,05	<0,05
V	1	-	2	28,5	410	50,48	56,26	111,44	<0,05	0,05	0,08
Zn	2	-	3	19	304	30,86	44,36	143,73	<0,05	<0,05	<0,05

**Nota:** LD: Limite de Detecção; DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variação; S-W: Shapiro-Wilk; db: dados brutos; clr: *centred logratio*.

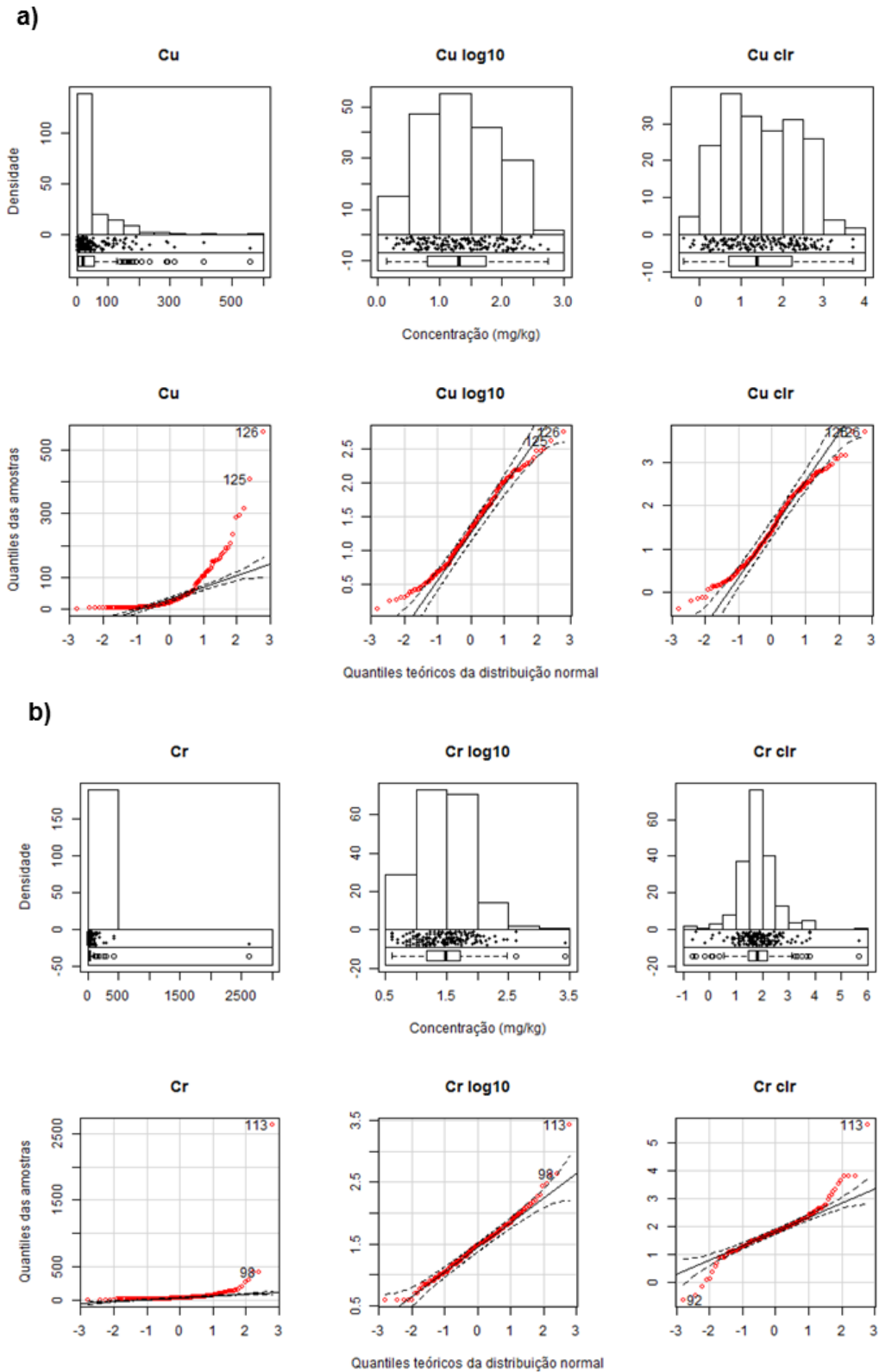
**Fonte:** própria autora, 2019.

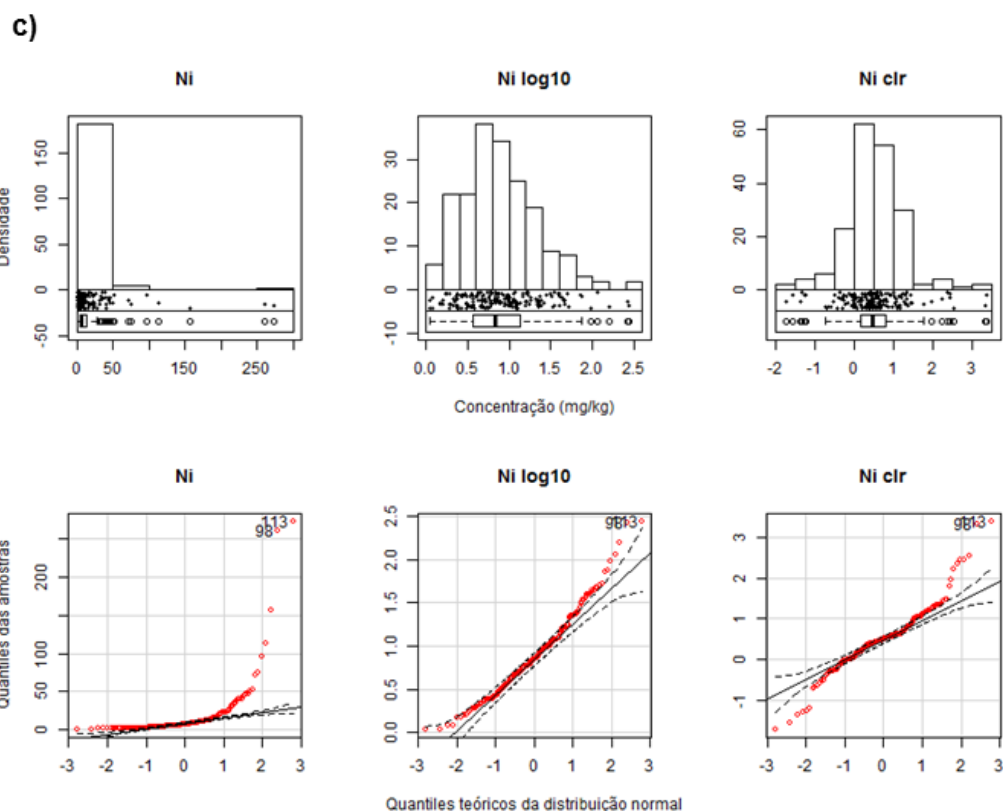
O teste de normalidade supracitado apontou que, para os dados brutos, todos os elementos apresentaram uma distribuição não-normal (p-valor < 0,05) e, quando submetidos à transformação logarítmica, apenas Be, Cs, La, Li, Mn, P, Pb, Sr, Th, Ti, U, Y e Zr apresentaram uma distribuição normal (p-valor > 0,05), enquanto que, empregando-se transformação clr, apenas Ag, Cd, Ce, Cr, Cu, Fe, Ga, Hf, Mg, Mo, Ni, Pb, Rb, Sn, Sr, U e Zn exibiram uma distribuição não-normal (p-valor < 0,05).

As concentrações médias (Tabela 1) quando comparadas com aquelas, dos respectivos elementos, mencionadas na resolução N° 454 do CONAMA apresentaram teores abaixo no nível 2 (acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota) em todos os elementos. Todavia, quando observados os teores máximos, Cu, Cr e Ni exibiram valores acima desse mesmo nível. Os gráficos Quantil-Quantil e de análise exploratória de dados resumem e permitem visualizar as

principais características de cada elemento, como mostra o exemplo de Cu, Cr e Ni (Figura 5). Os gráficos para as demais variáveis analisadas constam no apêndice B.

**Figura 5** – Gráficos de EDA e Q-Q para os três distintos conjuntos de dados. a) Cu; b) Cr e c) Ni.





Fonte: própria autora, 2019.

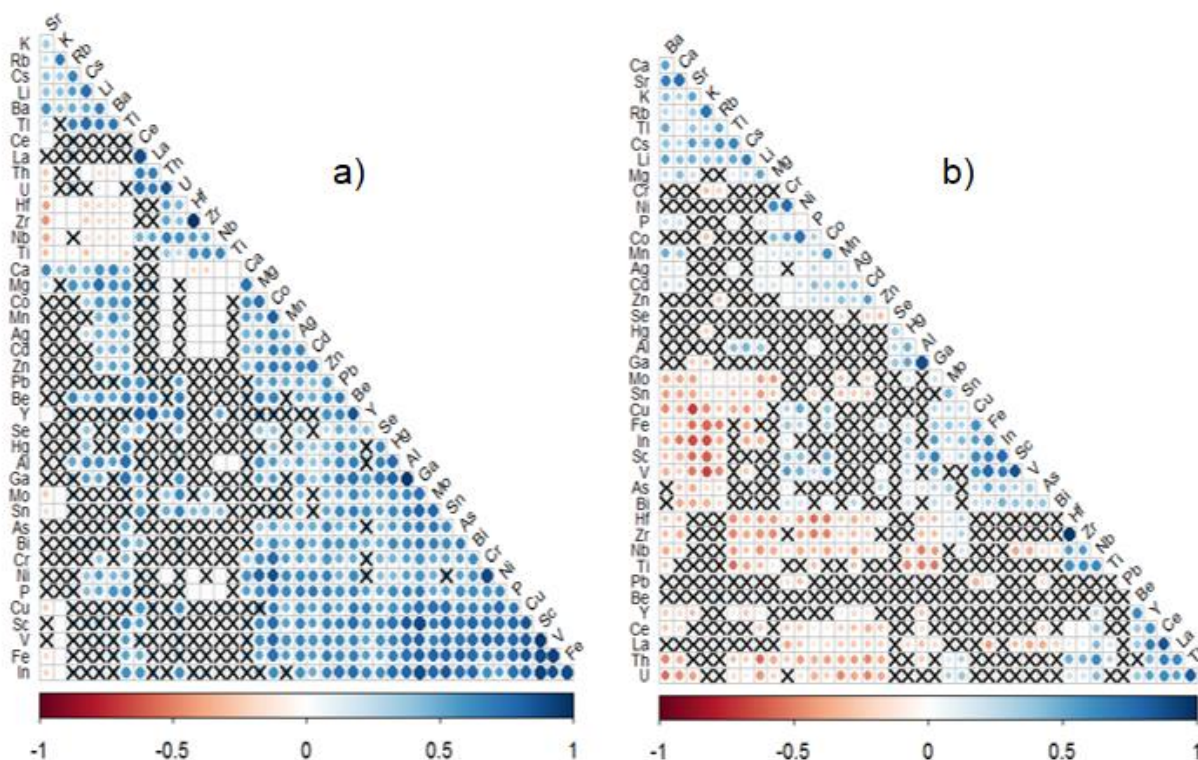
## 4.2 ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

A matriz de correlação de *Spearman* foi construída para o conjunto de dados brutos (Figura 6a) e transformados por  $\log_{10}$  (Figura 6a) e *clr* (Figura 6b), considerando um nível de significância de 0,01. As correlações expressas em cor vermelha denotam a existência de uma relação negativa, enquanto que aquelas em cor azul denotam uma relação positiva e, em ambas, quanto mais intensa a tonalidade, mais forte é o grau de correlação entre as variáveis.

Os resultados fornecidos com base nos dados brutos e transformados ( $\log_{10}$ ) mostraram a existência de um grau de correlação positiva, muito forte, entre Cr-Ni, Fe-V, Ga-Sc, Hf-Zr, In-Sc e Sc-V. Já os dados sob transformação *clr* exibiram uma matriz de correlação diferente das anteriormente mencionadas, na qual os resultados revelaram a existência de correlações fortes e muito fortes, positivas, entre Al-Ga, Ca-Sr, Ce-La, Co-Ni, Cr-Ni, Fe-V, Hf-Zr, In-Sc, In-V, K-Rb, Sc-V e Th-U; e, negativa, apenas entre Cu-Sr. A matriz numérica, de cada conjunto de dados, com seus respectivos coeficientes, é apresentada no Apêndice C.



**Figura 6** - Matriz de correlação de Spearman: a) dados brutos e  $\log_{10}$ ; b) *clr*.



Fonte: própria autora, 2019.

A análise de componentes principais foi realizada separadamente para os dados brutos, através dos quais foi possível obter oito componentes (com autovalores  $\geq 1$ ), que juntas explicam mais de 78% da variação dos dados (Tabela 2). A Componente Principal (PC) 1 é a que explica a maior parte da variabilidade dos dados, cerca de 33,7%, e as variáveis que mais contribuem nesta componente são Al, Co, Ga, In, P, Sc e V, por apresentarem pesos maiores (Figura 7a).

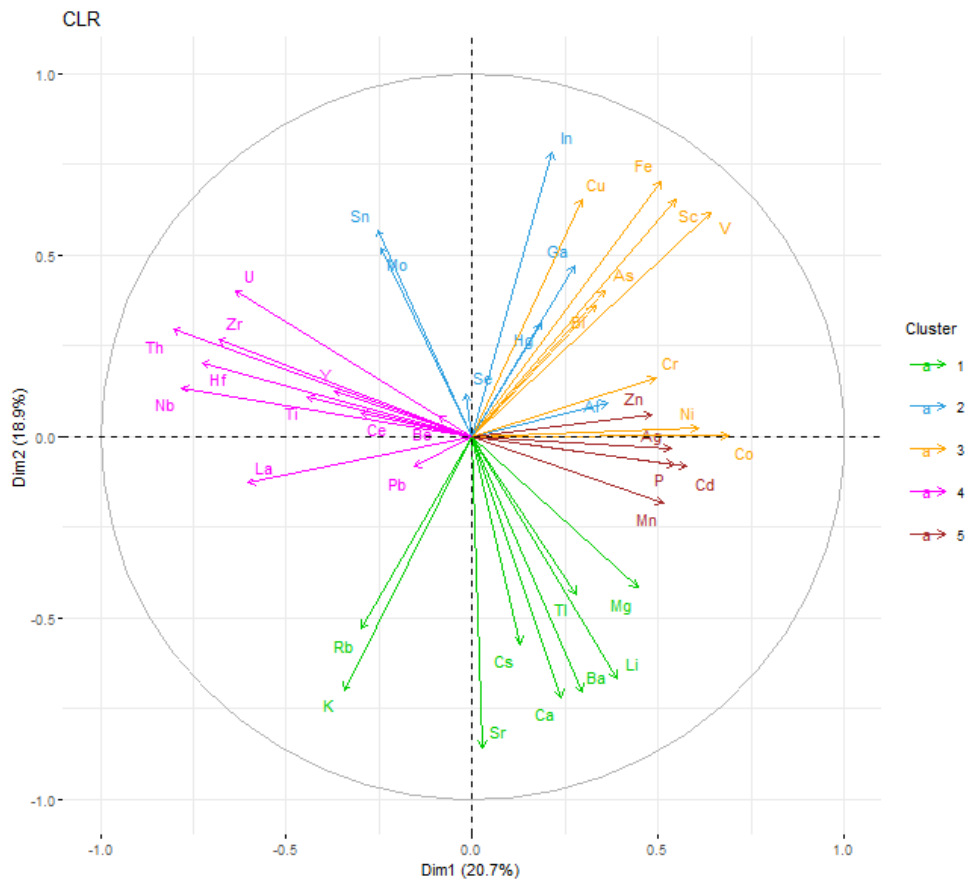
**Tabela 2** - Autovalores e variabilidade das oito componentes principais (dados brutos).

Componente	Autovalor	Variabilidade (%)	Acumulada (%)
1	13,82	33,70	33,70
2	5,86	14,30	48,00
3	3,78	9,22	57,22
4	2,53	6,18	63,40
5	2,22	5,43	68,83
6	1,44	3,52	72,35
7	1,34	3,28	75,62





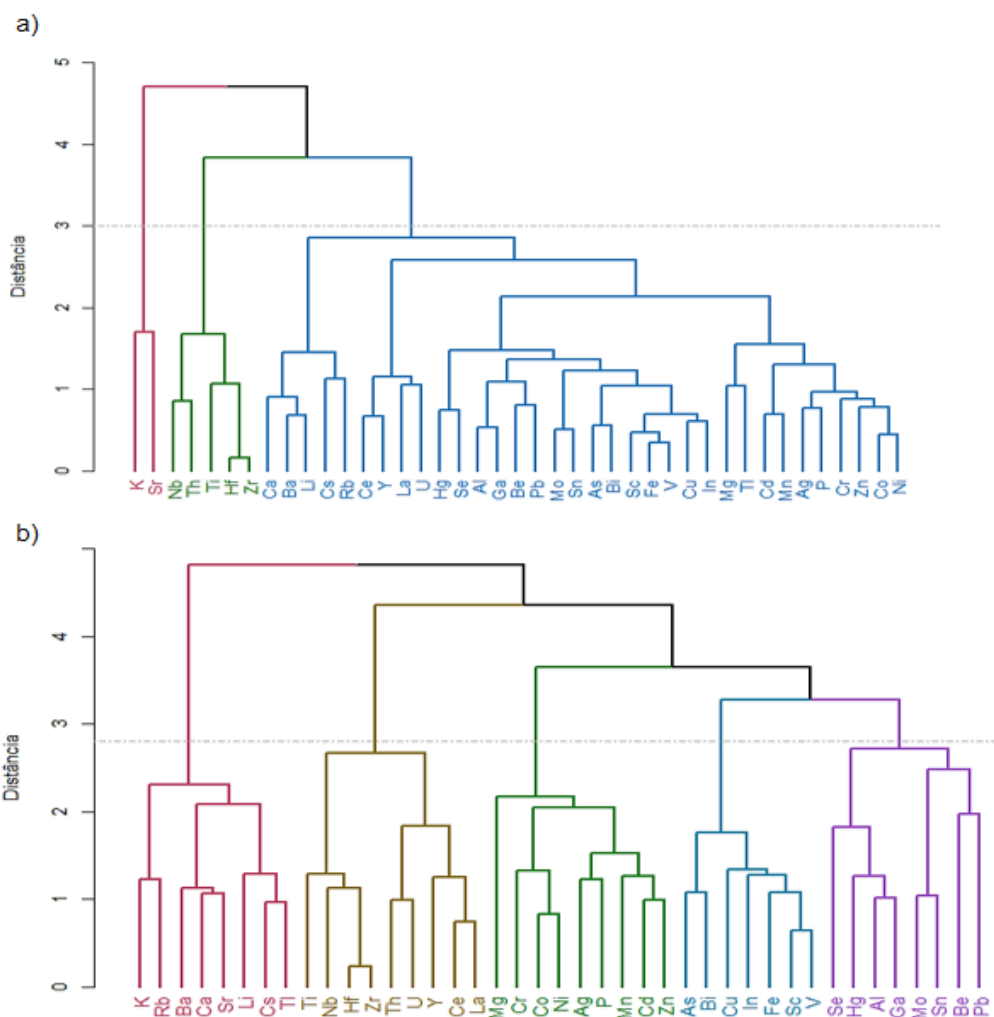
c)



Fonte: própria autora, 2019.

A análise de agrupamento assinalou concordâncias com as afinidades apontadas na correlação de *Spearman* e, em geral, as variáveis com menor distância entre si apresentaram maior grau de correlação. Para os dados brutos e sob transformação  $\log_{10}$  foram formados três grupos: Ca-Ba-Li-Cs-Rb-Ce-Y-La-U-Hg-Se-Al-Ga-Be-Pb-Mo-Sn-As-Bi-Sc-Fe-V-Cu-In-Mg-Tl-Cd-Mn-Cr-Ag-P-Zn-Co-Ni, Nb-Th-Ti-Hf-Zr e K-Sr; enquanto que para os dados submetidos à transformação *clr* foram formados cinco grupos: K-Rb-Ba-Ca-Sr-Li-Cs-Tl, Ti-Nb-Hf-Zr-Th-U-Y-Ce-La, Mg-Cr-Co-Ni-Ag-P-Mn-Cd-Zn, As-Bi-Cu-In-Fe-Sc-V e Se-Hg-Al-Ga-Mo-Sn-Be-Pb. A seguir são apresentados, graficamente, os agrupamentos para dados brutos (Figura 8a) e transformados por  $\log_{10}$  (Figura 8a) e *clr* (Figura 8b).

**Figura 8** - Dendrograma obtido a partir de análise de agrupamento: a) Dados brutos e  $\log_{10}$  b) *clr*.



Fonte: própria autora, 2019.

### 4.3 MAPAS GEOQUÍMICOS

Tendo em vista a dinâmica da BRP, a distribuição espacial das variáveis – em especial dos elementos potencialmente tóxicos – tem expressiva importância no contexto regional e, por essa razão, foram construídos mapas geoquímicos através da interpolação de dados previamente tratados da área de estudo. A seguir, é apresentada a distribuição espacial dos elementos selecionados para estudo detalhado (Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, V e Zn).

Nos sedimentos de corrente da BRP, o alumínio apresenta concentrações sempre acima do LD, valor mínimo de 1200 mg/kg e mediana de 9000 mg/kg, sendo, portanto, constituinte expressivo. Os teores mais elevados foram registrados nas porções central e em parte do norte da BRP, correspondentes, respectivamente, à

Bacia Carajás e ao Domínio Bacajá. Constata-se enriquecimento neste elemento em microbacias onde rochas metavulcânicas máficas a félsicas são dominantes (Figura 3 e 9a). Por outro lado, é muito acentuado o empobrecimento em Al em sedimentos de microbacias situadas no Alto Parauapebas, nos domínios Canaã dos Carajás – Sapucaia – Rio Maria (CC-S-RM), e na porção extremo norte do Domínio Bacajá. Isto mostra que em áreas de dominância de rochas quartzo-feldspáticas, como granitoides e granulitos félsicos, não houve concentração de Al. A relação deste elemento com rochas metavulcânicas máficas também é evidenciada pelo fato de ocorrer relativo enriquecimento nos sedimentos de microbacias nos domínios CC-S-RM em área de ocorrência dos *greenstone belts* do Grupo Sapucaia (Fig. 9a).

Os teores de Hg nos sedimentos não apontam anomalias significativas na BRP, tendo em vista que cerca de 9,5% das amostras exibiram teores abaixo do limite de detecção, além de uma mediana de 0,002 mg/kg e concentração máxima de 0,24 mg/kg, que inclusive não ultrapassou os níveis legais (CONAMA, 2012). A concentração de mercúrio nos sedimentos da BRP é mais elevada na região que abrange os domínios Bacajá e Bacia Carajás, com destaque para as maiores concentrações ao norte da Serra Norte, em área na qual é observada a presença de rochas granitoides tipo A neoarqueanas (Figura 9b). Em contraste, os teores mais baixos foram registrados nos domínios CC-S-RM, todavia, foram observados enriquecimentos pontuais em áreas de ocorrência de rochas máfico-ultramáficas e de *greenstone belts*.

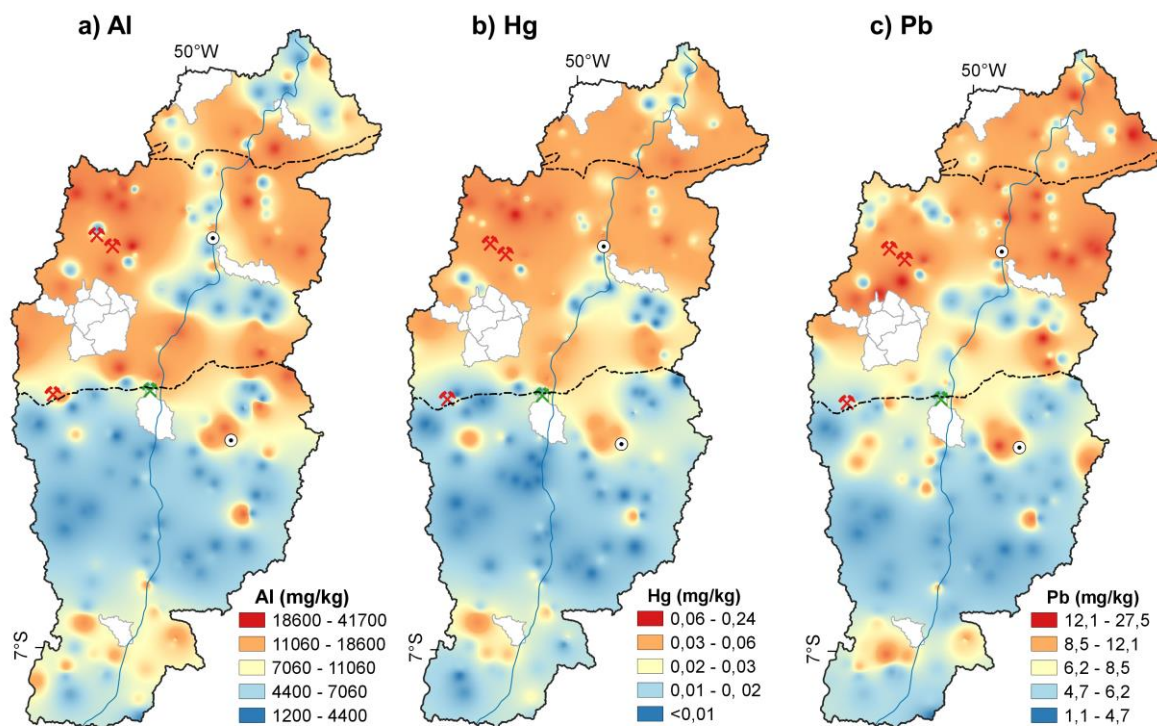
Os sedimentos de correntes da BRP exibiram teores de chumbo que variaram de 1,1 mg/kg até 27,5 mg/kg, com uma mediana de 7,05 mg/kg. Os teores mais expressivos foram registrados em microbacias do Domínio Bacajá e parte da Bacia Carajás, havendo nestas áreas anomalias localizadas (Figura 9c). Concentrações mais baixas foram notadas nos domínios CC-S-RM, porém, nas proximidades da cidade de Canaã dos Carajás, na área de influência do corpo máfico-ultramáfico do Vermelho, e no sul da bacia, onde ocorrem as rochas do Grupo Sapucaia. Todas as concentrações de chumbo enquadraram-se abaixo do nível 1, definido no CONAMA 454 (2012).

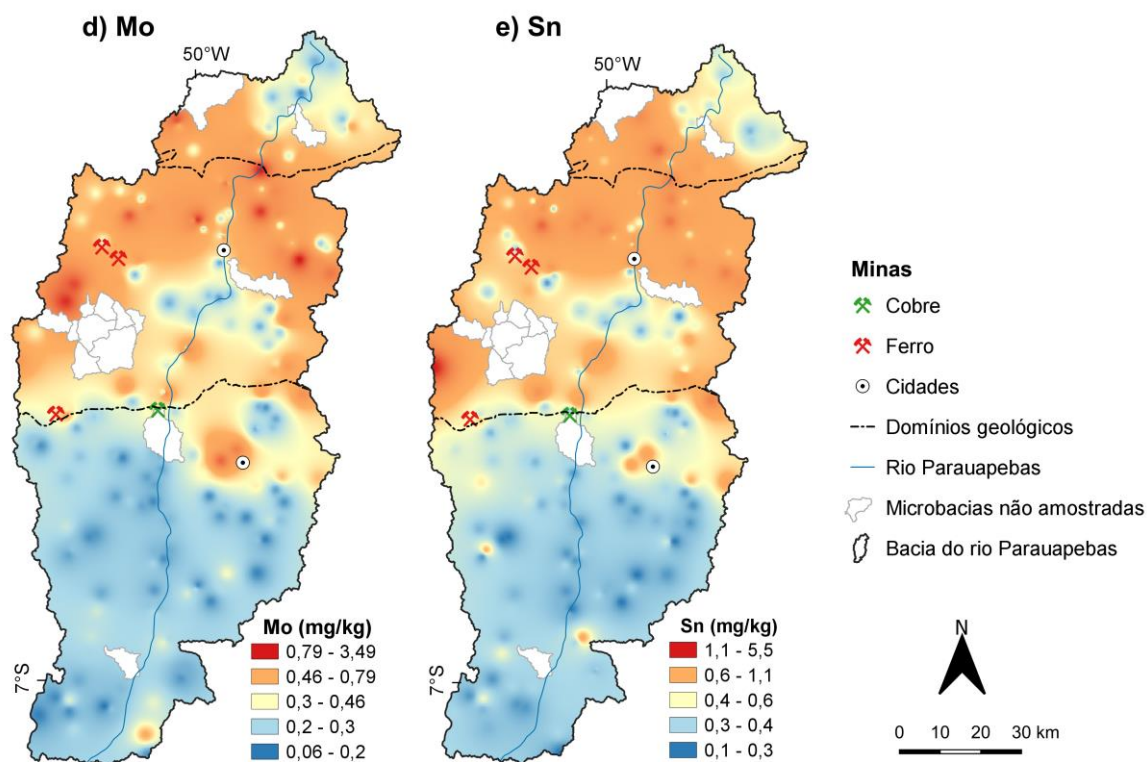
Em todas as microbacias avaliadas, o molibdênio exibiu valores acima do limite de detecção, com teores que variaram de 0,06 mg/kg até 3,49 mg/kg, com

mediana de 0,37 mg/kg. Os padrões de distribuição espacial revelaram concentrações mais elevadas de Mo na Bacia Carajás, se estendendo em direção ao norte, até o Domínio Bacajá, exceto em determinadas microbacias, situadas sobre coberturas sedimentares e rochas metavulcanossedimentares (Figura 9d). Todavia, embora marcante ao longo dos domínios geológicos mencionados, os maiores conteúdos desse elemento são pontuais, coincidentes com áreas onde é notada a presença de granitos anorogênicos e granitoides neoarqueanos tipo A. As mais baixas concentrações compreenderam quase que a totalidade das microbacias nos domínios CC-S-RM, formados principalmente por rochas granitoides TTG, granitos cálcico-alcalinos, tonalitos e sanukitoides.

O estanho registrou teores abaixo do limite de detecção em cerca de 3,7% das amostras, mediana de 0,5 mg/kg e valor máximo de 5,5 mg/kg. Sua distribuição espacial mostra forte analogia com aquela observada para o Mo (Fig. 9d, e), sendo as concentrações mais acentuadas de Sn presentes no Domínio Bacajá e na Bacia Carajás. Os menores teores deste elemento ocorrem em microbacias da porção sul da BRP, nos domínios CC-S-RM, nos quais há o enriquecimento de rochas granitoides.

**Figura 9** – Distribuição espacial: a) Al; b) Hg; c) Pb; d) Mo e e) Sn.





Fonte: própria autora, 2019.

A concentração mínima de ferro, que é um dos elementos mais abundantes na BRP, foi de 4200 mg/kg, enquanto que a mediana e o valor máximo correspondem a 19750 mg/kg e 354000 mg/kg, respectivamente. Os padrões de distribuição espacial do Fe apontaram para seu enriquecimento em microbacias situadas no Domínio Bacajá e na Bacia Carajás, onde rochas metavulcânicas e formações ferríferas bandadas são as principais constituintes do ambiente geológico. Os teores mais expressivos de Fe foram obtidos em microbacias localizadas nas proximidades das minas de N4 e N5 (Figura 10a). As investigações conduzidas por Sahoo et al. (2019) nos solos da BRP também indicaram maiores conteúdos deste elemento na BC, diferentemente do estudo realizado por Quaresma (2019), em águas superficiais, o qual mostrou teores mais elevados de Fe em outras regiões da BRP. Concentrações mais baixas de Fe são visualizadas nos domínios ao sul, CC-S-RM, e no extremo norte do DB.

O vanádio exibiu concentrações acima do limite de detecção em todas as microbacias avaliadas, com teores que variaram de 2 mg/kg até 410 mg/kg e uma mediana de 28,5 mg/kg. As maiores concentrações foram observadas na área central da BRP em direção ao norte da bacia, semelhantemente ao Fe, contudo os

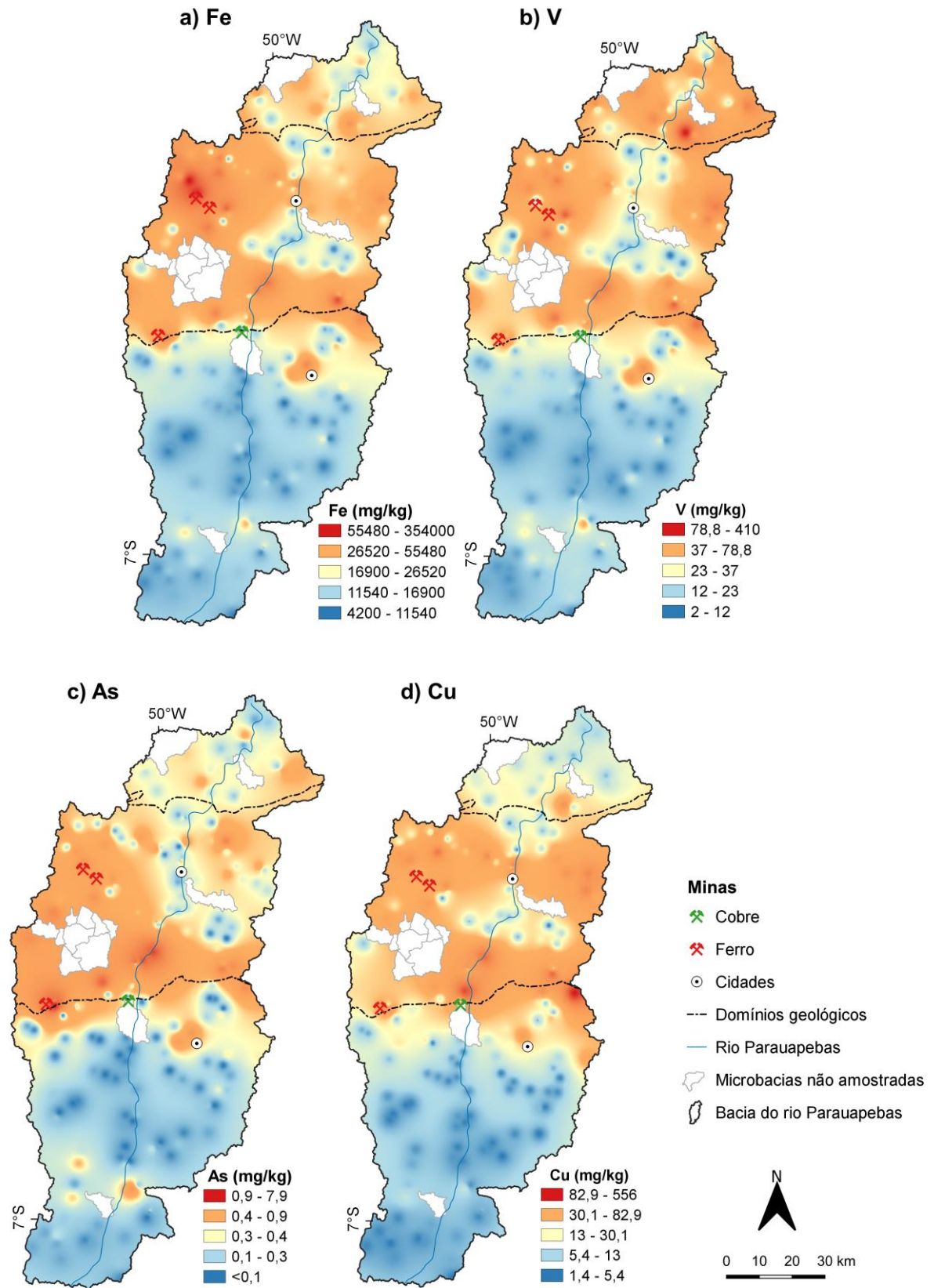


teores mais elevados foram notados em microbacias situadas no Domínio Bacajá, seguidas de outras contidas na Bacia Carajás (Figura 10b). Em contrapartida, as concentrações são mais baixas nos domínios CC-S-RM, exceto em zonas próximas a cidade de Canaã dos Carajás, onde ocorrem rochas máfico-ultramáficas.

O arsênio revela forte grau de correlação com Fe e V, porém seu conteúdo nos sedimentos de corrente é menos significativo, tendo em vista que cerca de 9,5% das amostras exibiram concentrações abaixo do limite de detecção. Este elemento teve um valor de mediana de 0,3 mg/kg e máximo de 7,9 mg/kg. O As é mais abundante na Bacia Carajás, sendo observados teores mais elevados nas proximidades da Serra Sul, os quais se estendem até a região central da BRP, a qual é caracterizada pela ocorrência dominante de rochas metavulcânicas. Em paralelo a isto, as microbacias com sedimentos mais empobrecidos em As estão localizadas nos domínios CC-S-RM e ao norte do DB (Figura 10c), embora enriquecimentos tenham sido registrados nas adjacências de Canaã dos Carajás. Todas concentrações de arsênio enquadraram-se abaixo do limite legal, nível 2, disposto na resolução CONAMA nº 454 (2012).

O cobre exibiu teores que variaram de 1,4 mg/kg até 556 mg/kg, com mediana de 20,35 mg/kg. Constataram-se peculiaridades na sua distribuição espacial ao longo da BRP, sendo as concentrações mais elevadas verificadas em microbacias da Bacia Carajás, porém em duas faixas distintas, ambas dispostas no sentido aproximado E-W. A primeira está localizada na altura da cidade de Parauapebas e a segunda acontece na zona de transição da Bacia Carajás com os domínios CC-S-RM (Figura 10d). Nessas áreas predominam rochas metavulcânicas e máfico-ultramáficas e formações ferríferas bandadas. O comportamento deste elemento é condizente com as características geológicas, pois é controlado pela existência dos cinturões norte e sul de cobre (MORETO et al., 2015), que correspondem a duas zonas de hidrotermalismo intenso e fortemente mineralizadas. O conteúdo máximo de Cu registrado na BRP foi cerca de três vezes maior que aquele apontado nos limites legais (CONAMA, 2012).

Figura 10 – Distribuição espacial: a) Fe; b) V; c) As e d) Cu.



Fonte: própria autora, 2019.

Cobalto, cromo e níquel apresentam grande semelhança em sua distribuição espacial nos sedimentos de corrente da RP (Fig. 11). O cobalto exibiu em todas as microbacias avaliadas teores acima do limite de detecção, com valores mínimo e máximo, respectivamente, de 0,8 mg/kg e 66,9 mg/kg, e mediana de 6,8 mg/kg. A distribuição de Co nos sedimentos de corrente, semelhantemente a do cromo, é mais marcante no Domínio Bacajá e na Bacia Carajás, sendo que as concentrações máximas ocorrem na porção leste da BC e no seu limite com os domínios CC-S-RM, assim como no extremo norte do DB (Figura 11a). As menores concentrações de Co foram registradas principalmente, nos domínios CC-S-RM, onde predominam granitoides arqueanos e, ainda, na porção norte e central da BC, onde se destacam, respectivamente, granitoides neoarqueanos do tipo A e coberturas sedimentares.

Os sedimentos de corrente da BRP registraram concentrações expressivas de cromo, com conteúdos mínimo e máximo de 4 mg/kg e 2630 mg/kg, respectivamente, e mediana de 30 mg/kg de, caracterizando-se, portanto, como um constituinte significativo na bacia. Espacialmente, o Cr está distribuído ao longo de todos os domínios geológicos da BRP, tendo os maiores teores sido verificados nas porções leste do Domínio Bacajá e da Bacia Carajás, enquanto que nos domínios CC-S-RM as maiores concentrações são visualizadas em sua porção nordeste, nas proximidades da cidade de Canaã dos Carajás e em parte do sul (Figura 11b). Percebe-se o enriquecimento neste elemento em microbacias onde rochas metavulcânicas, máfico-ultramáficas e sequências de *greenstone belts* são dominantes. Em contraste, teores menores são observados em microbacias onde há presença de coberturas sedimentares, granitoides diversos, granulitos félsicos, e rochas charnoquíticas. O conteúdo máximo de cromo registrado excedeu cerca de 29 vezes o nível 2 (CONAMA, 2012), todavia o valor de P90 é apenas ligeiramente superior ao daquele nível (Tabela 5).

Com padrões de distribuição espacial análogos aos de cromo e cobalto, o níquel, exibiu concentrações nos sedimentos da BRP que variaram de 1,1 mg/kg até 273 mg/kg, com uma mediana de 6,9 mg/kg. Os teores mais elevados estão dispostos na região leste, em todos os domínios geológicos, especialmente em áreas com abundância de rochas máfico-ultramáficas (Figura 11c), conforme exemplificado pelo corpo do Vermelho que, inclusive, abriga depósitos de níquel. Os

menores teores ocorrem na porção oeste do DB e em quase a totalidade dos domínios CC-S-RM. A quantidade máxima de Ni mensurada foi cerca de sete vezes maior que o nível 2, disposto como valor legal (CONAMA, 2012), porém o valor obtido para P90 é inferior ao do nível 2 (Tabela 5).

As concentrações de cádmio nos sedimentos de corrente da BRP foram pouco expressivas e cerca de 12,1% das amostras exibiram conteúdos abaixo do limite de detecção, o que se reflete no baixo valor da mediana do conjunto de dados (0,01 mg/kg; Tabela 1). A distribuição deste elemento aponta que tende a exibir maiores concentrações na porção oeste da Bacia Carajás e no nordeste do Domínio Bacajá, com destaque para valores mais elevados nas proximidades da Serra Norte (Figura 11d). Verifica-se que os maiores teores ocorrem em microbacias em que há abundância de rochas metavulcânicas. As concentrações de Cd obtidas não ultrapassaram os limiares legais, dos níveis 1 e 2 (CONAMA, 2012).

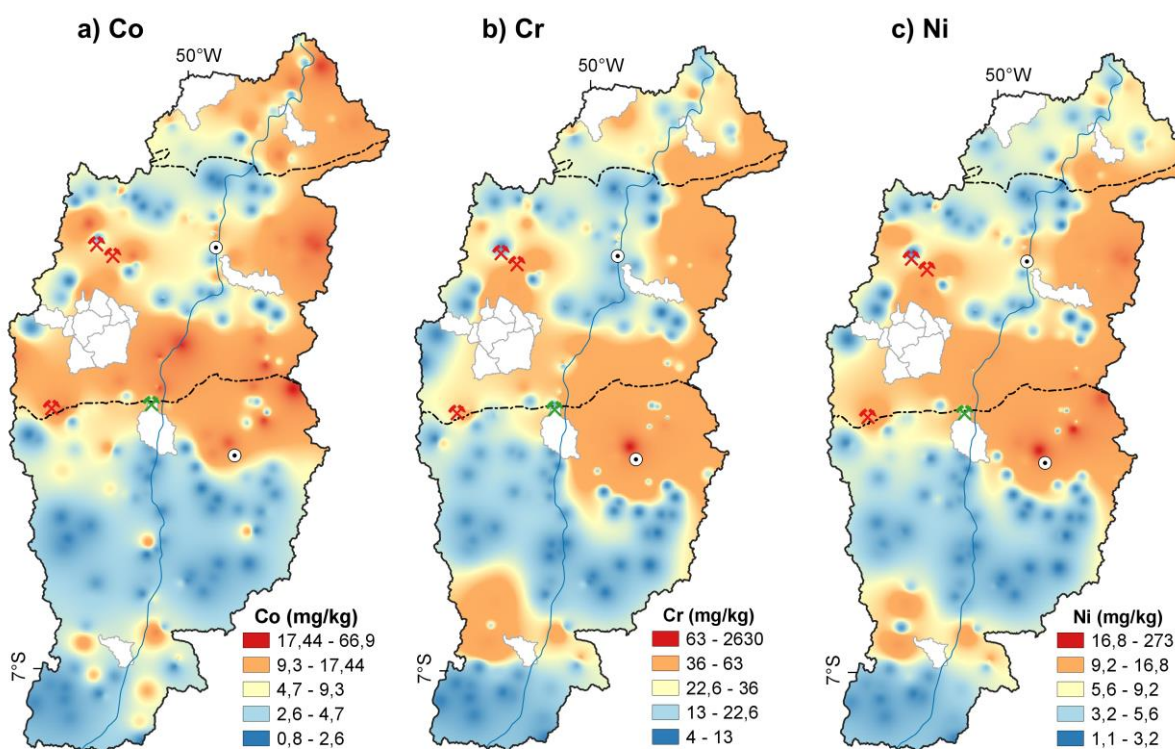
O zinco sempre exibiu concentrações acima do limite de detecção nos sedimentos de corrente da BRP, as quais variaram de 3 mg/kg até 304 mg/kg, apresentando uma mediana de 19 mg/kg. Em termos de sua distribuição espacial, nota-se que os valores mais elevados se concentram especialmente na porção oeste da Bacia Carajás, cabendo destacar que os valores máximos são observados nas adjacências da Serra Norte. Também foram registrados conteúdos expressivos no nordeste da BC e no leste do Domínio Bacajá (Figura 11e). Isto mostra que o Zn se concentra preferencialmente em áreas onde há dominância de rochas metavulcânicas. Em contrapartida, os conteúdos mais baixos estão presentes em microbacias que drenam os domínios CC-S-RM e em alguns pontos específicos do DB e da BC. Todas as concentrações de Zn obtidas estão de acordo com os limiares legais, enquadrando-se abaixo do nível 2 (CONAMA, 2012).

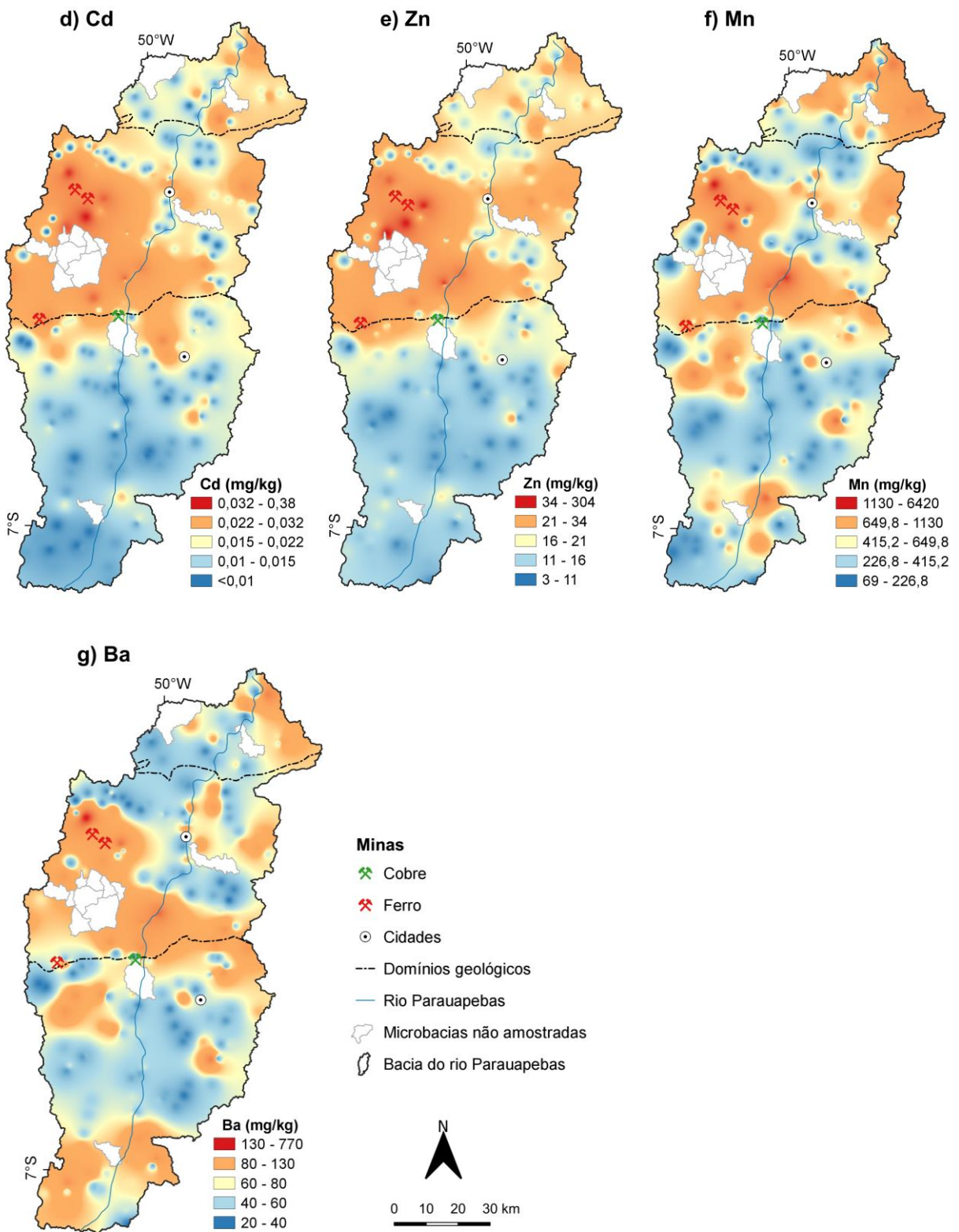
Todos os teores de manganês se situaram acima do limite de detecção, exibindo valores que variaram de 69 mg/kg até 6420 mg/kg, com uma mediana de 542,5 mg/kg, mostrando ser ele um elemento significativo na composição dos sedimentos de corrente. As concentrações mais elevadas de Mn distribuem-se ao longo dos diferentes domínios geológicos da BRP, porém são mais marcantes em regiões onde é observada a presença de rochas metavulcânicas, máfico-ultramáficas e *greenstone belts* (Figura 11f). Por outro lado, as microbacias mais

empobrecidas em Mn estão localizadas em zonas com ocorrências de associações de granitoides e granulitos félsicos arqueanos, e granitos anorogênicos e coberturas sedimentares paleoproterozoicos. Finalmente, embora se situem em grupamentos distintos Mn e Co possuem distribuição espacial análoga e mostram forte correlação, o que sugere alguma afinidade entre eles.

Os teores de Ba se situam acima do limite de detecção em todas as microbacias, expressando, respectivamente, valores mínimo de 20 mg/kg e máximo de 770 mg/kg, e mediana de 70 mg/kg (Figura 11g). O seu padrão de distribuição espacial aponta a ocorrência de valores mais elevados (acima de 80 mg/kg) nos três domínios geológicos da BRP, tanto na porção leste do Domínio Bacajá, quanto nas porções sul e noroeste da Bacia Carajás e em microbacias situadas no norte e sul dos domínios CC-S-RM. Não há um controle litológico muito evidente que explique a distribuição do Ba na BRP, pois os teores mais elevados ocorrem em microbacias situadas em áreas de dominância de litologias muito diversificadas.

**Figura 11** – Distribuição espacial: a) Co; b) Cr; c) Ni; d) Cd; e) Zn; f) Mn e g) Ba.





Fonte: própria autora, 2019.

#### 4.4 VALORES DE BACKGROUND GEOQUÍMICO

Os limites superiores de *background* geoquímico para Al, Fe e elementos potencialmente tóxicos nos sedimentos ativos de corrente da BRP, calculados através de diferentes métodos estatísticos, tais como iterativa  $2\sigma$ , função distribuição calculada, mediana + 2\*desvio absoluto da mediana, *Tukey inner fence* e percentis (75, 90, 95 e 98), bem como os teores considerados prejudiciais à biota aquática, de acordo com a resolução nº 454 CONAMA (2012), são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5** - Limite superior de *background* para Al, Fe e elementos potencialmente tóxicos em sedimentos ativos de corrente na bacia do rio Parauapebas, através de diferentes técnicas, e valores legais (CONAMA 454). Todas as concentrações estão em mg/kg.

	I2 $\sigma$	FD	MAD	TIF	P75	P90	P95	P98	N2
<b>Al</b>	10754	17350	-	-	15924	24459	27654	33231	*
<b>As</b>	0,51	0,61	2,4	4,57	0,7	1,6	2,36	3,88	17
<b>Ba</b>	110	122,3	234,42	354,81	110	171	210	274,3	*
<b>Cd</b>	0,02	0,01	0,08	0,06	0,02	0,07	0,11	0,2	3,5
<b>Co</b>	5,7	14,4	-	-	15,1	27,9	42,5	51,4	*
<b>Cr</b>	45,2	61,9	190,55	331,13	51,75	95,2	138,1	275,1	90
<b>Cu</b>	14	46,9	512,86	-	55,19	140,02	176,96	288,53	197
<b>Fe</b>	23596	36426	120226	295120	46050	90983	129456	177623	*
<b>Hg</b>	0,04	0,04	0,16	-	0,05	0,07	0,1	0,13	0,486
<b>Mn</b>	758,7	1117	3548,13	6382,63	963	1847,85	2563,69	3387,44	*
<b>Mo</b>	0,5	0,7	1,95	-	0,7	1,21	1,69	2,92	*
<b>Ni</b>	8	13,8	45,71	88,1	13,27	33,98	46,78	100,27	35,9
<b>Pb</b>	8,5	12,1	23,44	-	11,1	15,89	22	24,77	91,3
<b>Sn</b>	0,6	0,9	2,29	4,68	0,9	1,51	1,9	2,36	*
<b>V</b>	34,5	58,7	234,42	-	64,24	127,2	162	188,37	*
<b>Zn</b>	28,7	35	60,26	88,1	7,37	11,35	18,38	27,22	315

**Nota:** I2 $\sigma$ : Iterativa 2 $\sigma$ . FD: Função Distribuição calculada. MAD: *Median Absolute Deviation*. TIF: *Tukey inner fence*. P75, P90, P95 e P98: Percentis. N2: Concentração do nível 2 apresentada na

resolução CONAMA 454/2012. (-): valor de *background* além da concentração máxima. (\*): não há valores para este elemento.

**Fonte:** própria autora, 2019.

Os limites inferiores de *background* apresentaram, em sua maioria, valores abaixo da concentração mínima dos elementos e, em alguns casos, abaixo até mesmo do limite de detecção do método analítico, por isso não compõem a Tabela 5. O método de representação *boxplot* (também chamado de *TIF*) forneceu resultados superestimados para Al, Co, Cu, Hg, Mo, Pb e V, verificando-se o mesmo com os valores fornecidos pela técnica mediana + 2 \* desvio absoluto da mediana (também chamada de *MAD*), entretanto somente para Al e Co. Em razão disso, tais valores não foram apresentados na Tabela 5.

Dentre os limites superiores de *background* estimados (Tabela 5), a técnica iterativa  $2\sigma$  forneceu os menores resultados, com valores situados sempre abaixo do percentil 75, exceto para Zn., enquanto que *TIF* entregou os maiores. A função distribuição calculada semelhantemente à iterativa  $2\sigma$ , indicou valores conservadores, que se aproximaram daqueles do percentil 75 e se situaram sempre abaixo do percentil 90, exceto no caso do Zn. A *MAD* mostrou teores mais elevados, em geral, situados entre os percentis 95 e 98, exceto para Cd, Fe e Ni que se concentraram entre os percentis 90 e 95, e também, Cu, V e Zn que exibiram valores superiores aos do percentil 98 (Tabela 5).

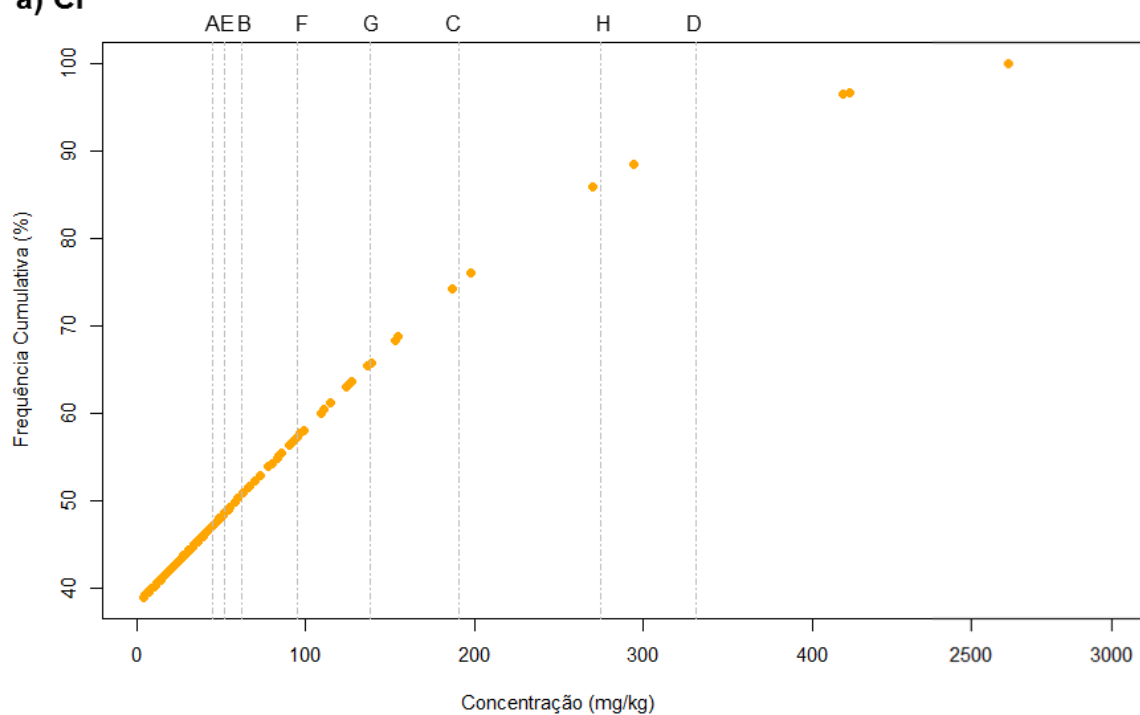
Observando a resolução n° 454 (CONAMA, 2012), constata-se que as técnicas *MAD*, *TIF* e percentil 98 estimaram limites superiores de *background* para Cr, Cu e Ni que ultrapassaram os valores legais designados. O mesmo ocorreu para as concentrações fornecidas pela técnica P95 para Cr e Ni, e pela P90 somente para Cr. Em contrapartida os teores de As, Cd, Hg, Pb e Zn, em todos os métodos estatísticos utilizados, concentraram-se abaixo do limite legal considerado prejudicial à biota aquática (Tabela 5).

Os gráficos da curva de frequência acumulada destacando os valores de *background* fornecidos pelas técnicas iterativa  $2\sigma$ , função de distribuição, mediana + 2 \* desvio absoluto da mediana, *TIF* e percentis (75, 90, 95 e 98) para os elementos Cr, Cu e Ni constam da Figura 12.

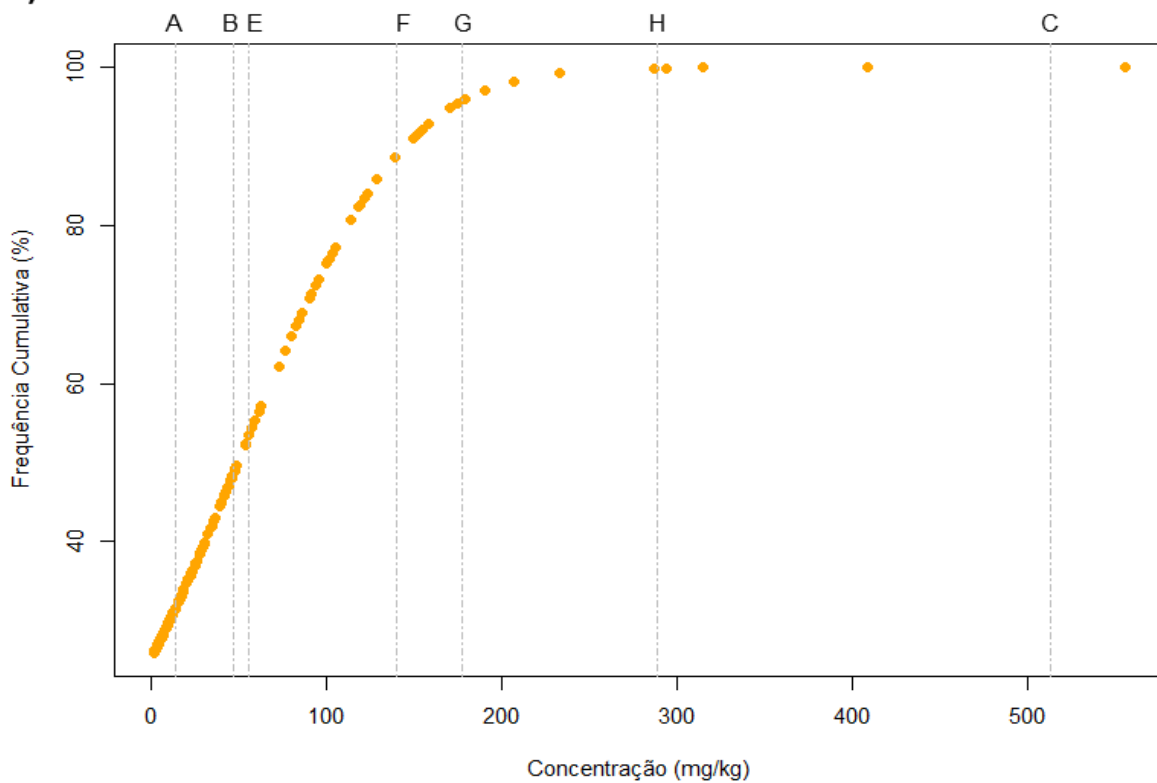


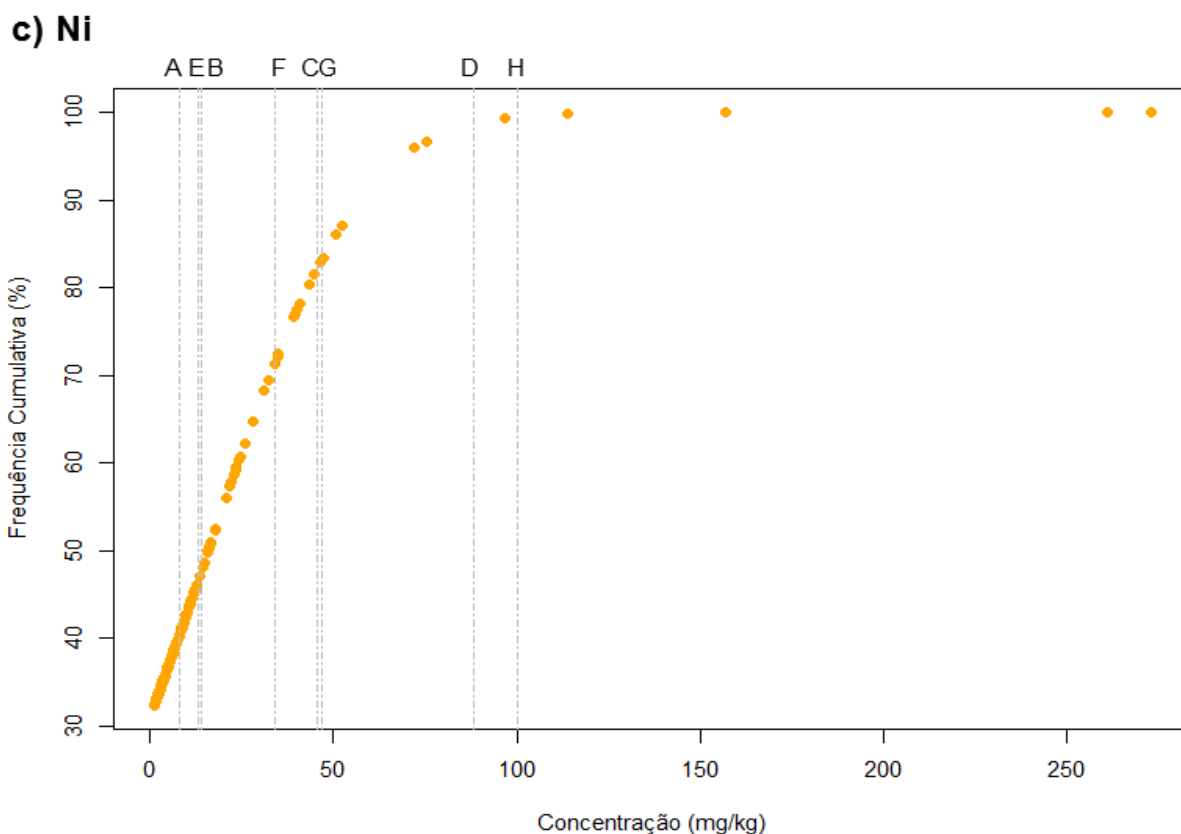
Figura 12 – Gráficos de frequência acumulada. a) Cr; b) Cu e c) Ni.

a) Cr



b) Cu





**Nota:** A – Técnica iterativa; B – Função de distribuição; C – Mediana + 2\* desvio absoluto da mediana; D – TIF; E – Percentil 75; F – Percentil 90; G – Percentil 95; H – Percentil 98.

**Fonte:** própria autora, 2019.

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 INFLUÊNCIA GEOGÊNICA *VERSUS* ANTROPOGÊNICA NOS SEDIMENTOS DE CORRENTE DA BRP

A assinatura geoquímica de dada matriz ambiental traduz importantes informações acerca da litologia local e a sua identificação pode contribuir consideravelmente para a compreensão da origem dos elementos. No caso da bacia do rio Parauapebas, pode ser claramente observado através do mapeamento geoquímico realizado na região para Al, Fe e elementos potencialmente tóxicos (Figura 9 a Figura 11), associado à análises estatísticas multielementares, que o ambiente geológico e as litologias dominantes têm forte influência sobre a assinatura geoquímica dos sedimentos ativos de corrente.

Distintos conjuntos de dados (brutos,  $\log_{10}$  e *clr*) foram empregados na tentativa de compreender o comportamento dos elementos, o que demonstrou acentuados contrastes entre eles. Todavia, os dados geoquímicos são sujeitos ao denominado efeito de fechamento (do inglês, *closure effect*), o qual não permite que

as relações mais intrínsecas sejam facilmente notadas (REIMANN et al., 2008). Tais contrastes podem ser constatados nos resultados da análise de componentes principais (Figura 7) e agrupamento hierárquico (Figura 8).

Com base na análise de componentes principais, conduzida sob os dados com transformação *clr*, os elementos considerados concentraram-se em cinco grupos (*clusters*) diferentes, os quais apontaram associações que possuem maiores afinidades geoquímicas, que remetem ao cenário geológico local.

O primeiro agrupamento (Rb, K, Cs, Sr, Ca, Ba, Tl, Li e Mg) é, exceto o Tl, constituído essencialmente por elementos alcalinos e alcalinos-terrosos, comumente enquadrados entre os *Large Ion Lithophile Elements (LILE)* que em geral exibiram correlações positivas entre si. Isto conduz ao entendimento que a afinidade geoquímica apontada entre esses elementos nas diferentes microbacias indica proveniências similares, sendo, neste caso, as fontes mais prováveis rochas constituídas por minerais silicatados (MONTGOMERY, 2010) dos grupos dos feldspatos (K, Ca, Rb, Sr, Ba) e micas (K, Mg, Li, Rb, Ba). O mapeamento geoquímico registrou ao longo de toda BRP, enriquecimento relativo de Ba em áreas com abundância de rochas quartzo-feldspáticas, como granitoides e granulitos félsicos e granitos cálcico-alcalinos (Figura 11g). Ainda que a origem dominante desses elementos seja de caráter geogênico, contribuições antropogênicas não podem ser desconsideradas, tendo em vista que na área onde estão situados os domínios Canaã dos Carajás – Sapucaia – Rio Maria foram registrados os mais profundos processos de antropização na bacia (SOUZA-FILHO et al., 2016).

O segundo agrupamento é formado pela associação dos elementos Sn, Mo, In, Hg, Al, Ga e Se, ainda que alto grau de correlação tenha sido evidenciado somente entre Al e Ga, os quais são conhecidos por exibirem durante o processo de intemperismo comportamentos similares (KABATA-PENDIAS, 2001). Os conteúdos de Sn, Mo, In, Hg e Se na BRP podem possivelmente estar associados aos processos de hidrotermalismo responsáveis pela geração das mineralizações de Cu, especialmente na forma de minerais sulfetados ou, no caso do estanho, óxidos (KABATA-PENDIAS, 2001; KABATA-PENDIAS; MUKHERJEE, 2007; MORETO et al., 2015). Corroborando esta ideia, o mapeamento geoquímico apontou que as

maiores concentrações de Hg, Mo e Sn são observadas nas proximidades do cinturão norte de cobre.

O terceiro agrupamento é formado por Cu, Fe, Sc, As, V, Bi, Ni, Cr e Co, elementos que, em grande parte, mostraram correlações significativas. As correlações existentes entre As, Fe e V, embora mais expressiva entre os dois últimos, torna evidente a afinidade geoquímica entre esses elementos que, inclusive, mostraram tendência de distribuição espacial semelhantes (Figura 10a, b e c, respectivamente), a qual está intrinsecamente associada ao contexto geológico marcado pelo predomínio de rochas metavulcânicas da Formação Parauapebas e formações ferríferas bandadas da Formação Carajás (BEISIEGEL et al., 1973). Neste cenário, sugere-se ainda que o enriquecimento de As esteja relacionado com reações a partir de rochas sedimentares e metavulcânicas ricas em Fe e sulfetos (GUSTAFSSON; BHATTACHARYA, 2007; MIKKONEN et al., 2019).

Embora o Cu esteja associado aos elementos do terceiro agrupamento, possui um comportamento espacial peculiar, uma vez que a sua abundância na BRP é nitidamente um reflexo do ambiente geológico, sendo fortemente condicionada pelos cinturões norte e sul do Cu (Figura 10d). Depósitos deste elemento são conhecidos nas proximidades da faixa que corresponde ao cinturão sul (Sossego, Cristalino, Alvo 118, Bacaba, Castanha, Visconde, Bacuri e Jatobá; MORETO et al., 2015) e também ao longo do Cinturão Norte (Serra Verde).

Cobalto, Cr e Ni também mostraram correlações expressivas e padrões semelhantes de distribuição espacial (Figura 11a, b e c, respectivamente). A maior concentração destes elementos se dá em rochas máficas e ultramáficas e isto explica porque no caso da BRP teores mais elevados dos mesmos nos sedimentos de correntes foram observados em regiões nas quais são dominantes unidades litológicas constituídas por rochas máfico-ultramáficas e máficas (SALOMÃO et al., submetido). O depósito de Ni do Vermelho, situado nas proximidades de Canaã dos Carajás, corrobora esta ideia.

Correlações significativas foram apontadas entre Hf e Zr, e também, entre Th e U, os quais são elementos que fazem parte do quarto agrupamento, que é composto ainda por La, Ce, Nb, Ti, Y, Be e Pb. Os elementos deste grupo correspondem aos denominados *high-field strength elements*. Eles tendem a se

concentrar em rochas ricas em sílica tais como os granitos, em particular naqueles de tendência alcalina, e charnockitos. Como não foi feito tratamento estatístico, nem estudada a distribuição espacial destes elementos, pouco se pode dizer sobre possíveis controles de sua ocorrência na bacia, mas se pode supor que estejam mais fortemente ligados com os granitos neoarqueanos e paleoproterozoicos tipo A e, no caso do Domínio Bacajá, com os granulitos félsicos.

Por outro lado, valores anômalos de Pb, constatados pontualmente em algumas regiões da BRP (Figura 9c), poderiam estar associados a fontes antropogênicas. Seguindo este raciocínio, os sedimentos de corrente teriam atuado como meio de acumulação para este elemento, especialmente em áreas próximas de cidades, uma vez que dentre as suas diversas fontes, o Pb pode ser proveniente do descarte de lodo de esgoto de áreas urbanas (GUILHERME et al., 2005). Entretanto, não há evidências conclusivas de que haja relação entre os valores mais elevados de Pb e a proximidade dos principais núcleos urbanos da BRP (Fig. 9c). Além disso, cabe destacar que o conteúdo máximo de Pb em sedimentos de corrente (27,5 mg/kg; Tabela 1) é nitidamente inferior ao valor de N2 definido na Resolução CONAMA 454 (91,3 mg/kg; Tabela 5), não havendo em tese riscos ambientais em relação a este elemento na BRP até o momento.

O quinto agrupamento, composto por Mn, Zn, Cd, Ag e P, não registrou correlações expressivas. Todavia Zn e Cd são elementos que possuem afinidade geoquímica e exibiram comportamentos similares com o Mn em determinadas regiões. A presença de Ag possivelmente esteja relacionada com a sua forte afinidade geoquímica com o conteúdo de MnO<sub>2</sub> em solos (KABATA-PENDIAS, 2001). Há enriquecimento natural de Mn e Zn em rochas máficas e isto se reflete na distribuição espacial desses elementos nos domínios geológicos abrangidos pela BRP (Fig. 11e, f).

Vale ressaltar que, no caso do Mn, os teores mais elevados nos sedimentos ativos de corrente da BRP ocorrem principalmente na porção oeste da Bacia Carajás, diferentemente do que foi observado em águas superficiais em que teores relativamente baixos deste elemento foram registrados nesta mesma área, ao passo que o enriquecimento em Mn foi observado em outras áreas, intensamente desmatadas (QUARESMA, 2019; SALOMÃO et al., 2018). Este contraste indica que

em regiões florestadas o Mn exibe comportamento distinto daquele verificado em áreas desmatadas, onde a intervenção humana é intensa. A porção oeste da Bacia Carajás faz parte do mosaico de Unidades de Conservação (UCs), no qual a cobertura pela vegetação é responsável por manter o solo mais agregado, reduzindo a intensidade dos processos erosivos e de lixiviação para os corpos d'água, contrariamente ao que se verifica em áreas desmatadas. Por outro lado, o estudo geoquímico realizado nos solos da BRP (SAHOO et al., 2019), semelhantemente aos sedimentos, apontou significativos conteúdos de Mn também na região que hospeda o mosaico de UCs. Isto indica que o enriquecimento deste elemento, tanto nos solos quanto nos sedimentos, está relacionada com a composição geológica da bacia.

## 5.2 COMPARAÇÃO COM A ASSINATURA GEOQUÍMICA DO LEVANTAMENTO GEOQUÍMICO DE SEDIMENTOS DE CORRENTE DA CPRM

As características geológicas de determinada área contribuem consideravelmente na assinatura geoquímica de uma matriz ambiental. No entanto, outros aspectos precisam ser considerados, como é o caso de alterações causadas por ações antropogênicas que podem surgir ao longo do tempo e modificar as condições ambientais. Para que possíveis mudanças sejam identificadas é indispensável que haja comparabilidade entre as pesquisas, isto é, todos os métodos empregados, incluindo procedimentos de amostragem e de análises necessitam ser, até onde possível, coincidentes.

Os resultados de levantamento geoquímico de sedimentos de corrente, oriundos de projetos da CPRM (2012, 2013) executados na região de Carajás e Sapucaia, foram avaliados e discutidos em detalhe por Salomão (2019b) e, por terem sido obtidos com o mesmo tipo de metodologia e cobrirem área contida parcialmente na BRP (Figura 1b) foram comparados com aqueles alcançados nesta pesquisa. Nos projetos da CPRM para a caracterização da assinatura geoquímica dos sedimentos foram identificadas quatro associações elementares: 1) Ni, Cu e Cr; 2) Fe, Mn, Co e V; 3) Sn e Mo; 4) Zn, Pb e Ba (SALOMÃO, 2019b). Enquanto que para os dados relativos ao projeto *background* na BRP foram definidos cinco agrupamentos, mencionados em discussões anteriores.

Em ambas as pesquisas, os maiores teores de cobre foram percebidos na bacia Carajás, notadamente na região do Cinturão Sul do Cobre (MORETO et al., 2015). Quando comparadas as concentrações máximas, o valor exposto por Salomão et al. (2019b) foi ligeiramente superior (561 mg/kg). Isto reforça as evidências de que o elemento em questão tem uma ocorrência natural e marcante na área.

Tanto no presente estudo, quanto naquele realizado por Salomão et al. (2019b), Cr e Ni exibiram altos coeficientes de correlação e – especialmente – mostraram comportamentos análogos, os quais permitiram inferir que a ocorrência desses elementos nos sedimentos de corrente é grandemente controlada pelo ambiente geológico, assim como verificado em outros trabalhos (MIMBA et al., 2018). Porém, os teores máximos referentes ao projeto *background* exibiram um aumento acentuado quando comparados com aqueles obtidos nas amostras de 2012 e 2013 (cromo: 2630 mg/kg vs. 1217 mg/kg; níquel: 273 mg/kg vs. 124,1 mg/kg; respectivamente), e a mesma tendência é observada nos valores de mediana. Seria possível supor que as concentrações de Cr e Ni tenham aumentado em razão das alterações na forma de uso e cobertura do solo na bacia, as quais já foram notadas ao longo das últimas décadas (SOUZA-FILHO et al., 2016), porém as transformações mais acentuadas, relacionadas com a substituição de floresta tropical por pastagens, ocorreu essencialmente em período anterior aos levantamentos da CPRM. Conclui-se que este contraste precisa ser mais bem investigado, mesmo porque ele se verifica para a maioria dos elementos considerados no presente trabalho.

A relação entre Fe e V proporcionou elevados coeficientes de correlação em ambas as pesquisas e isto foi reforçado pelos padrões semelhantes de distribuição espacial que exibem, em consonância com o ambiente geológico da região, o qual é constituído por formações ferríferas bandadas associadas com rochas metavulcânicas máficas a félsicas. Neste estudo, a ocorrência de ferro e vanádio foi marcante na Bacia Carajás com concentrações máximas observadas na Serra Norte, área esta não alcançada nas amostragens dos projetos da CPRM (2012, 2013). Por outro lado, teores relativamente elevados de V também foram observados no Domínio Bacajá que também não está inserido na amostragem dos projetos

anteriormente mencionados. Em razão disso, os trabalhos em questão não são passíveis de serem confrontados quanto às suas respectivas quantidades máximas.

Nos estudos em discussão, foram observados tendências de distribuição espacial semelhantes e fortes coeficientes de correlação entre Co e Mn, o que corrobora a existência de uma afinidade geoquímica entre eles e, além disso, sugere que os seus respectivos enriquecimentos na bacia possuam origens similares (KABATA-PENDIAS; SZTEKE, 2015). Indiscutivelmente, as maiores ocorrências desses elementos estão presentes na Bacia Carajás e, comparando os resultados dos dois levantamentos, foram notados aumentos nos valores de mediana do projeto *background* em relação aqueles apresentados por Salomão et al. (2019b) (Co: 6,8 mg/kg vs. 2,5 mg/kg; Mn: 542,5 vs. 316 mg/kg).

Molibdênio e Sn exibiram nos dois estudos comportamentos análogos quanto aos seus padrões de distribuição espacial e valores de mediana igualmente muito próximos. Salomão et al. (2019b) mencionaram que estes elementos estão concentradas em zonas com ocorrência de rochas graníticas, assim como também é relatado na presente pesquisa, o que reforça a influência dominante das características geológicas da área na assinatura geoquímica dos sedimentos de corrente.

Os resultados dos projetos da CPRM (2012, 2013) mostraram correlações moderadas entre Ba, Pb e Zn, e resultado semelhante também foi obtido no presente estudo, assim como em outras áreas (SCHOBBER; BOER; SCHWARTE, 2018). Entretanto, não há grande semelhança nos padrões de distribuição dos elementos mencionados. As concentrações máximas de Ba (1122 mg/kg) e Pb (108,8 mg/kg) registradas por Salomão et al. (2019b) foram superiores àquelas do projeto *background* (Ver Tabela 1), porém os valores das medianas dos dois elementos são inferiores no caso do levantamento da CPRM. Em zonas onde há dominância de rochas granitoides, o Ba exibiu tendências similares em ambos estudos, isto sugere que as fontes de contribuição sejam as mesmas. Por sua vez, o Pb também apresentou distribuição espacial semelhante nos dois levantamentos, no entanto sua origem não é tão claramente definida, devendo estar relacionada pelo menos em parte com o intemperismo de rochas (SALOMÃO et al., 2019b), porém podendo também refletir ações humanas, tais como fundição de metais não-



ferrosos, descarte no ambiente de lodo de esgoto e produtos de deposição atmosférica (GUILHERME et al., 2005).

O conteúdo máximo e o valor da mediana de Zn foram mais elevados nos dados do projeto *background*, porém, especialmente, os resultados de ambas as pesquisas mostraram grande semelhança, com as concentrações mais acentuadas situadas na bacia Carajás e as mais baixas nos domínios CC-S-RM. Isto leva a presunção que os teores mais elevados desse elemento nos sedimentos sejam produto de intemperismo de rochas máficas provavelmente hidrotermalizadas contendo talvez esfalerita (WEDEPOHL, 1978).

Finalmente, na discussão com base nos dados geoquímicos dos projetos mencionados, pode-se perceber que os elementos verificados (bário, cádmio, cobalto, cromo, cobre, ferro, mercúrio, manganês, molibdênio, níquel, chumbo, estanho, vanádio e zinco) mantiveram um padrão de distribuição muito similar ao longo dos anos de 2012-2013 a 2017, sem evidências conclusivas de contaminação antrópica expressiva no curto período considerado.

### 5.3 BACIA DO RIO PARAUPEBAS VERSUS BACIA DO RIO ITACAIÚNAS E SUAS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS

A Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas hospeda os principais depósitos da província mineral de Carajás, todavia, cabe ressaltar que a maior parte deles está instalada dentro dos limites da sub-bacia do rio Parauapebas. Sendo assim, compreender as semelhanças e contrastes entre as bacias mencionadas pode fornecer importantes informações para a gestão ambiental da região. O estudo conduzido por Salomão et al. (submetido) em sedimentos de corrente da totalidade da BHRI foi considerado nesta discussão.

Os teores de cobre são elevados nos sedimentos da BRP e BHRI, influenciados principalmente pelos processos de mineralização ao longo dos cinturões do Cu. Verificou-se que a quantidade mediana encontrada na BRP foi consideravelmente maior quando comparada à concentração mediana da BHRI, principalmente, em razão das maiores quantidades estarem limitadas a regiões da bacia que coincidem com os cinturões norte e sul de Cu. Embora as medianas tenham se concentrado abaixo do nível 1, as concentrações máximas obtidas

chegaram a ser aproximadamente oito vezes maiores que o nível 2 (CONAMA, 2012) para a BHRI e cerca de três vezes maior para a BRP.

Os padrões geoquímicos dos sedimentos de corrente para Ni e Cr revelaram que as concentrações máximas mais elevadas se situam dentro dos limites da BRP. Coerentemente, os conteúdos medianos destes elementos foram um pouco superiores na BRP, quando comparados com a BHRI. Isto indica que Ni e Cr estão mais concentrados nesta região da BHRI. Mediante essas informações é possível notar a influência do contexto geológico sobre a assinatura geoquímica desses elementos em cada bacia, tendo em vista que eles tendem a ser mais enriquecidos em sedimentos de corrente de regiões com abundância de rochas máfico-ultramáficas. Por outro lado, ainda que associados a fontes geogênicas, os teores destes elementos excederam os valores legais (CONAMA, 2012).

Ainda que a BHRI seja significativamente maior em território e mais diversificada em termos de contexto geológico, os conteúdos medianos de Zn e Cd em ambas bacias foram muito semelhantes. A concentração máxima Zn foi obtida em amostra coletada dentro dos limites da BRP e, embora expressiva, não ultrapassou o nível 2. Por outro lado, os teores de Cd são sempre relativamente baixos, de modo que até mesmo os valores máximos se enquadraram abaixo de todos os níveis legais (CONAMA, 2012).

Comparando a distribuição do Pb, observa-se que as concentrações detectadas na BRP são comparativamente menores em relação a BHRI. Os conteúdos medianos concentraram-se abaixo do nível 1 e os máximos abaixo do nível 2.

As concentrações medianas de As são de modo geral baixas nos sedimentos de corrente da BHRI e BRP, porém foram registrados teores de As relativamente elevados no Cinturão Araguaia, fora dos domínios da BRP. Isto se reflete nos teores máximos das duas bacias que exibem discrepância, sendo que, na BHRI são indicados valores que ultrapassam todos os limites legais, ao passo que o mesmo não ocorre na BRP. Esta divergência é explicada pelo enriquecimento de As constatado no Cinturão Araguaia, compreendido somente pela BHRI (SALOMÃO et al., submetido).

O conteúdo de Hg, tanto na BHRI quanto na BRP, é muito baixo sendo comparativamente mais acentuado na Bacia Carajás e aparentemente relacionado com as zonas de mineralização de Cu (KABATA-PENDIAS, 2001; MORETO et al., 2015). A concentração mediana foi ligeiramente superior na BHRI, em comparação à BRP, porém a concentração máxima constatada na BHRI não ultrapassou o nível 2 (CONAMA, 2012).

#### 5.4 VALORES DE *BACKGROUND* E A LEGISLAÇÃO

A existência de uma legislação sólida, com valores de referência fundamentados em estudos representativos de diferentes áreas seria o ideal, principalmente, sob o ponto de vista ambiental. Pensando nisso, cabe uma discussão acerca dos teores apontados como limite superior de *background* para a BRP e as concentrações dispostas na resolução nº 454 (CONAMA, 2012), que é a legislação brasileira que mais se aproxima do assunto.

Os resultados, calculados através de técnicas estatísticas amplamente empregadas em trabalhos geoquímicos (URRESTI-ESTALA et al., 2013; GAŁUSZKA et al., 2015; YOTOVA et al., 2018), apontaram significativas discrepâncias entre os limites superiores de *background* da BRP, não somente pela peculiaridade de cada método, mas também pelos diferentes ambientes geológicos que causam contrastes marcantes na bacia, conforme discutido em tópicos anteriores. Os valores de *background* de As, Cd, Hg, Pb e Zn situam-se bem abaixo dos valores definidos na legislação (CONAMA 454), enquanto que nos casos de Cu, Cr e Ni, alguns métodos fornecem valores superiores aos limites máximos sugeridos. Os limites superiores de *background* nos sedimentos ativos de corrente da BRP fornecidos pelas técnicas iterativa  $2\sigma$ , percentil 75 e função distribuição calculada, em comparação com as demais, foram mais conservadores e não apresentaram concentrações acima do nível considerado prejudicial para vida aquática (Tabela 5) para os elementos avaliados. Tais resultados podem ser considerados representativos do *background* natural da região (MATSCHULLAT; OTTENSTEIN; REIMANN, 2000; REIMANN e GARRET, 2005). Todavia, isto não significa que esses valores de referência sejam adequados para a BHRI, uma vez que a técnica iterativa  $2\sigma$  exclui quantidades expressivas de supostos *outliers* contidos no conjunto de dados (NAKIĆ; POSAVEC; BACĀANI, 2007). De modo semelhante, o método

percentil 75 desconsidera cerca de 25% das concentrações, que são as mais elevadas, mas que podem estar possivelmente associadas a anomalias naturais na bacia estudada. Portanto, os limites de *background* fornecidos pelas técnicas mencionadas podem estabelecer um cenário pouco realístico para a BRP, tendo em vista que, em uma região com acentuada heterogeneidade, um enriquecimento natural poderia ser interpretado de forma equivocada como sendo de origem antropogênica.

Embora a contribuição geogênica seja marcante na assinatura geoquímica dos sedimentos, outras fontes não podem ser desconsideradas. Por isso, quando se trata de valores legais, é importante pensar no conceito de *background* ambiental (PANNO et al., 2006; MIKKONEN et al., 2017), no qual influências tanto naturais, quanto antrópicas são consideradas. Os métodos *TIF*, *MAD* e percentis 90, 95 e 98 são os mais apropriados quando o objetivo é estimar o *background* ambiental da bacia (cf. SALOMÃO et al., submetido; SAHOO et al., 2019b; SAHOO et al., submetido).

Em geral, os valores mais elevados de *background* foram obtidos a partir do método de *TIF*, sendo que valores superestimados, maiores que os teores máximos, foram constatados para Al, Co, Cu, Hg, Mo, Pb e V. Considerando os valores definidos por esta técnica, somente Cr e Ni excederam os teores legais dispostos no CONAMA n° 454. Conhecendo o enriquecimento natural destes elementos na BRP, preferencialmente em áreas de ocorrências de corpos máfico-ultramáficos, deduz-se que o método *TIF* constitui-se como uma ferramenta útil na identificação de regiões com concentrações anômalas.

A técnica *MAD*, por ser baseada na mediana e desvio absoluto mediano do conjunto de dados, não sofre impactos expressivos causados por valores extremos e desvios (REIMANN et al., 2018). Isto fez com que valores mais baixos de *background* fossem obtidos, em comparação com aqueles fornecidos por *TIF* e os percentis 95 e 98, embora concentrações superestimadas também tenham sido observadas para Al e Co. Os valores de *background* de Cr, Cu e Ni fornecidos por esta técnica ultrapassaram os limites da legislação brasileira (Tabela 5) e corroboram a ideia de que a mesma não contempla as peculiaridades regionais, tal

como se observa na BRP (dados do presente trabalho) e na totalidade da BHRI (SALOMÃO et al., 2018, submetido; SAHOO et al., 2019b, submetido).

O percentil 90 apontou resultados mais conservadores, em relação aos valores de background indicados pelos métodos MAD, TIF e percentis 95 e 98, porém, ainda assim, o background para o Cr se mostrou em desconformidade com os níveis legais (Tabela 5). Por outro lado, os percentis 95 e 98 forneceram valores de background semelhantes àqueles obtidos por MAD e TIF, de modo que em ambas as técnicas Cr e Ni exibiram conteúdos acima do máximo permitido. Por sua vez, o background do Cu excedeu o valor legal somente no percentil 98. Isto demonstra que, embora os métodos de percentis entreguem números fixos, dentro da faixa de valores do conjunto de dados, eles também necessitam ser cautelosamente avaliados, especialmente quando se trata da definição de limites superiores de *background* para a construção de valores para a legislação ambiental.

Ainda que *MAD*, *TIF* e percentis 90, 95 e 98 tenham fornecido valores de *background* em desconformidade com os limites dispostos na legislação brasileira, isto não implica dizer que haja necessariamente uma contribuição antrópica direta nas concentrações destes elementos. Isto é evidenciado por outros trabalhos geoquímicos realizados na região que, assim como a presente pesquisa, revelaram que a distribuição desses elementos é intensamente controlada pelo ambiente geológico (SALOMÃO et al., submetido; SAHOO et al., 2019, submetido). Conclui-se que, no contexto da BRP, a técnica *MAD* mostra-se mais adequada para representação do *background* ambiental da região.

As questões abordadas acima evidenciam que embora sejam importantes ferramentas para a gestão territorial, as faixas de *background* não transmitem informações acerca da proveniência dos elementos. Por isso, a origem das anomalias dos diferentes elementos, sejam elas geogênicas ou antropogênicas, precisa ser analisada criteriosamente caso a caso considerando o cenário local, o ambiente geológico, formas de uso e ocupação do solo, assim como intervenções antrópicas. Logo, para os elementos Cu, Cr e Ni, os teores considerados danosos, mencionados na resolução nº 454 do CONAMA (2012), não são condizentes com àqueles naturalmente encontrados na área sob investigação e, incontestavelmente, precisam de profundos ajustes. Isto reforça a necessidade de uma nova legislação,

apropriada para sedimentos de corrente e meios amostrais afins, que seja formulada com base em estudos que ponderem as diversas características regionais e possa assim fornecer valores de referência mais realistas.

## 6 CONCLUSÕES

Os sedimentos ativos de corrente da BRP mostraram-se fortemente influenciados pelo ambiente geológico da região. Significativas evidências apontaram que os cinturões norte e sul de mineralização de Cu situados na Bacia Carajás são os principais responsáveis pelas concentrações anômalas deste elemento. Além disso, as zonas hidrotermalizadas dos dois cinturões contribuem no enriquecimento de outros elementos, tais como Hg, In, Mo, Se e Sn. O enriquecimento acentuado de Fe pode ser relacionado com as formações ferríferas bandadas e as rochas metavulcânicas da Bacia Carajás, mas também com processos supergênicos responsáveis pela formação de crostas ferruginosas e pelo seu posterior dismantelamento. As rochas máfico-ultramáficas tiveram papel determinante na origem de enriquecimentos em Ni, Cr e Co.

A assinatura geoquímica da área da BRP com base nos dados pertencentes ao projeto *background* geoquímico na bacia do rio Itacaiúnas, em comparação com aquela proveniente de dados dos projetos da CPRM executados em anos pretéritos (2012 e 2013), também na região de Carajás, indica que os elementos estudados mantiveram seu padrão geral de distribuição, não havendo evidências de modificações expressivas devidas a efeitos antrópicos entre os dois períodos de amostragem.

Comparando com a totalidade da BHRI foram observadas nos limites da BRP concentrações medianas mais acentuadas para alguns elementos, tais como Cu, Cr, Ni e Zn. Além disso, os teores máximos para Cr e Zn também foram constatados dentro dos limites da BRP. Nestas bacias, os conteúdos máximos de Cr, Cu e Ni excederam o nível 2 da resolução n° 454 de 2012.

As técnicas estatísticas empregadas para obtenção dos valores de *background* exibiram resultados com grande variação. Para escolher quais métodos seriam mais apropriados para definir o *background* da BRP, precisaram ser considerados aspectos tais como a contribuição geogênica e antropogênica, assim como as formas de uso e ocupação do solo. As técnicas iterativa  $2\sigma$ , percentil 75 e

função distribuição calculada apresentaram-se como as mais adequadas para definir o *background* natural, enquanto que *MAD* mostrou-se mais adequada para o *background* ambiental.

A compreensão acerca do comportamento geoquímico dos sedimentos ativos de corrente da BRP, dada a relevância da bacia, traz subsídios indispensáveis para uma gestão ambiental mais eficiente, principalmente no que diz respeito à formulação de leis ambientais no Brasil.

## REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; GERD SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol Z**, v. 22, p. 711-728, 2013.

BEISIEGEL, V. D. R. *et al.* Geologia e Recursos Minerais da Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 3, n. 4, p. 215–242, 1971.

BOGEN, J.; BØLVIKEN, B.; OTTESEN, R. T. Environmental studies in Western Europe using overbank sediment. Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basin. **Proceedings... OSLO SYMPOSIUM**, august, 1992. (IAHS Publ. no. 210). Disponível em: [https://iahs.info/uploads/dms/iahs\\_210\\_0317.pdf](https://iahs.info/uploads/dms/iahs_210_0317.pdf).

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 454, de 01 de novembro de 2012. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. In.: **Diário Oficial da União [da República Federativa do Brasil]**, Brasil. 2012. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2018/01/RESOLU%C3%87%C3%83O-N%C2%BA-454-DE-01-DE-NOVEMBRO-DE-2012.pdf>.

COCKER, M. D. **Distribution of selected elements in stream sediments, stream hydrogeochemistry, and geology of the Flint River basin**. Atlanta: Department of Natural Resources, 1998. Disponível em: <https://epd.georgia.gov/document/publication/b-129-distribution-elements-stream-sediments-stream-hydrogeochemistry-and/download>.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Projeto avaliação do potencial dos recursos minerais estratégicos do Brasil: área Carajás Oriental** [WWW Document]. 2012. Disponível em: <http://geosgb.cprm.gov.br/>.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Projeto metalogenia das províncias minerais do Brasil: área Sapucaia** [WWW Document]. 2013. Disponível em: <http://geosgb.cprm.gov.br/>.

DALL'AGNOL, R.; CUNHA, I. R. V.; GIMARÃES, F. V.; OLIVEIRA, D. C.; TEIXEIRA, M. F. B.; FEIO, G. R. L.; LAMARÃO, C. N. Mineralogy, geochemistry, and petrology of Neoproterozoic ferroan to magnesian granites of Carajás Province, Amazonian Craton: The origin of hydrated granites associated with charnockites. **Lithos**, v. 277, p. 3-32, 2017.

FEIO, G. R. L. *et al.* Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: Implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. **Precambrian Research**, v. 227, p. 157-185. 2013.



GAŁUSZKA, A. *et al.* Geochemical background of potentially toxic trace elements in soils of the historic copper mining area: a case study from Miedzianka Mt., Holy Cross Mountains, south-central Poland. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 6, p. 4589-4605, 2015.

GUILHERME, L. R. G. *et al.* Elementos-traco em solos e sistemas aquáticos. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 4, n. 3, p. 345-390. 2005.

GUSTAFSSON, J. P.; BHATTACHARYA, P. Geochemical modelling of arsenic adsorption to oxide surfaces. **Trace Metals and Other Contaminants in the Environment**, v. 9, p. 159-206, 2007. DOI [10.1016/S1875-1121\(06\)09006-7](https://doi.org/10.1016/S1875-1121(06)09006-7).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/parauapebas/panorama>. Acesso em: 01 fev. 2020

KABATA-PENDIAS, A.; MUKHERJEE, A. B. **Trace Elements from Soil to Human**. 3. ed. Berlin: Springer Verlag, 2007.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3. ed. [S.l.]: Boca Raton; CRC Press, 2001. 413 p.

KABATA-PENDIAS, A.; SZTEKE, B. **Trace Elements in Abiotic and Biotic Environments**. Londres: Taylor & Francis, 2015.

LAFON, J. M.; MACAMBIRA, M. Evolução da Província Mineral de Carajás com base em novos dados geocronológicos. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., São Paulo, 1992. **Anais...** São Paulo: SBG, 1992. Disponível em: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/24/073/24073981.pdf>.

LAURANCE, W. F. A crisis in the making: responses of Amazonian forests to land use and climate change. **Trends Ecol. Evol.**, v. 13, n. 10, p. 411-415, out. 1998. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21238369>.

LAURANCE, W. F.; GOOSEM, M.; LAURANCE, S. G. W. Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. **Trends Ecol. Evol.**, v. 24, n. 12, p. 659-669, 2009. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19748151>. DOI 10.1016/j.tree.2009.06.009.

MARTINS, P. L. G. *et al.* Neoproterozoic magmatism in the southeastern Amazonian Craton, Brazil: Petrography, geochemistry and tectonic significance of basalts from the Carajás Basin. **Precambrian Research**, v. 302, p. 340-357. 2017.

MATSCHULLAT, J.; OTTENSTEIN, R.; REIMANN, C. Geochemical background- can we calculate it?. **Environmental Geology**, v. 39. n. 9. p. 990-1000, jul. 2000. DOI 10.1007/s002549900084.

MIKKONEN, H. G.; CLARKE, B. O.; DASIKA, R.; WALLIS, C. J.; REICHMAN, S. M. Assessment of ambient background concentrations of elements in soil using combined survey and open-source data. **Science of total environment**, v. 580, p. 1410-1420, 2017.

MIKKONEN, H. G.; GRAAFF, R. VON DE; COLLINS, R. N.; DASIKA, R.; WALLIS, C. J.; HOWARD, D. L.; REICHMAN, S. M. Immobilisation of geogenic arsenic and vanadium in iron-rich sediments and iron stone deposits. **Science of The Total Environment**, v. 654, p. 1072-1081, 1 March 2019.

MIMBA, M. E. *et al.* Regional geochemical baseline concentration of potentially toxic trace metals in the mineralized Lom Basin, East Cameroon: a tool for contamination assessment. **Geochemical Transactions**, v. 19, n. 1, p. 1–17, 2018.

MINOLFI, G. *et al.* The distribution of Pb, Cu and Zn in topsoil of the Campanian Region, Italy. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, v. 19, n. 3, p. 205, 2019. DOI [10.1144/geochem2017-074](https://doi.org/10.1144/geochem2017-074).

MORAES, A. M. de. **Geoquímica de sedimentos lacustres com substrato laterítico da serra Bocaina, Amazônia: implicações para o entendimento da sedimentação, intemperismo e proveniência**. 2018. Dissertação (Mestrado em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais) - Instituto Tecnológico Vale. Belém, 2018.

MONTEIRO, M. A. Meio século de mineração industrial na Amazônia e suas implicações para o desenvolvimento regional. **Dossiê Amazônia Brasileira I. Estud. av.**, São Paulo, v. 19, n. 53, 2005.

MONTGOMERY, C. W. **Environmental Geology**. 9th ed. New York: McGraw Hill, 2010. Disponível em: <https://epdf.pub/environmental-geology-9th-edition.html>.

MORETO, C. P. N. *et al.* Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide–copper–gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás Province, Brazil. **Mineralium Deposita**, v. 50. p. 517-546, 2015. DOI 10.1007/s00126-014-0549-9.

NAKIĆ, Z.; POSAVEC, K.; BACĀANI, A. A Visual Basic Spreadsheet Macro for Geochemical Background Analysis. **Ground Water**, v. 45, p. 642-647. 2007.

PANNO, S. V *et al.* Estimating Background and Threshold Nitrate Concentrations Using Probability Graphs. **Ground Water**, v. 44, n. 5, p. 697-709, set./out., 2006. DOI 10.1111/j.1745-6584.2006.00240.x

PINA NETO, A. N. de; SILVA JÚNIOR, R. O. da; SILVA, M. S. da. **Análise das características morfométricas e de susceptibilidade a enchentes da sub-bacia do rio Parauapebas, Amazônia Oriental**. Belém, PA: ITV, 2019. DOI 10.29223/PROD.TEC.ITV.DS.2019.1.PinaNeto. (PROD.TEC.ITV.DS N001/2019).

QUANTUM GIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. 2009. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>.

QUARESMA, L. S. **Qualidade química da água superficial e valores de baseline geoquímico na bacia do rio Parauapebas, Carajás, sudeste da Amazônia**. 2019. Dissertação (Mestrado em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais) - Instituto Tecnológico Vale. Belém, 2019.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. 2019. Disponível em: <https://www.R-project.org>.

RANASINGHE, P. N.; FERNANDO, G. W. A. R.; DISSANAYAKE, C. B.; RUPASINGHE, M. S. Stream sediment geochemistry of the Upper Mahaweli River Basin of Sri Lanka - Geological and environmental significance. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 99, p.1-28, 2008. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/237100269\\_Stream\\_sediment\\_geochemistry\\_of\\_the\\_Upper\\_Mahaweli\\_River\\_Basin\\_of\\_Sri\\_Lanka-Geological\\_and\\_environmental\\_significance](https://www.researchgate.net/publication/237100269_Stream_sediment_geochemistry_of_the_Upper_Mahaweli_River_Basin_of_Sri_Lanka-Geological_and_environmental_significance).

REIMANN, C.; FILZMOSE, P. Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. **Environmental Geology**. v. 39, n. 9, p. 1001-1014, jul. 2000.

REIMANN, C.; FILZMOSE, P.; GARRETT, R. G. Background and threshold: Critical comparison of methods of determination. **Science of the Total Environment**, v. 346, n. 1-3, p. 1-16. 2005.

REIMANN, C.; FILZMOSE, P.; GARRETT, R. G.; DUTTER, R. Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R. New York: John Wiley & Sons, 2008.

REIMANN, C. *et al.* GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil. **Applied Geochemistry**, v. 88, p. 302-318. 2018.

SAHOO, P. K. *et al.* Source and background threshold values of potentially toxic elements in soils by multivariate statistics and GIS-based mapping: a high density sampling survey in the Parauapebas basin, Brazilian Amazon. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 42, p. 255-282, 2019. DOI [10.1007/s10653-019-00345-z](https://doi.org/10.1007/s10653-019-00345-z).

SALOMÃO, G. N. *et al.* Geochemical mapping in stream sediments of the Carajás Mineral Province: Background values for the Itacaiúnas River watershed, Brazil. **Environmental Management**. [Submetido].

SALOMÃO, G. N. **Mapeamento geoquímico e estimativa de background em solos na região da Província Mineral de Carajás - Leste do Cráton Amazônico, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/9909>.

SALOMÃO, G. N.; DALL'AGNOL, R.; ANGÉLICA, R. S.; FIGUEIREDO, M. A.; SAHOO, P. K.; MEDEIROS FILHO, C. A. de; COSTA, M. F. da. Geochemical mapping and estimation of background concentrations in soils of Carajás mineral province, eastern Amazonian Craton, Brazil. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, v. 19, n. 4, p. 431, 2019a. DOI [10.1144/geochem2018-066](https://doi.org/10.1144/geochem2018-066)

SALOMÃO, G. N.; FIGUEIREDO, M. A.; DALL'AGNOL, R.; SAHOO, P. K.; MEDEIROS FILHO, C. A. de; COSTA, M. F. da; ANGÉLICA, R. S. Geochemical mapping and background concentrations of iron and potentially toxic elements in active stream sediments from Carajás, Brazil - implication for risk assessment. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 92, p. 151-166, jun. 2019b. DOI [10.1016/j.jsames.2019.03.014](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.03.014)

SCHOBER, P.; BOER, C.; SCHWARTE, L. A. Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. **Anesthesia and Analgesia**, v. 126, n. 5, p. 1763-1768. 2018. SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591, 1965.

SHIMIZU, V. K. **Classificação e caracterização de tipos de minério de cobre da Mina do Sossego – Região de Carajás**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

SILVA JÚNIOR, R. O.; QUEIROZ, J. C. B.; FERREIRA, D. B. S.; TAVARES, A. L.; SOUZA FILHO, P. W. M.; GUIMARÃES, J. T. F.; ROCHA, E. J. P. Estimativa de Precipitação e Vazões médias para a Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas ( BHRI ), Amazônia Oriental, Brasil Estimation of Precipitation and average Flows for the Itacaiúnas River Watershed ( IRW ) - Eastern Amazonia , Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 5, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234039>.

SOUZA-FILHO, P. W. M. *et al.* Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 167, p. 175-184. 2016. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26686070>. DOI 10.1016/j.jenvman.2015.11.039

URRESTI-ESTALA, B. *et al.* Determination of background levels on water quality of groundwater bodies: A methodological proposal applied to a Mediterranean River basin (Guadalhorce River, Málaga, southern Spain). **Journal of Environmental Management**, v. 117, p. 121-130, 2013.

VASQUEZ, L. V.; ROSA-COSTA, L. T.; SILVA, C. M. G.; KLEIN, E. L. (Orgs.). Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de informações geográficas - SIG: texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do estado do Pará. Belém: CPRM, 2008. 328 p. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/10443?show=full>.

YOTOVA, G. *et al.* Establishment of geochemical background and threshold values for 8 potential toxic elements in the Bulgarian soil quality monitoring network. **Science of the Total Environment**, v. 643, p. 1297-1303, 2018.

YOUSEFI, M.; CARRANZA, E. J. M.; ROUHANI, A. K. Weighted drainage catchment basin mapping of geochemical anomalies using stream sediment data for mineral potential modelling. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 128, p. 88–96, 2013. Disponível em: <https://research.utwente.nl/en/publications/weighted-drainage-catchment-basin-mapping-of-geochemical-anomalie>.

ZUCCHETTI, M. **Rochas máficas do Grupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 e N5, Carajás, PA.** 2007. 166 f. Tese (Doutorado em Geologia Econômica e Aplicada) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007. Disponível em: [http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/192/Tese\\_Marcia\\_Zucchetti.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/192/Tese_Marcia_Zucchetti.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

## **APÊNDICES**

**Apêndice A** - Estatística descritiva de 41 elementos em sedimentos ativos de corrente na Bacia Hidrográfica do Rio Parauapebas e valores da probabilidade de significância (p-valor) do teste de normalidade Shapiro-Wilk aplicado sobre dados brutos e transformados ( $\log_{10}$  e *clr*). As concentrações de todos elementos estão em mg/kg.

Elementos	LD	%<LD	Mínimo	Mediana	Máximo	Média	DP	CV%	S-W db	S-W log10	S-W clr
<b>Ag</b>	0,01	6,3	<0,01	0,02	0,3	0,03	0,04	131,76	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Al</b>	0,01	-	1200	8950	41700	11565	8321	71,95	<0,05	<0,05	0,99
<b>As</b>	0,1	9,5	<0,1	0,3	7,9	0,67	1	150,31	<0,05	<0,05	0,38
<b>Ba</b>	10	-	20	70	770	91,26	79,86	87,5	<0,05	<0,05	0,65
<b>Be</b>	0,05	0,5	<0,05	0,26	1,9	0,36	0,32	90,21	<0,05	0,80	0,09
<b>Bi</b>	0,01	-	0,01	0,05	0,37	0,07	0,07	95,2	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Ca</b>	0,01	-	100	500	3900	616,32	505,63	82,04	<0,05	<0,05	0,95
<b>Cd</b>	0,01	12,1	<0,01	0,01	0,38	0,03	0,05	167,07	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Ce</b>	0,02	0,5	<0,02	37,55	310	49,8	46,53	93,43	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Co</b>	0,1	-	0,8	6,8	66,9	11,61	12,85	110,62	<0,05	<0,05	0,13
<b>Cr</b>	1	-	4	30	2630	58,86	196,2	333,35	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Cs</b>	0,05	2,1	<0,05	0,22	1,74	0,29	0,26	89,54	<0,05	0,05	0,19
<b>Cu</b>	0,2	-	1,4	20,35	556	49,38	74,3	150,47	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Fe</b>	0,01	-	4200	19750	354000	39306	48823	124,21	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Ga</b>	0,05	-	0,87	4,14	25,8	5,98	5,02	84,06	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Hf</b>	0,02	-	0,02	0,12	4,21	0,18	0,34	190,3	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Hg</b>	0,01	9,5	<0,01	0,02	0,24	0,03	0,03	96,72	<0,05	<0,05	0,10
<b>In</b>	0,005	12,1	<0,005	0,02	0,12	0,02	0,02	99,84	<0,05	<0,05	0,44
<b>K</b>	0,01	0,5	<0,01	400	3200	470,79	419,19	89,04	<0,05	<0,05	0,89
<b>La</b>	0,2	-	1,1	14,75	134	20,25	20,58	101,6	<0,05	0,79	0,24
<b>Li</b>	0,1	-	0,2	1,3	8,4	1,88	1,56	82,77	<0,05	0,17	0,21
<b>Mg</b>	0,01	0,5	<0,01	300	9000	487,11	818,28	167,99	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Mn</b>	5	-	69	542,5	6420	815,13	911,11	111,77	<0,05	0,54	0,60
<b>Mo</b>	0,05	-	0,06	0,37	3,49	0,58	0,61	105,43	<0,05	<0,05	<0,05

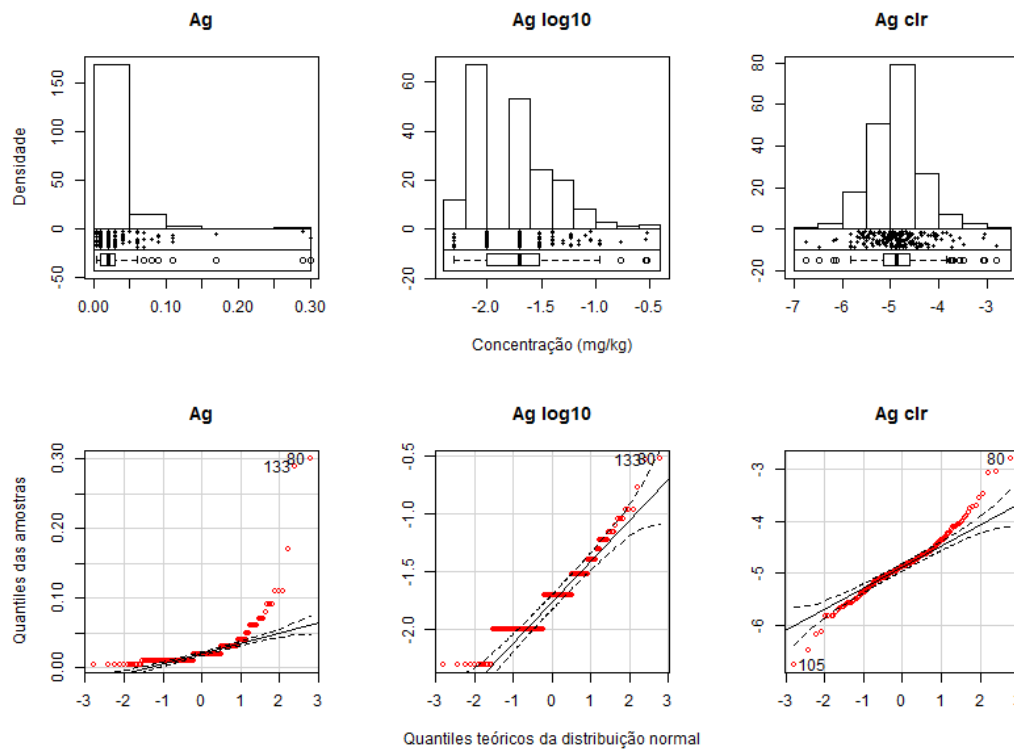
<b>Nb</b>	0,05	-	0,06	0,6	7,34	0,77	0,9	116,57	<0,05	<0,05	0,36
<b>Ni</b>	0,2	-	1,1	6,9	273	15,77	32,16	204	<0,05	<0,05	<0,05
<b>P</b>	10	-	30	170	970	233,79	181,98	77,84	<0,05	0,47	0,07
<b>Pb</b>	0,2	-	1,1	7,05	27,5	8,94	5,58	62,39	<0,05	0,10	0,06
<b>Rb</b>	0,1	-	0,3	4,35	50,7	6,9	7,72	111,97	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Sc</b>	0,1	-	0,4	3,1	29,1	5,3	5,4	101,88	<0,05	<0,05	0,10
<b>Se</b>	0,2	30	0,1	0,3	2,2	0,37	0,32	87,52	<0,05	<0,05	0,98
<b>Sn</b>	0,2	3,7	0,1	0,5	5,5	0,73	0,67	91,3	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Sr</b>	0,2	-	1	5,6	36,7	7,18	5,85	81,49	<0,05	0,70	<0,05
<b>Th</b>	0,2	-	0,3	9,3	233	17,46	25,24	144,52	<0,05	0,93	0,15
<b>Ti</b>	0,005	-	50	480	5960	689,00	777,22	112,8	<0,05	0,60	0,09
<b>Tl</b>	0,02	5,8	0,01	0,04	0,25	0,05	0,04	72,37	<0,05	<0,05	0,57
<b>U</b>	0,05	-	0,06	1,2	16,9	2,07	2,56	123,46	<0,05	0,84	<0,05
<b>V</b>	1	-	2	28,5	410	50,48	56,26	111,44	<0,05	0,05	0,08
<b>Y</b>	0,05	-	0,34	5,14	48,9	7,25	7,53	103,78	<0,05	0,59	0,04
<b>Zn</b>	2	-	3	19	304	30,86	44,36	143,73	<0,05	<0,05	<0,05
<b>Zr</b>	0,5	-	0,6	4,45	123,5	6,63	10,52	158,59	<0,05	0,07	0,05

LD: Limite de Detecção; DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variação; S-W: Shapiro-Wilk; db: dados brutos; clr: *centred logratio*.

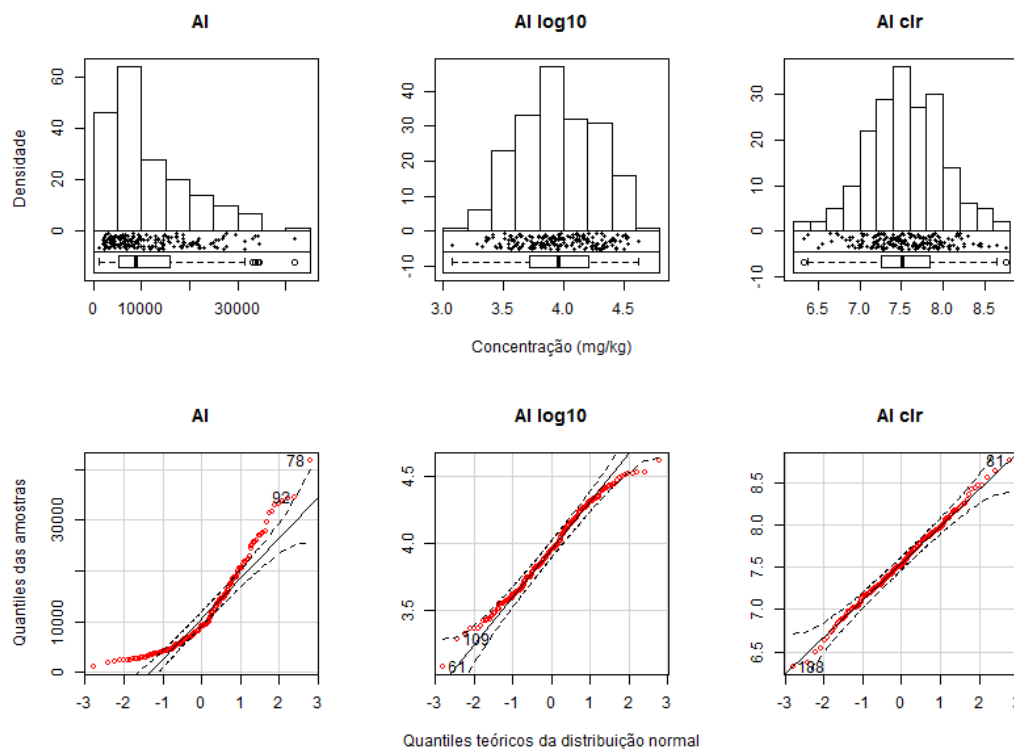


## APÊNDICE B - Gráficos EDA e Quantil-Quantil (Q-Q) dos elementos químicos.

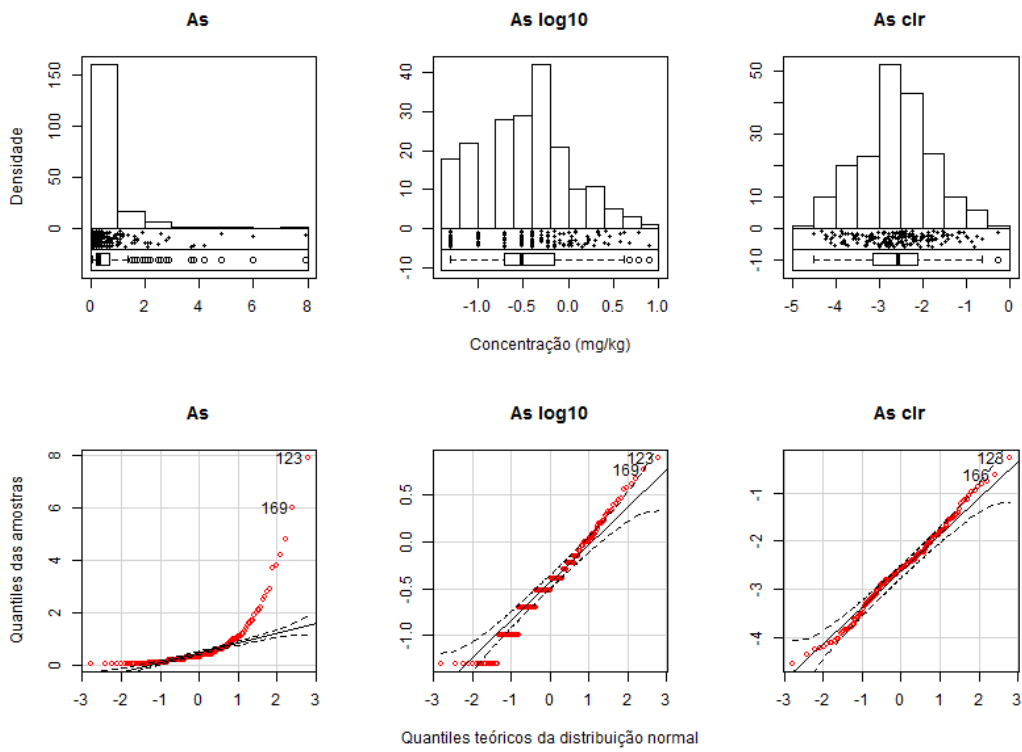
**Figura 1** – Gráficos de EDA e Q-Q para Ag: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



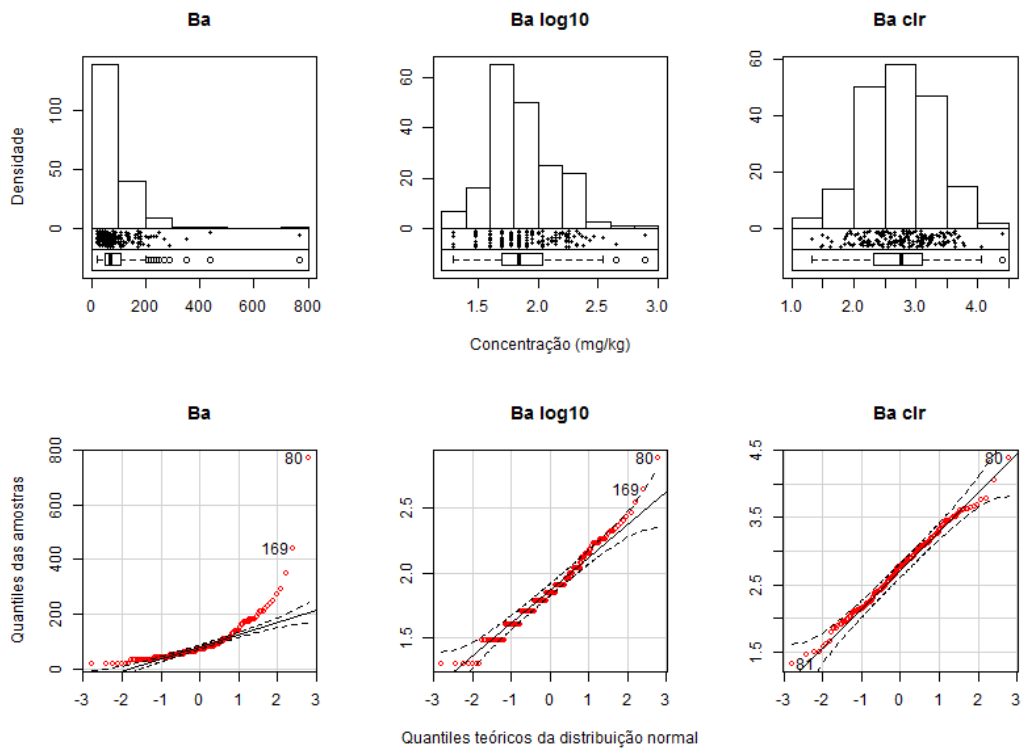
**Figura 2** – Gráficos de EDA e Q-Q para Al: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



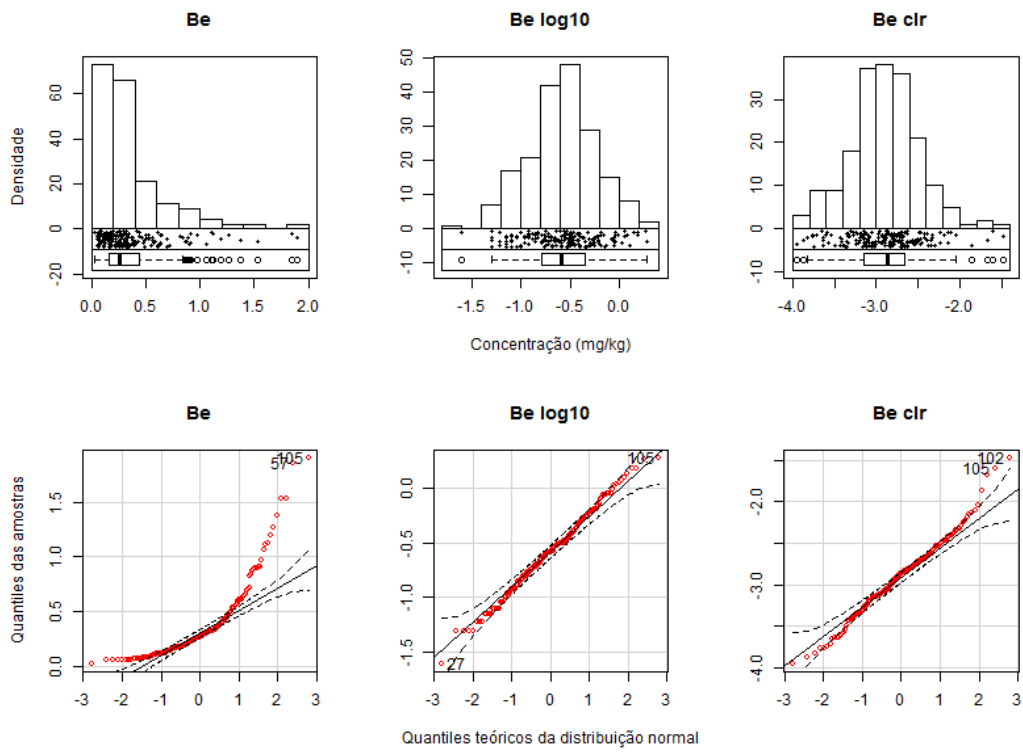
**Figura 3** – Gráficos de EDA e Q-Q para As: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



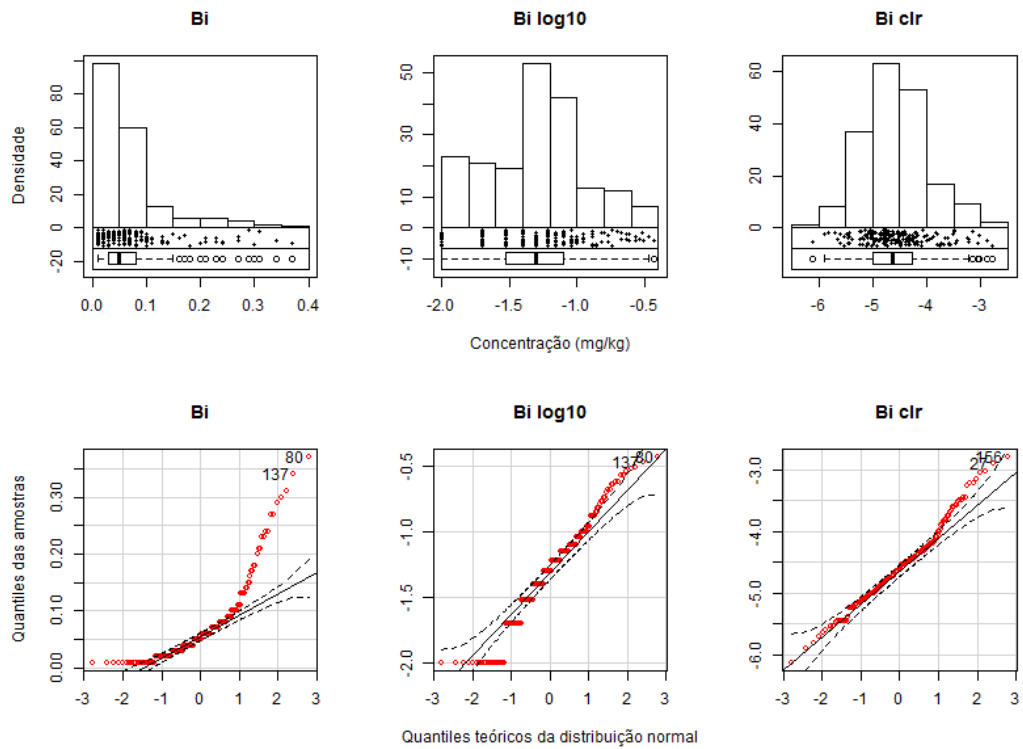
**Figura 4** – Gráficos de EDA e Q-Q para Ba: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



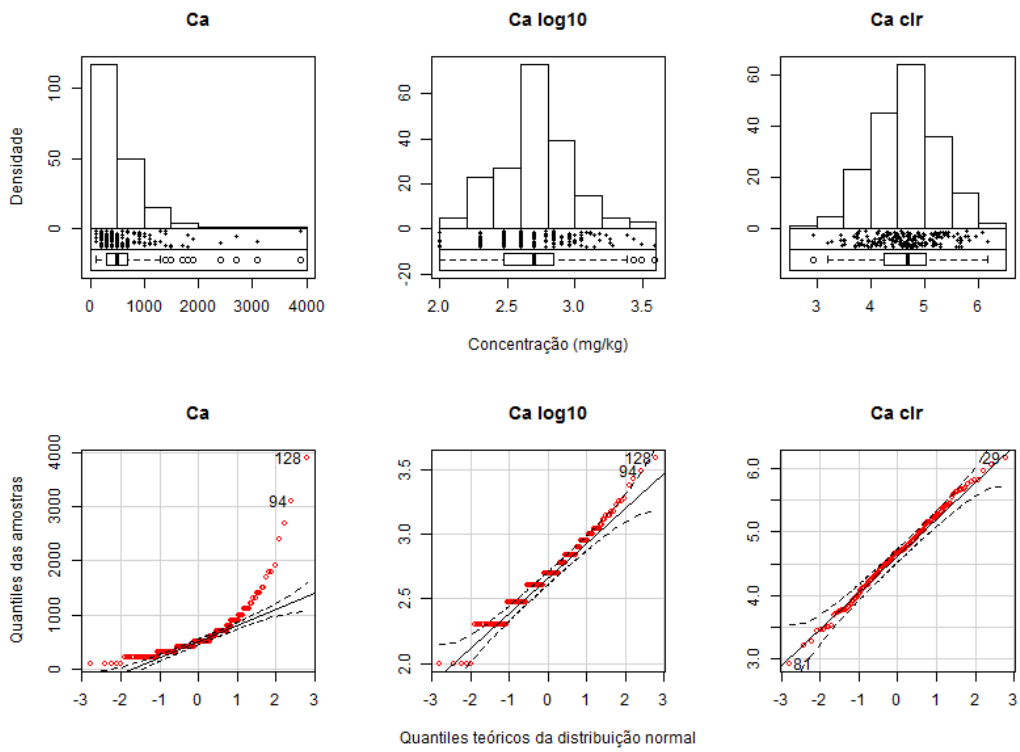
**Figura 5** – Gráficos de EDA e Q-Q para Be: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



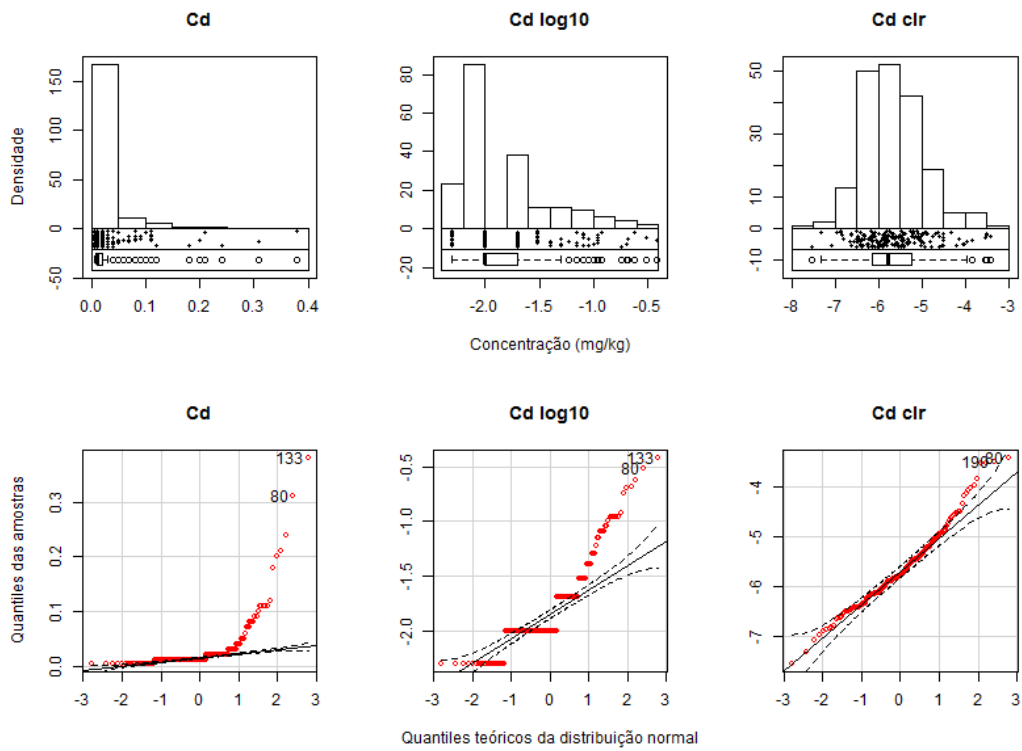
**Figura 6** – Gráficos de EDA e Q-Q para Bi: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



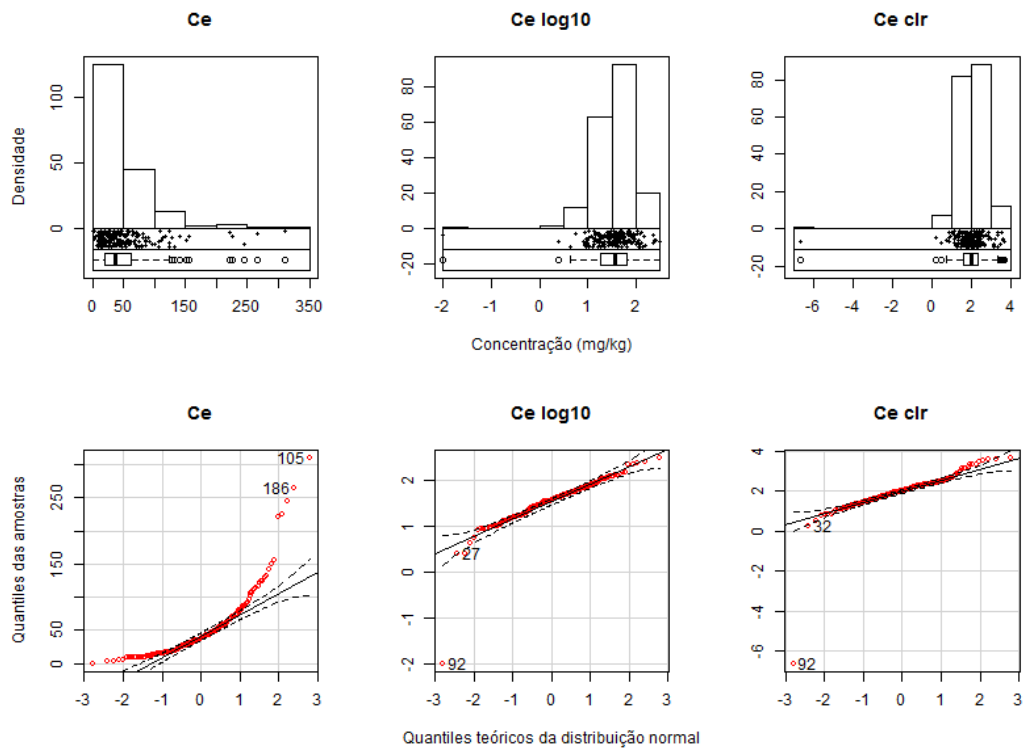
**Figura 7** – Gráficos de EDA e Q-Q para Ca: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



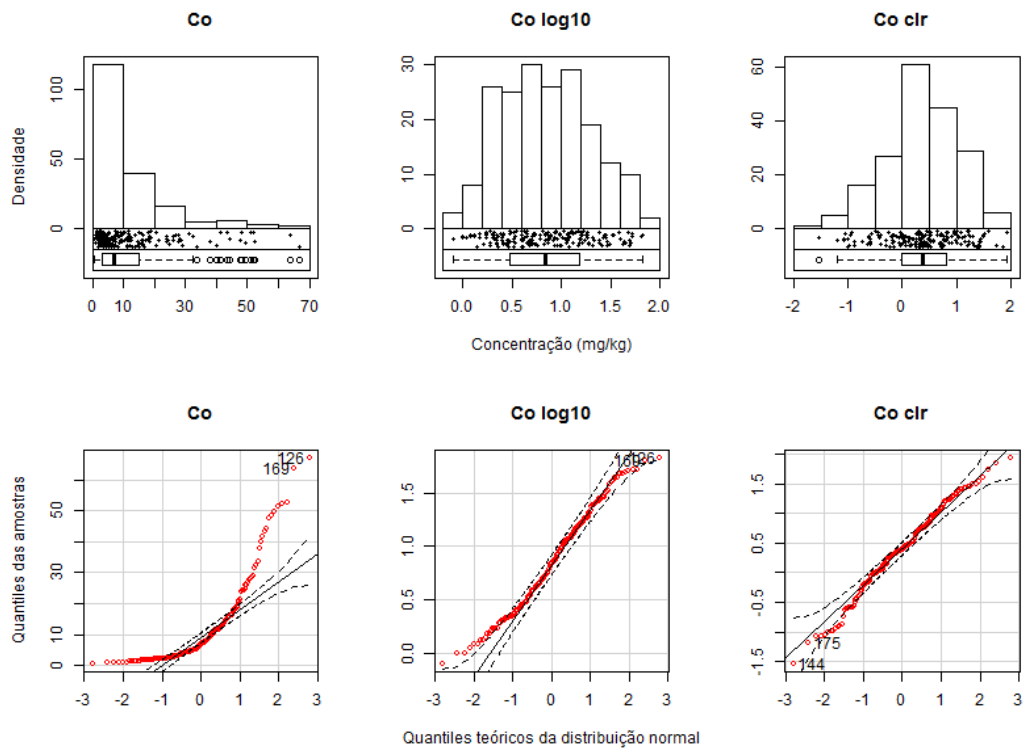
**Figura 8** – Gráficos de EDA e Q-Q para Cd: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



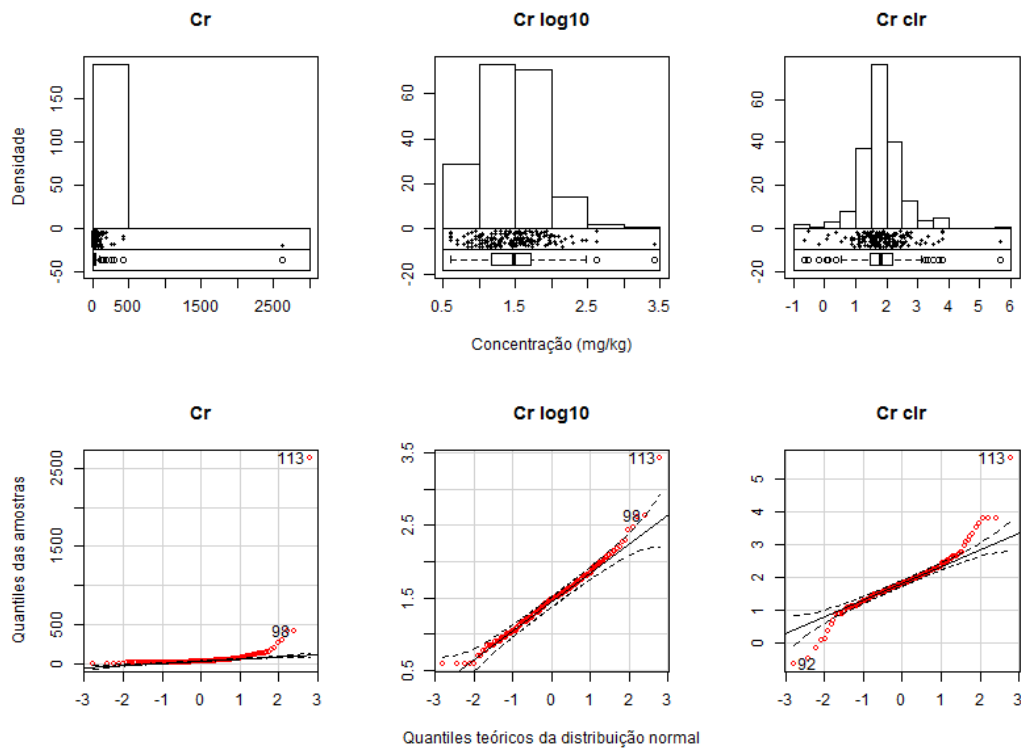
**Figura 9** – Gráficos de EDA e Q-Q para Ce: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



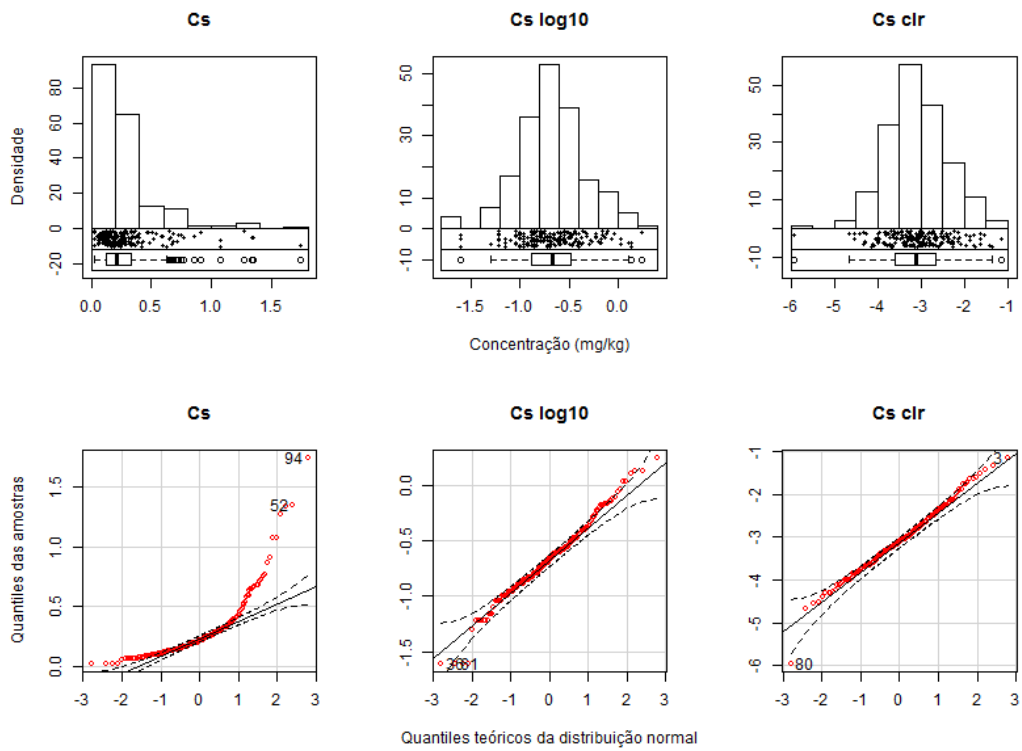
**Figura 10** – Gráficos de EDA e Q-Q para Co: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



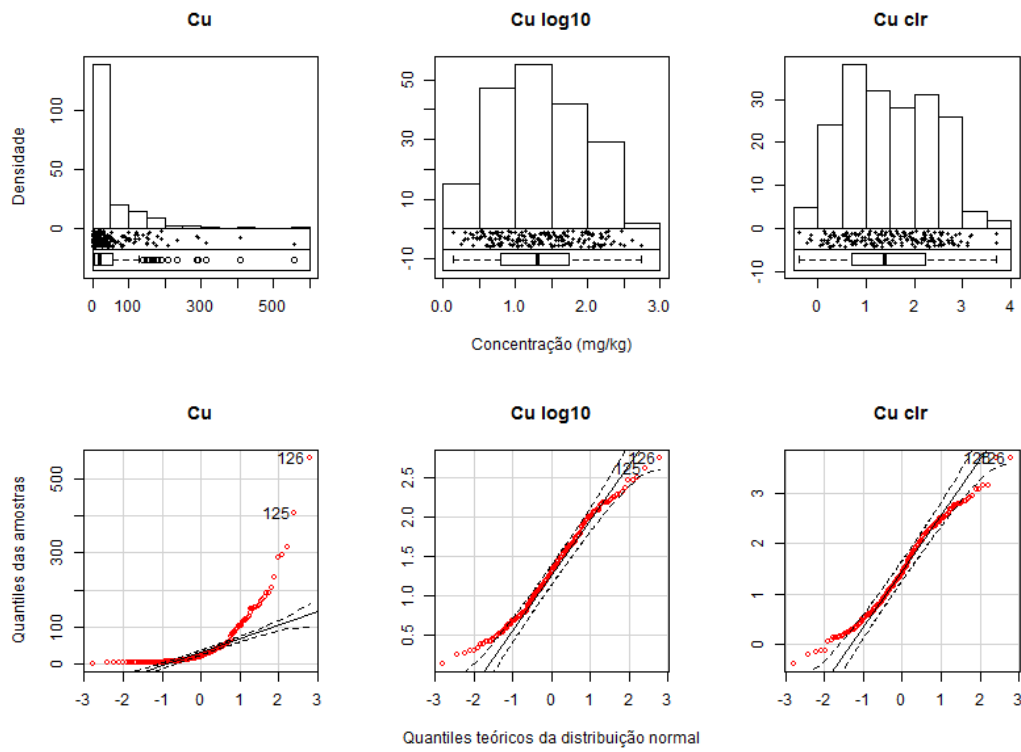
**Figura 11** – Gráficos de EDA e Q-Q para Cr: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



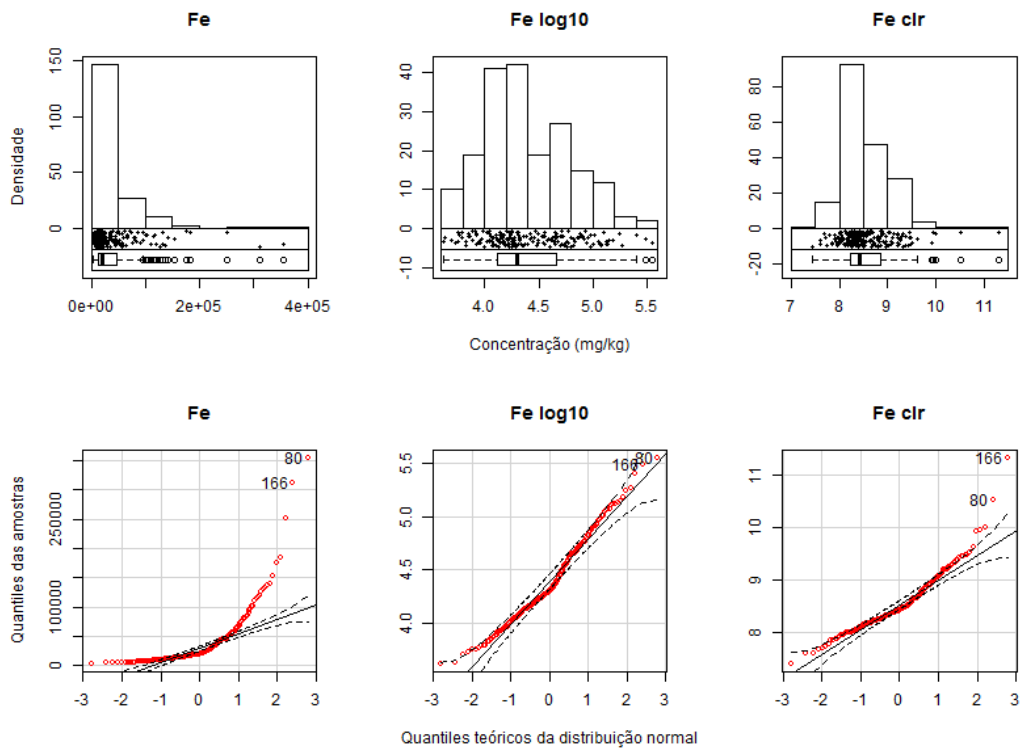
**Figura 12** – Gráficos de EDA e Q-Q para Cs: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



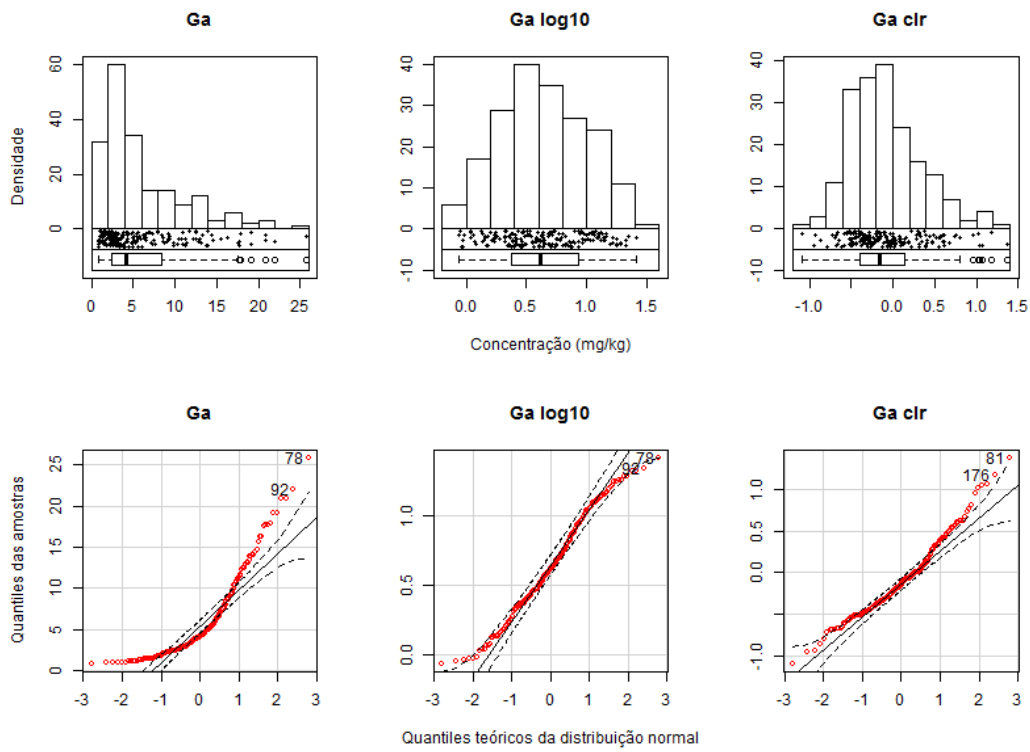
**Figura 13** – Gráficos de EDA e Q-Q para Cu: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



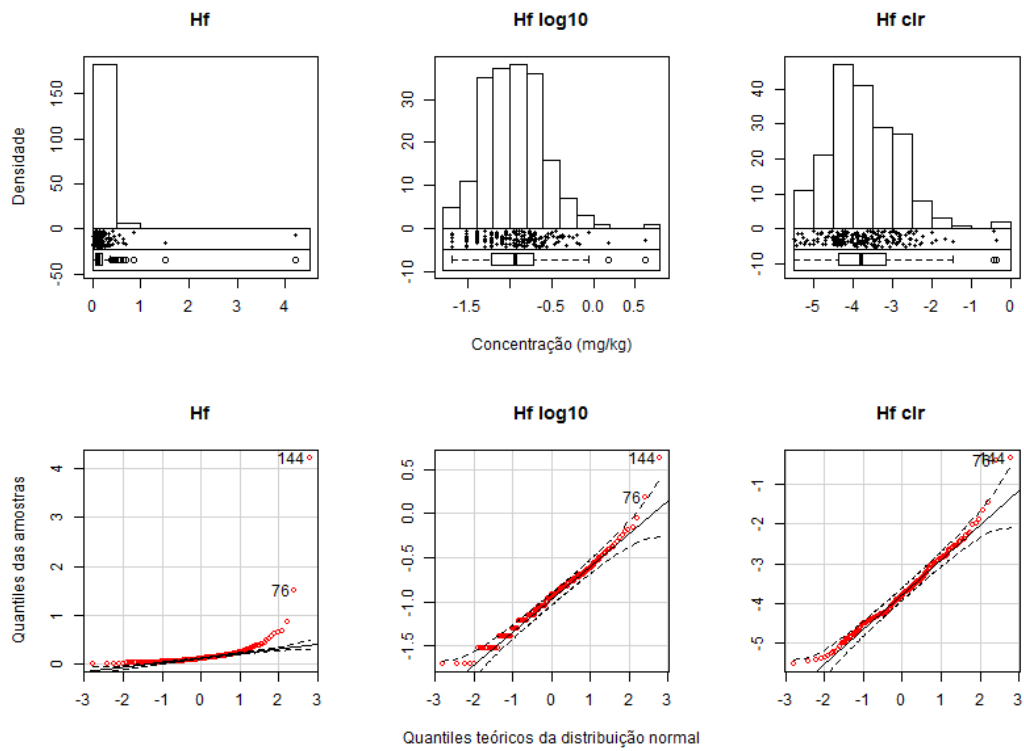
**Figura 14** – Gráficos de EDA e Q-Q para Fe: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



**Figura 15** – Gráficos de EDA e Q-Q para Ga: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)

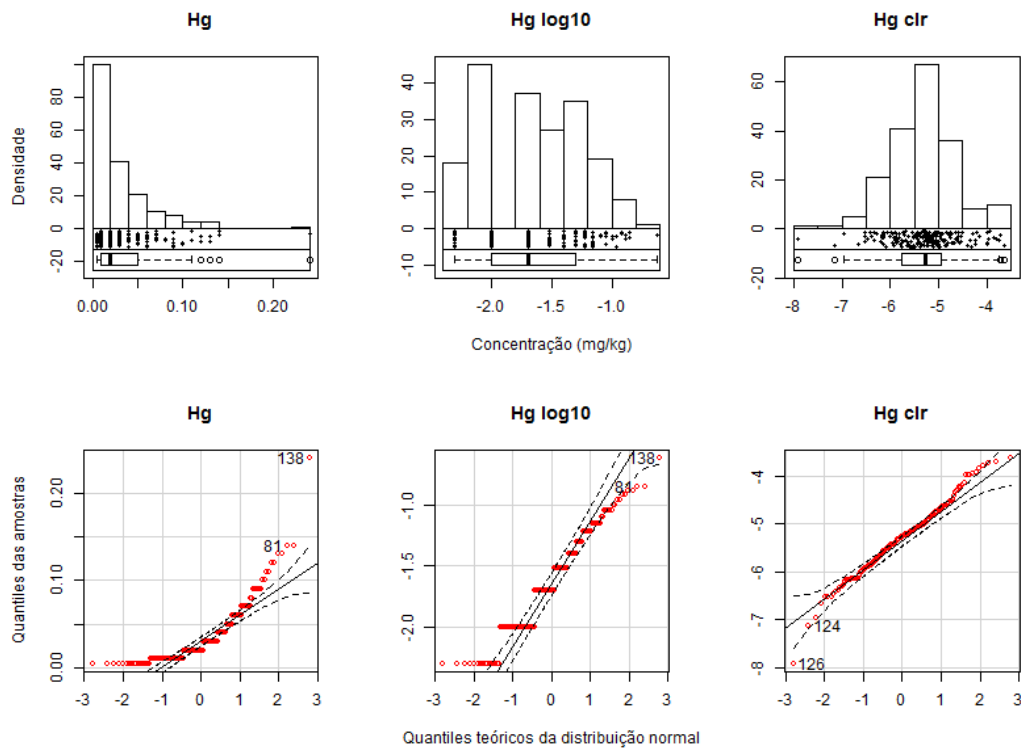


**Figura 16** – Gráficos de EDA e Q-Q para Hf: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)

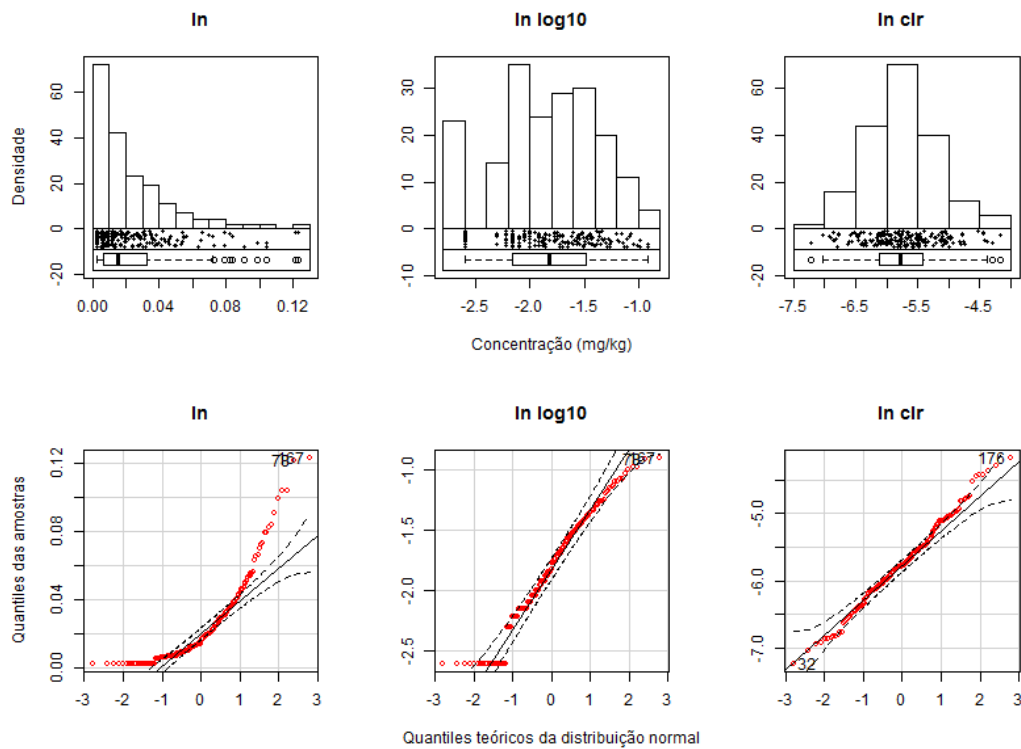




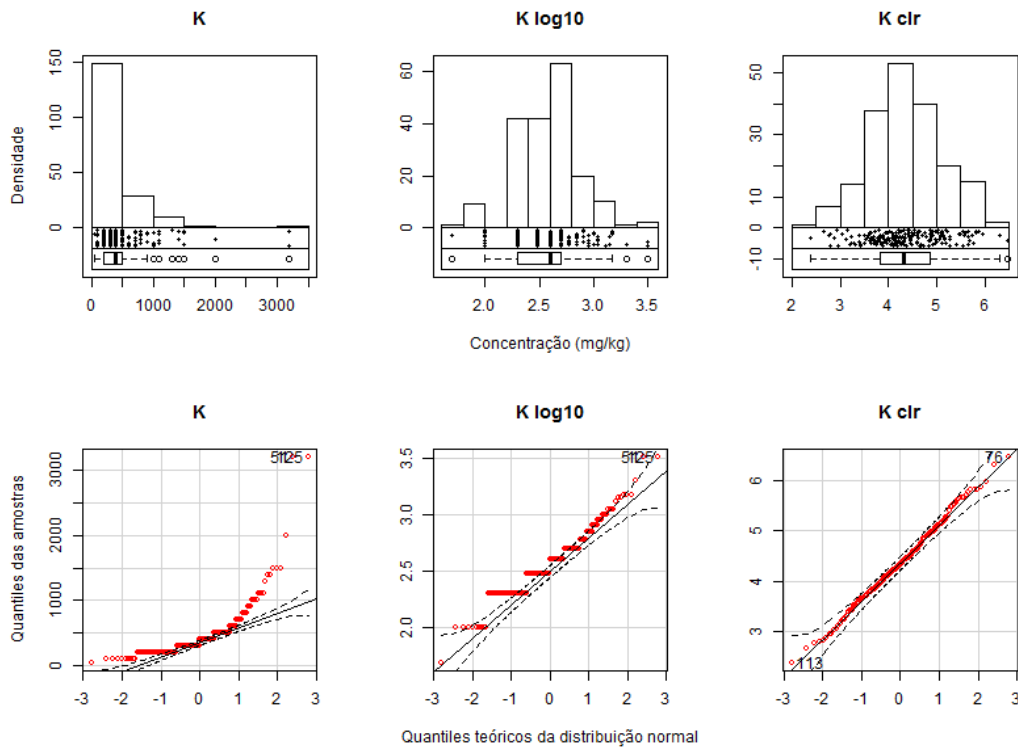
**Figura 17** – Gráficos de EDA e Q-Q para Hg: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



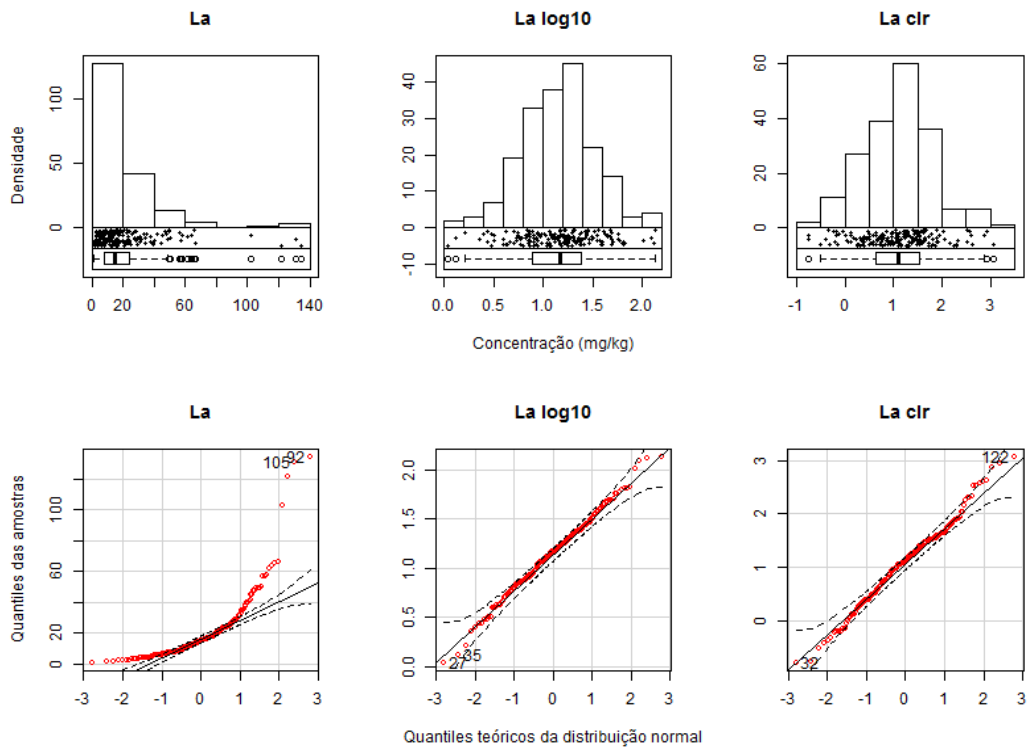
**Figura 18** – Gráficos de EDA e Q-Q para In: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



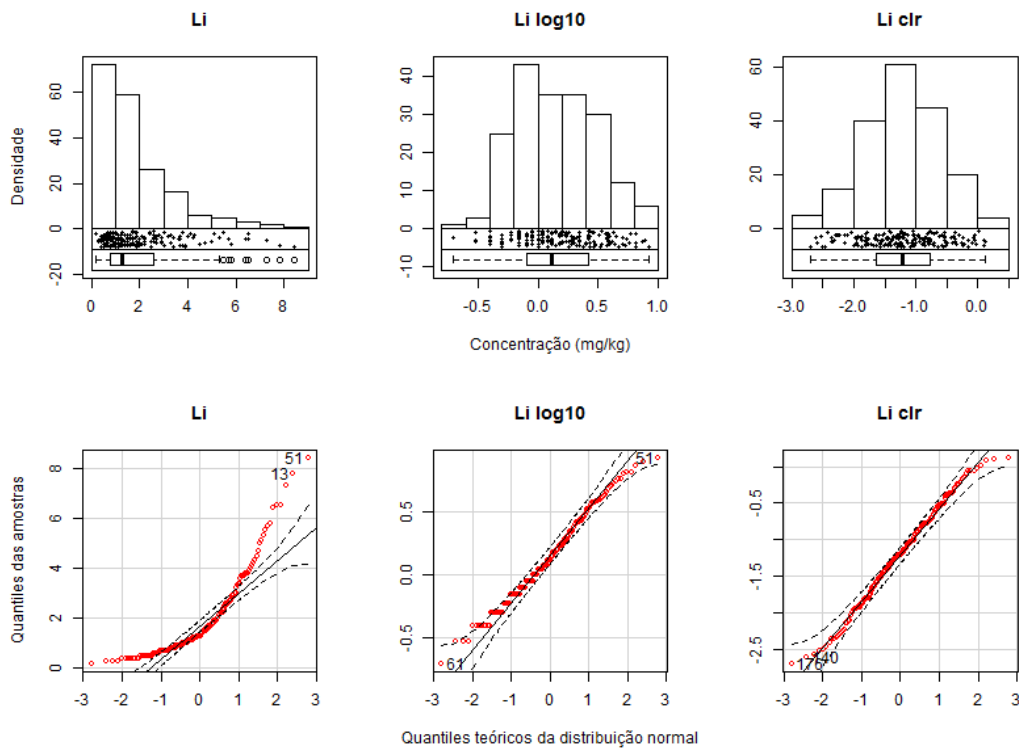
**Figura 19** – Gráficos de EDA e Q-Q para K: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



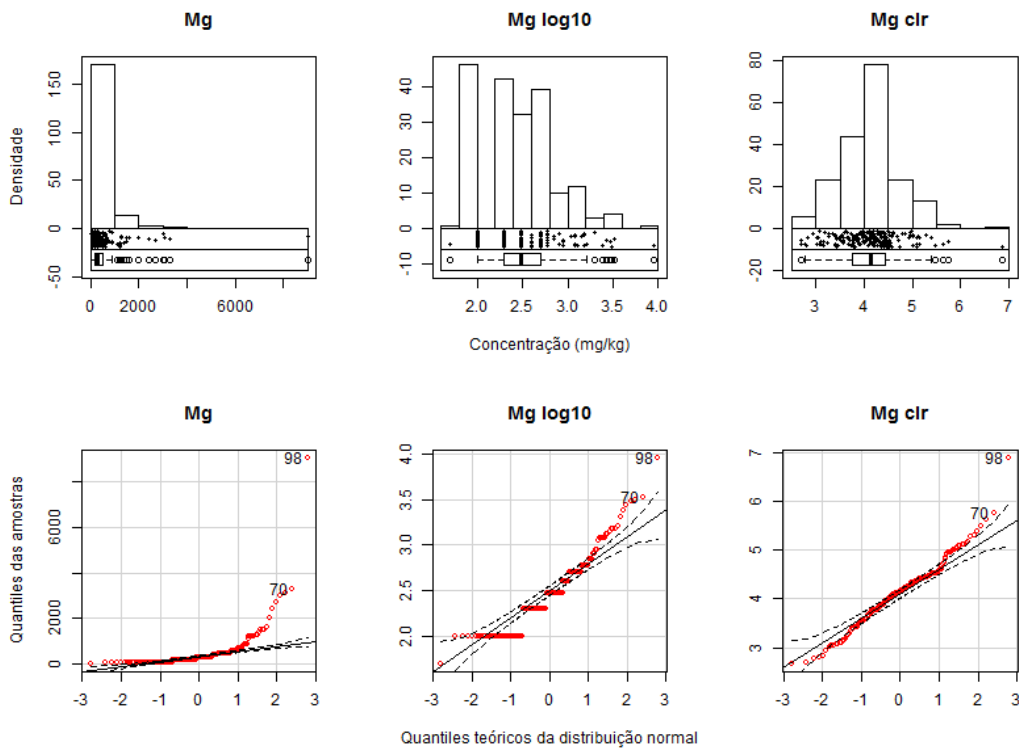
**Figura 20** – Gráficos de EDA e Q-Q para La: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



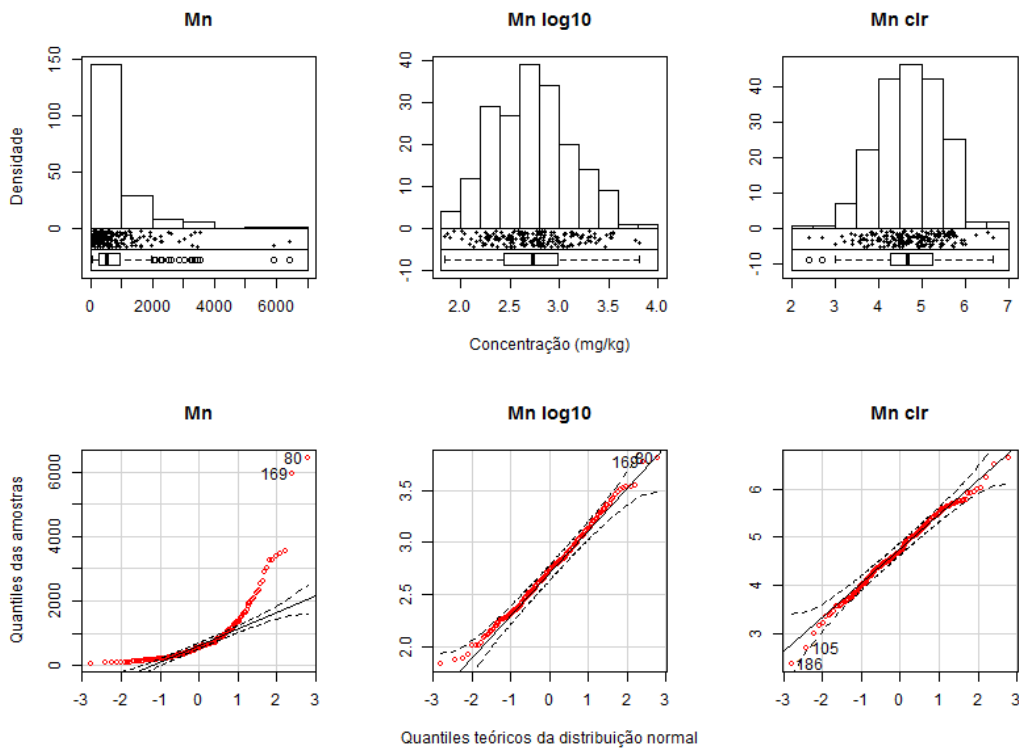
**Figura 21** – Gráficos de EDA e Q-Q para Li: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



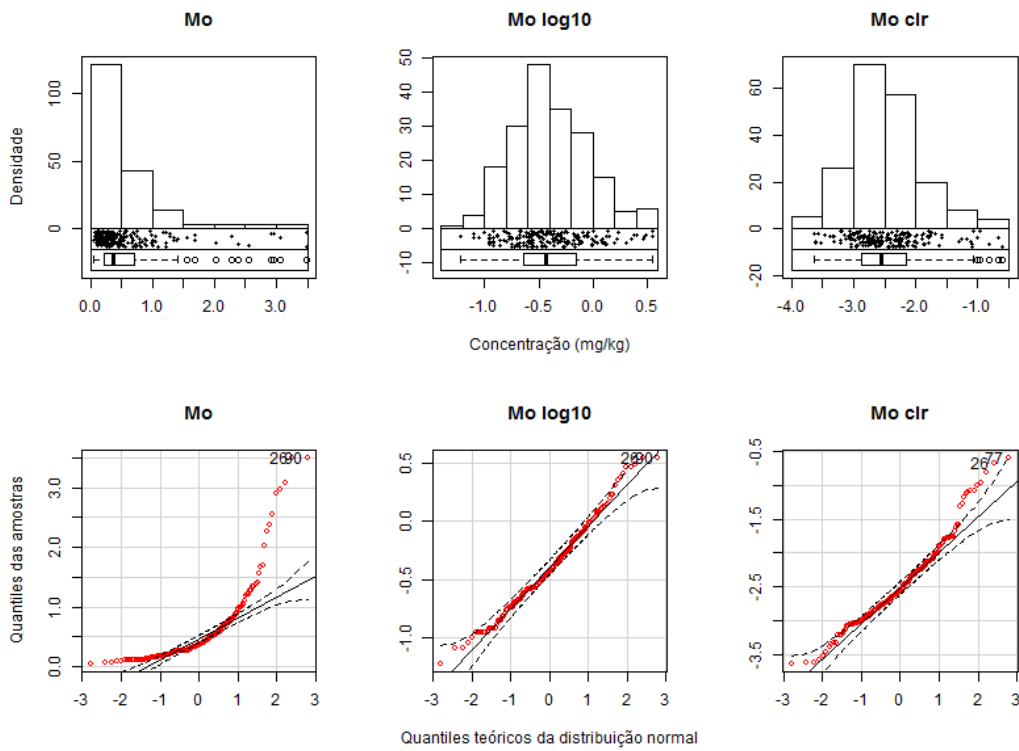
**Figura 22** – Gráficos de EDA e Q-Q para Mg: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



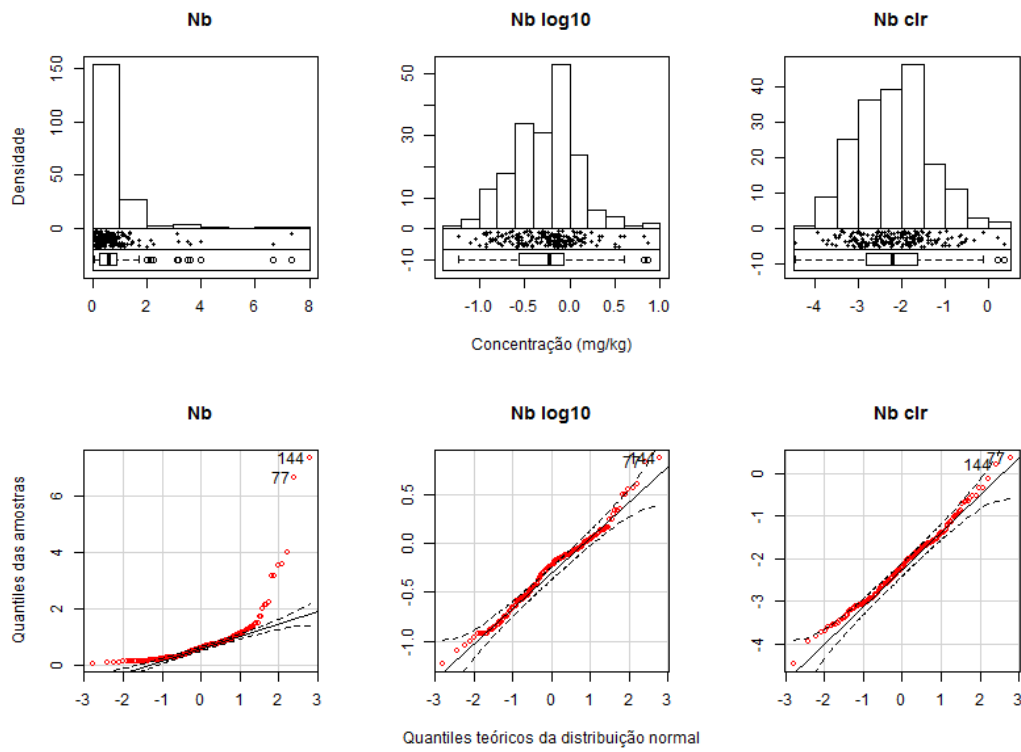
**Figura 23** – Gráficos de EDA e Q-Q para Mn: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



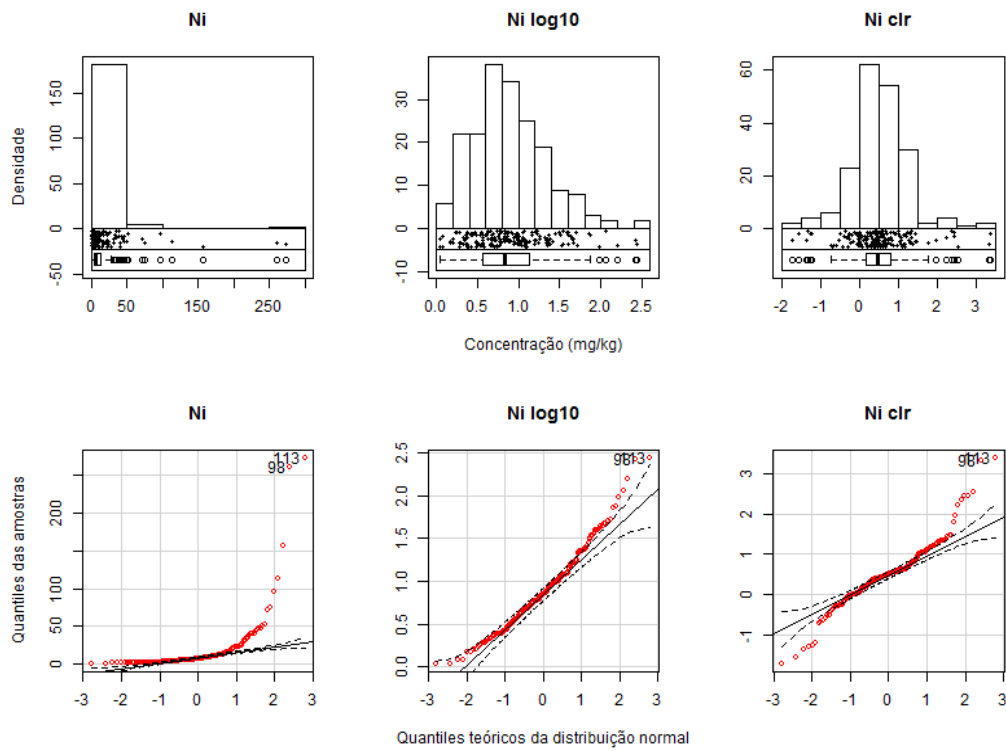
**Figura 24** – Gráficos de EDA e Q-Q para Mo: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



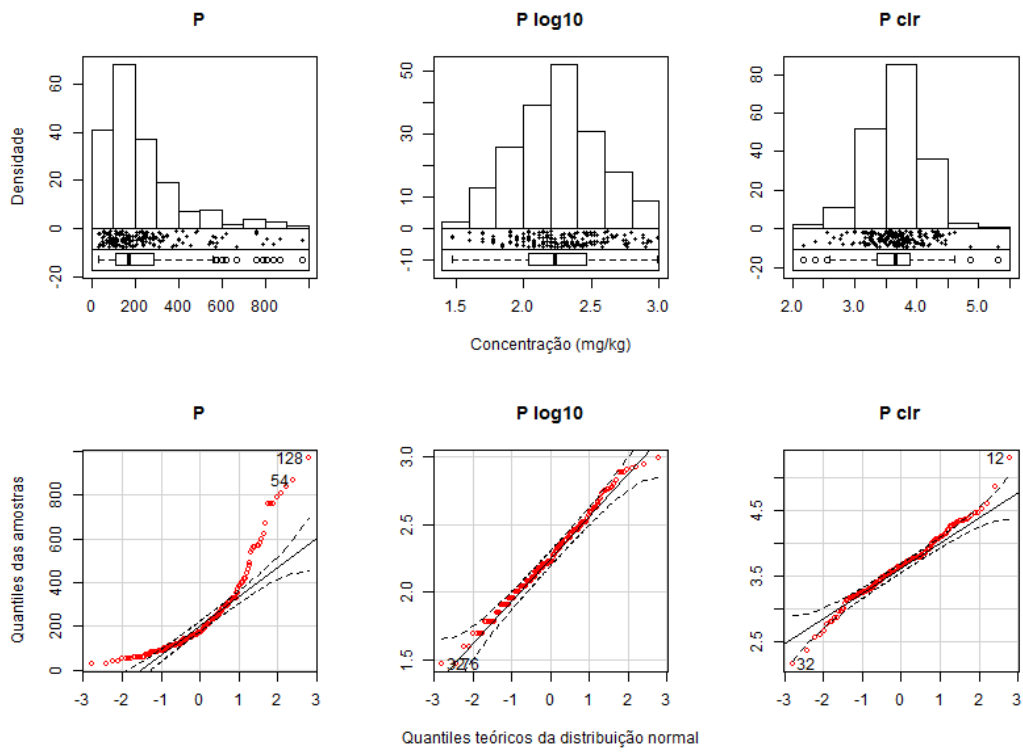
**Figura 25** – Gráficos de EDA e Q-Q para Nb: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



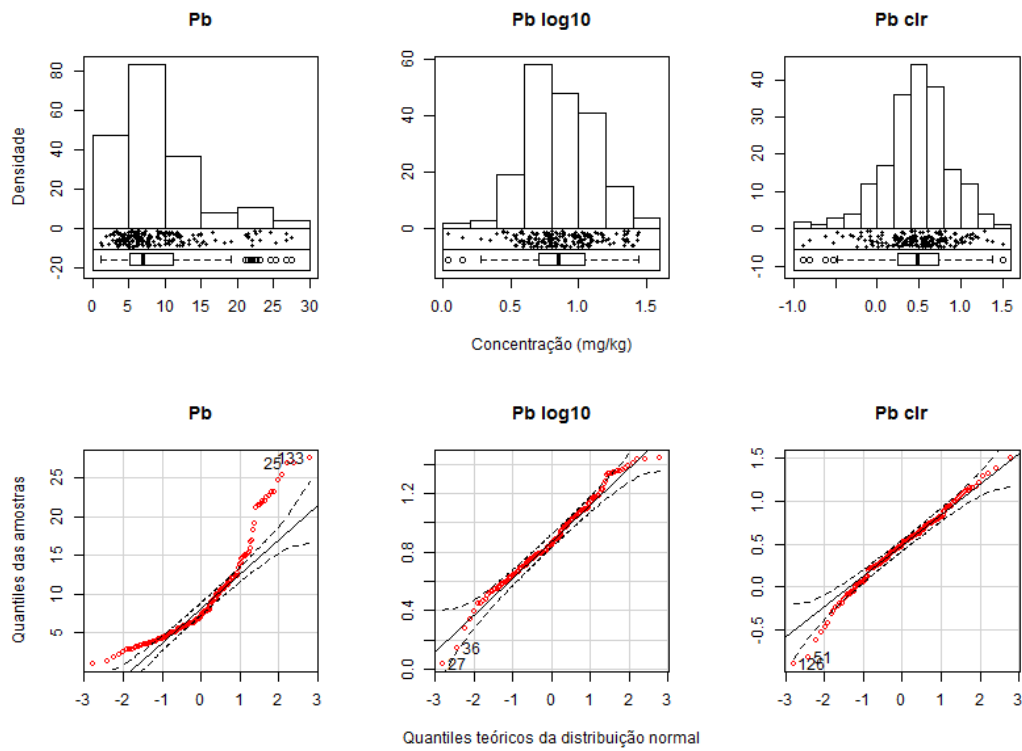
**Figura 26** – Gráficos de EDA e Q-Q para Ni: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



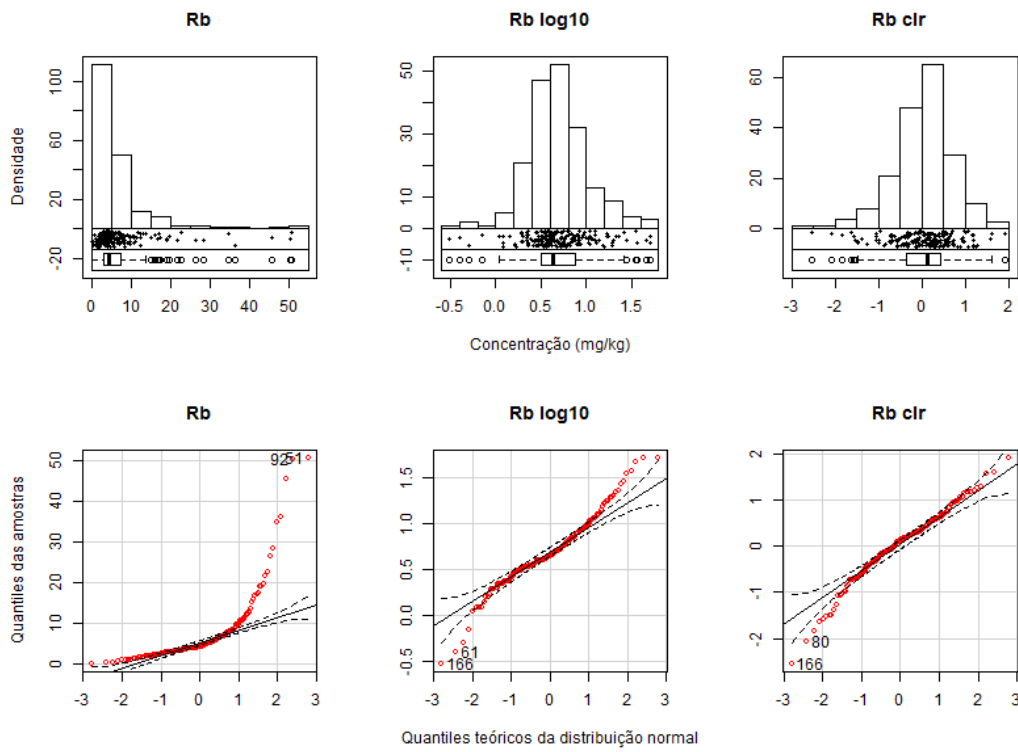
**Figura 27** – Gráficos de EDA e Q-Q para P: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



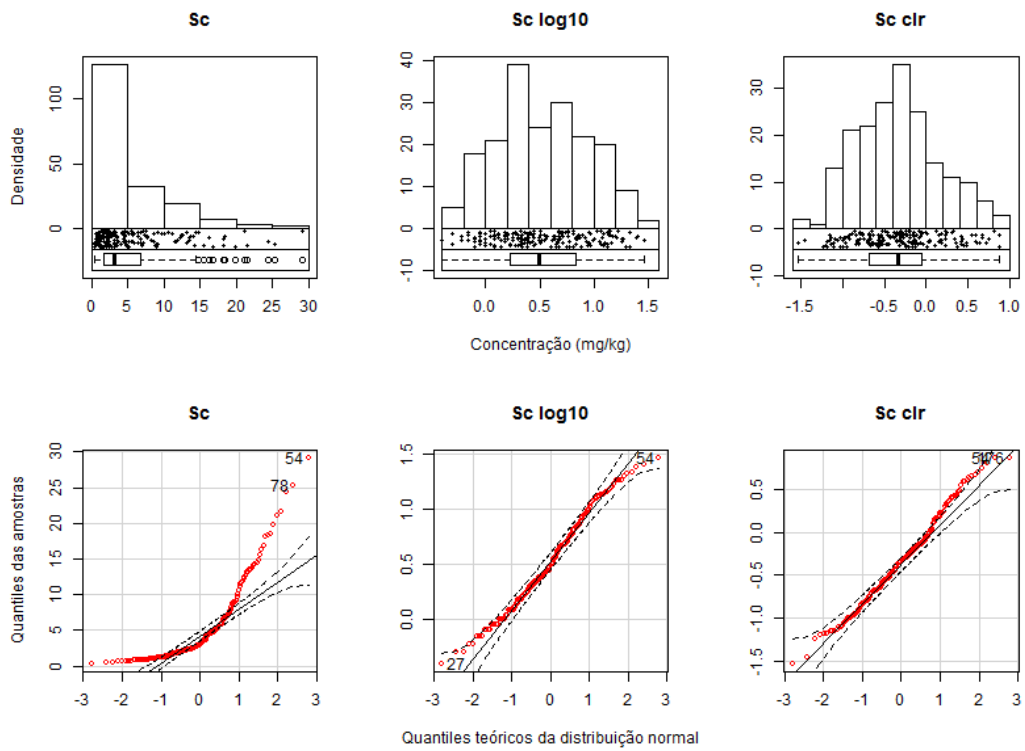
**Figura 28** – Gráficos de EDA e Q-Q para Pb: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



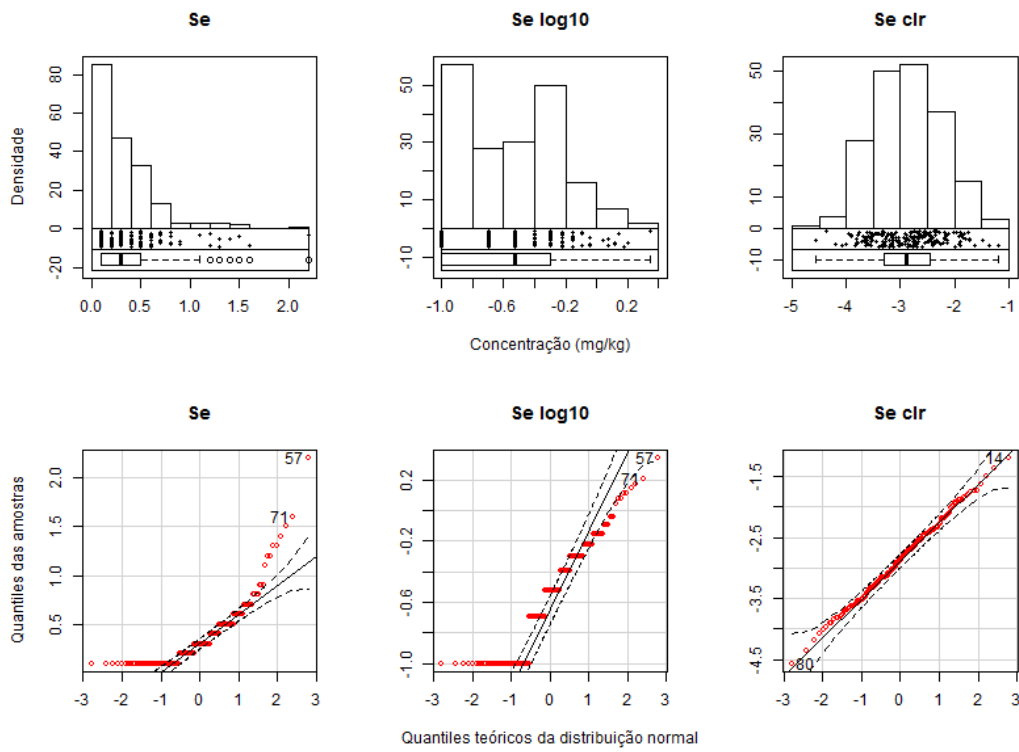
**Figura 29** – Gráficos de EDA e Q-Q para Rb: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



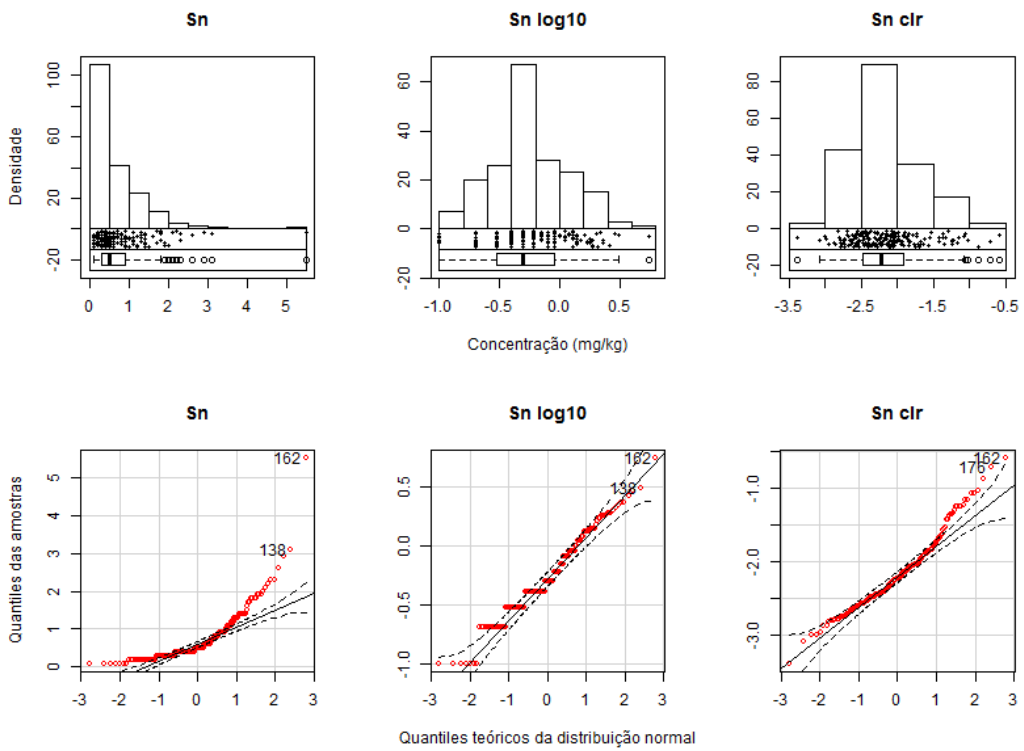
**Figura 30** – Gráficos de EDA e Q-Q para Sc: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



**Figura 31** – Gráficos de EDA e Q-Q para Se: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)

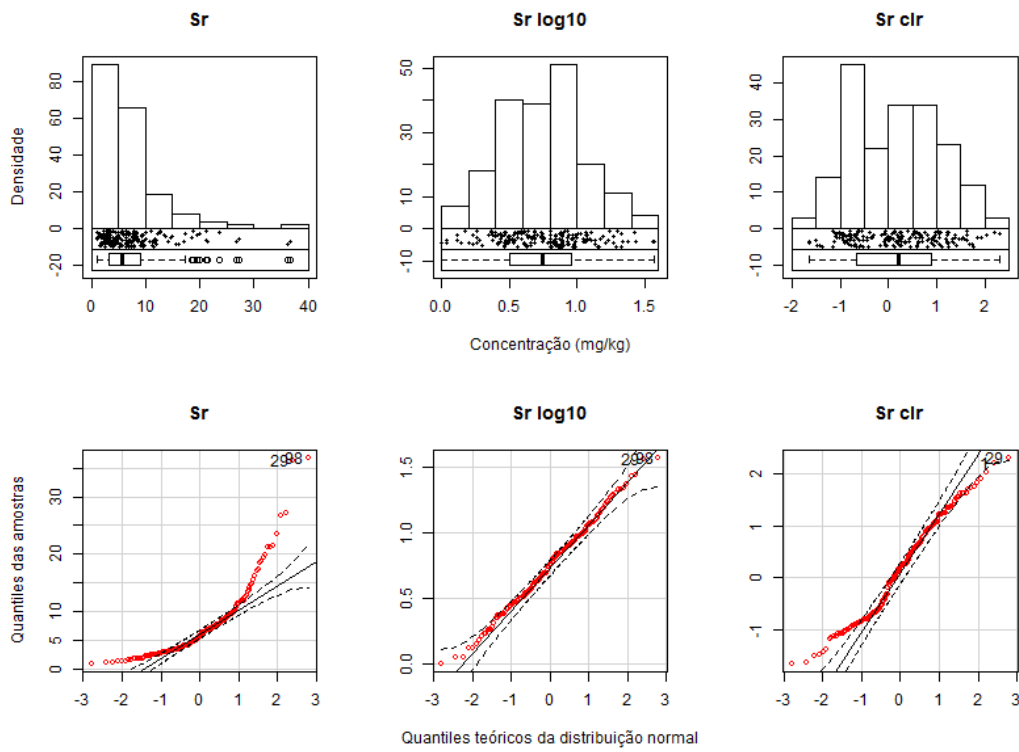


**Figura 32** – Gráficos de EDA e Q-Q para Sn: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)

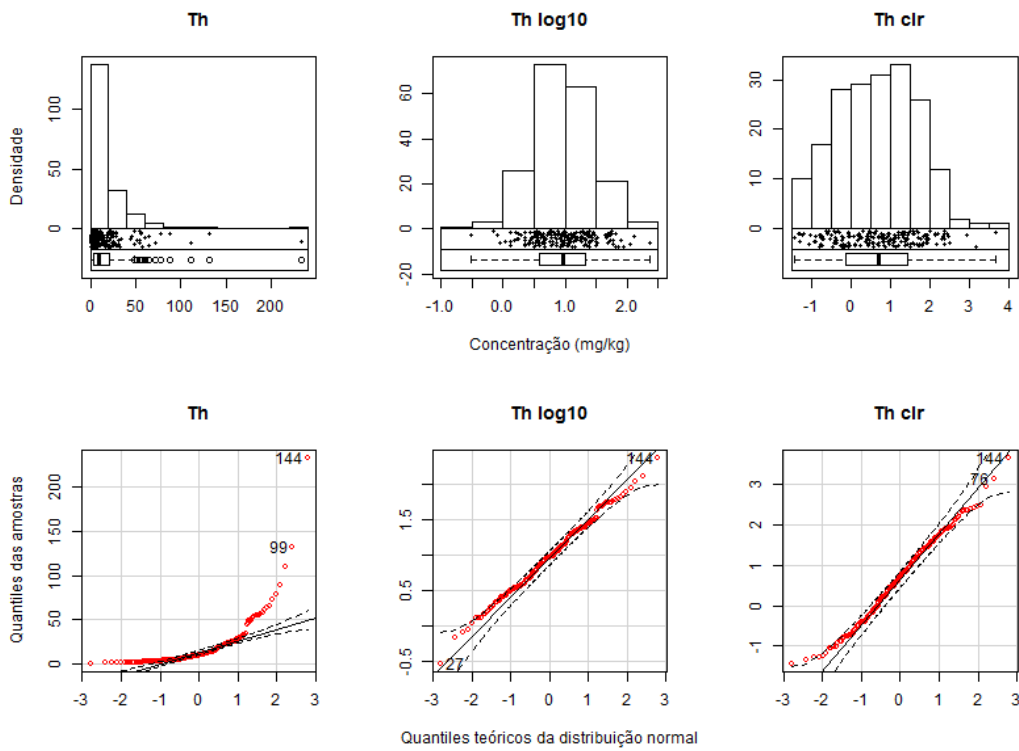




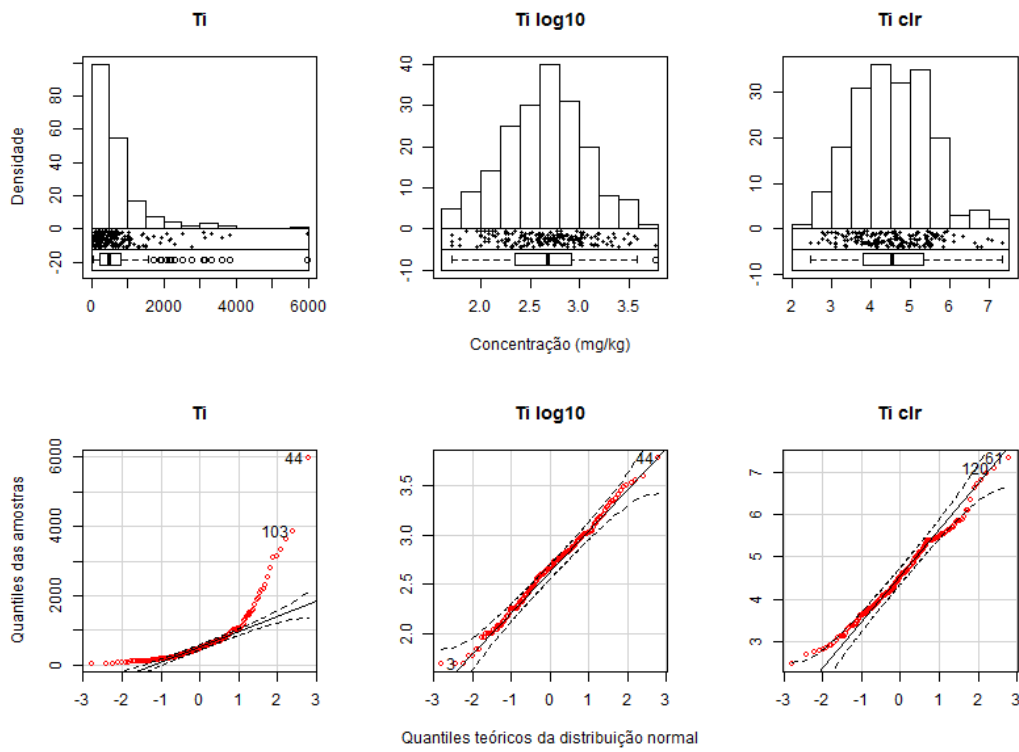
**Figura 33** – Gráficos de EDA e Q-Q para Sr: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



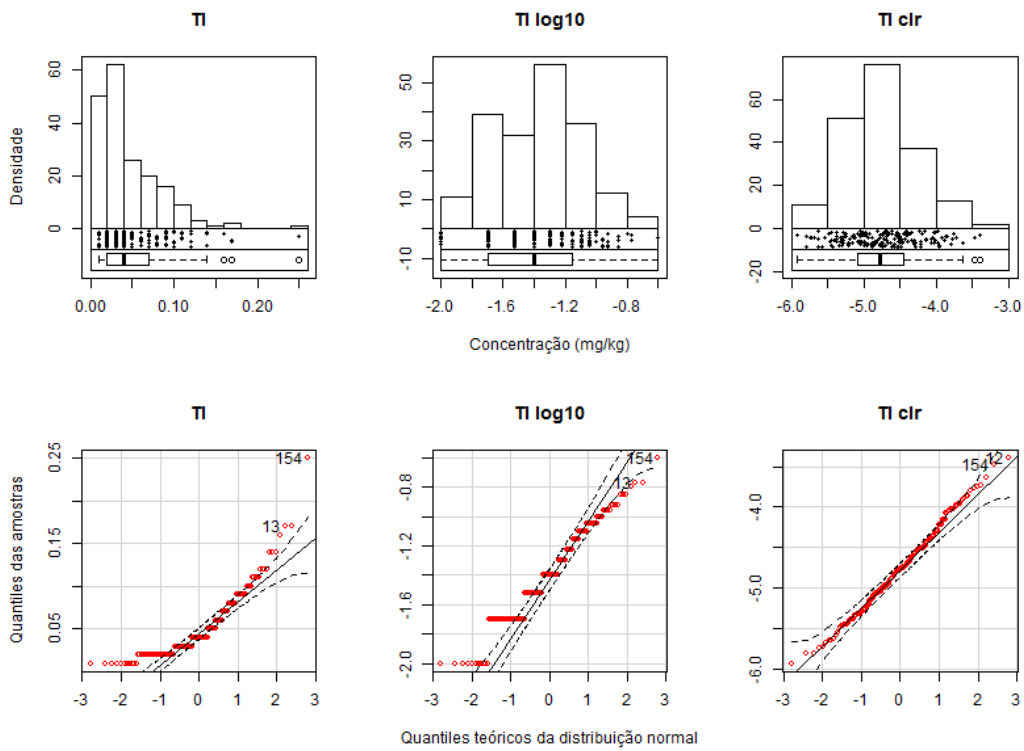
**Figura 34** – Gráficos de EDA e Q-Q para Th: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



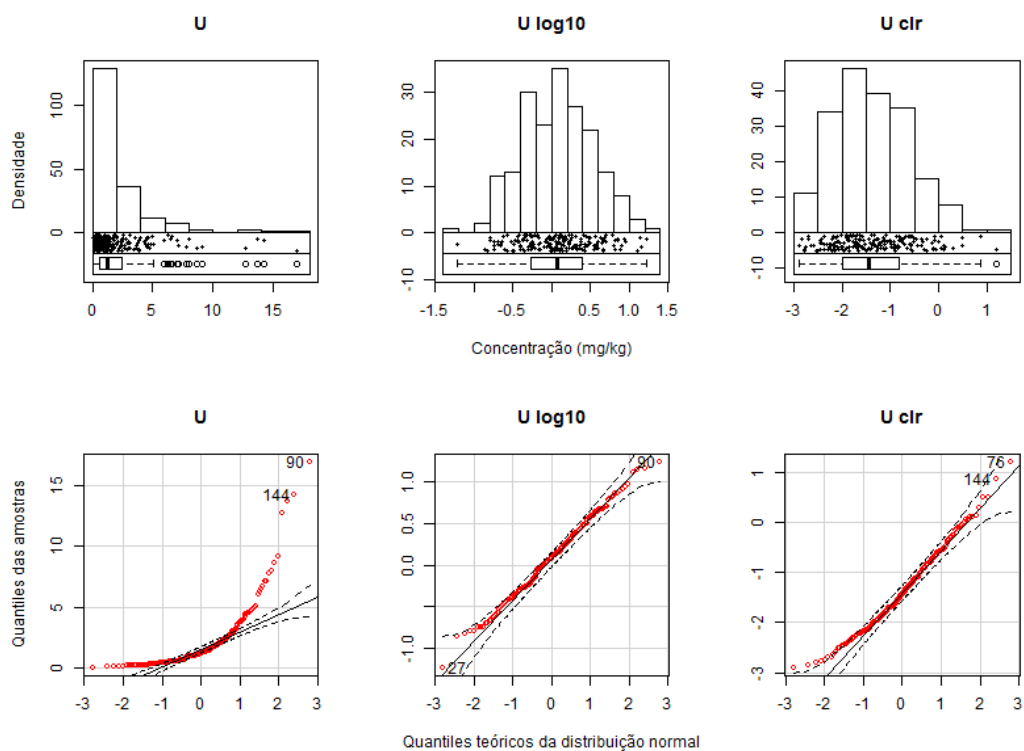
**Figura 35** – Gráficos de EDA e Q-Q para Ti: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



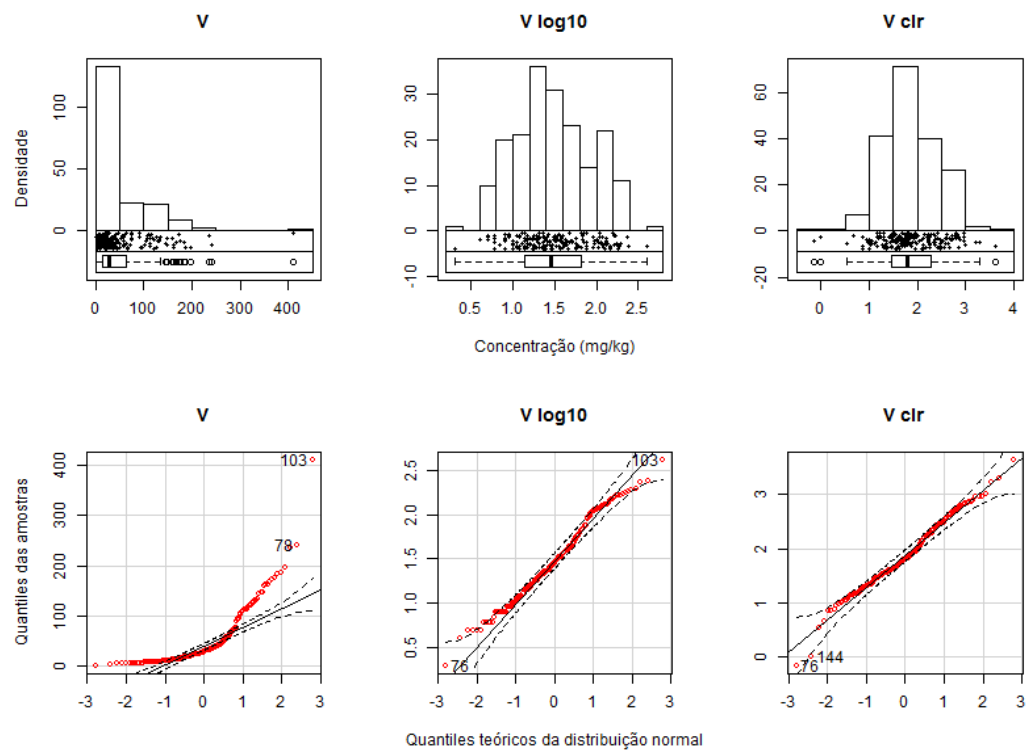
**Figura 36** – Gráficos de EDA e Q-Q para TI: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



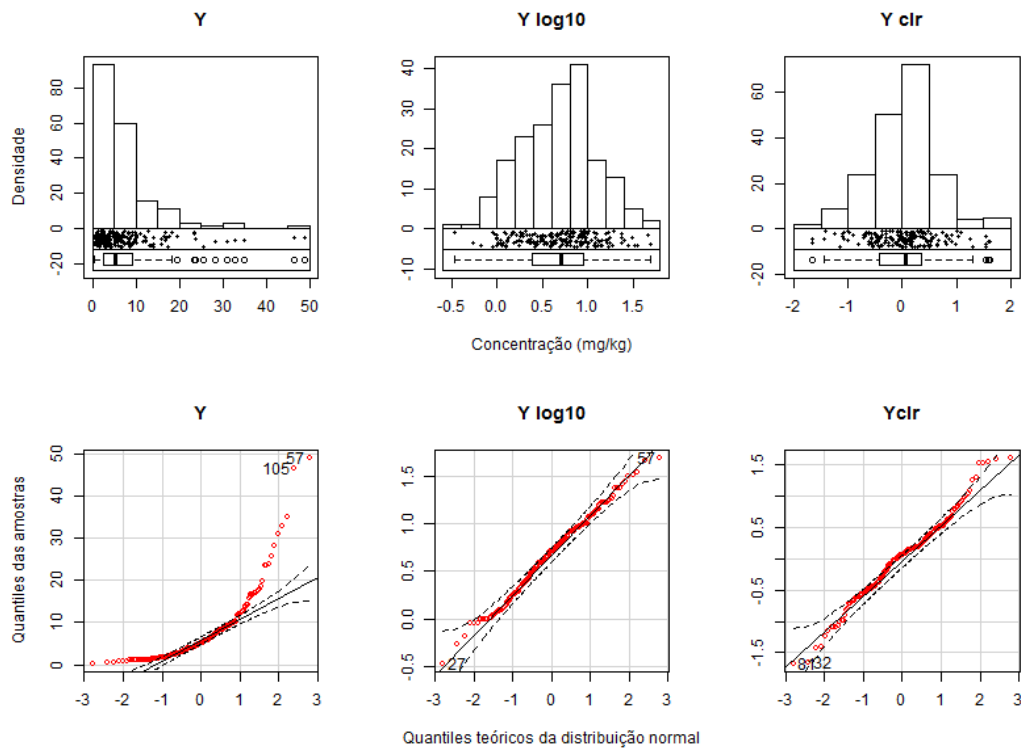
**Figura 37** – Gráficos de EDA e Q-Q para U: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



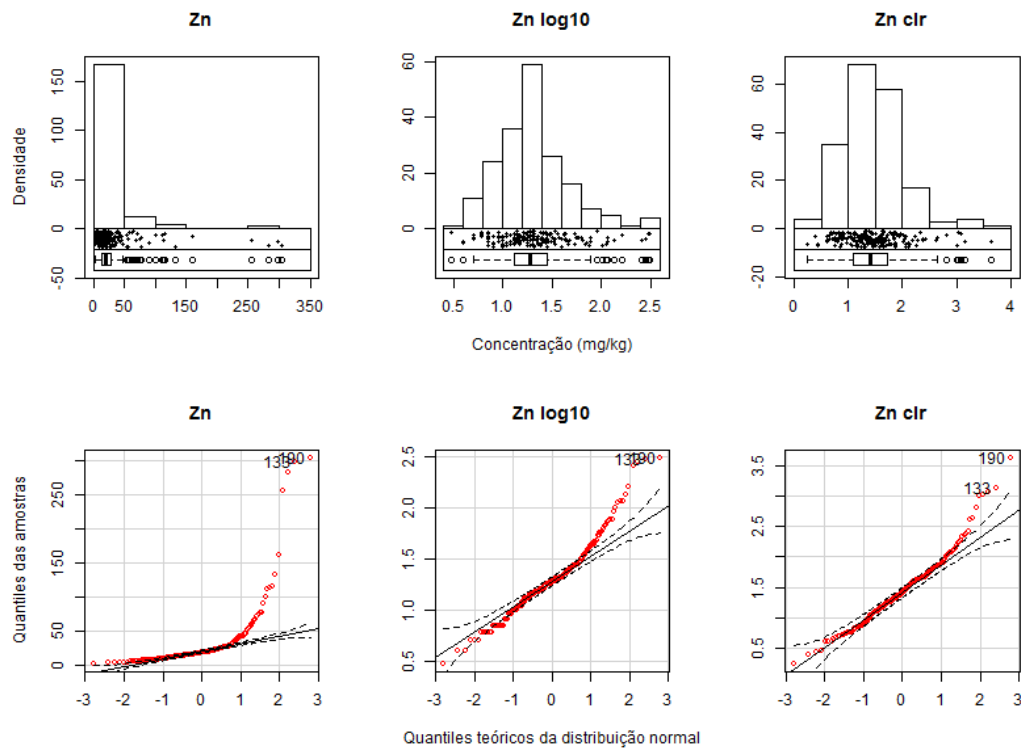
**Figura 38** – Gráficos de EDA e Q-Q para V: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



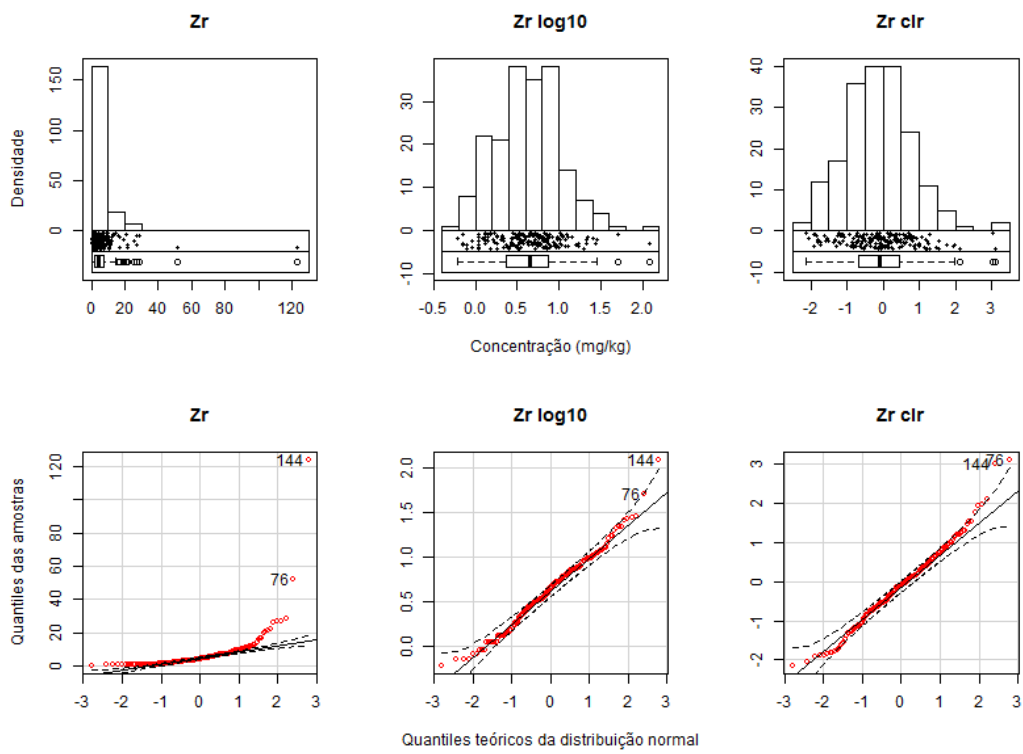
**Figura 39** – Gráficos de EDA e Q-Q para Y: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



**Figura 40** – Gráficos de EDA e Q-Q para Zn: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



**Figura 41** – Gráficos de EDA e Q-Q para Zr: dados brutos (esquerda), log transformados (centro) e clr transformados (direita)



## APÊNDICE C – Matrizes de correlação.

**Tabela 1** – Coeficientes da matriz de correlação de 41 elementos presentes em sedimentos ativos de corrente da BHRP (dados brutos e log<sub>10</sub>).

	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Ga	Hf	Hg	In	K	La	Li	
Al	0,57																					
As	0,55	0,64																				
Ba	0,47	0,54	0,37																			
Be	0,57	0,68	0,57	0,53																		
Bi	0,65	0,62	0,71	0,33	0,63																	
Ca	0,45	0,43	0,21	0,67	0,47	0,23																
Cd	0,67	0,37	0,47	0,49	0,49	0,5	0,47															
Ce	0,35	0,42	0,37	0,26	0,7	0,45	0,27	0,29														
Co	0,63	0,55	0,53	0,59	0,65	0,6	0,6	0,69	0,46													
Cr	0,54	0,54	0,56	0,31	0,49	0,61	0,43	0,51	0,35	0,77												
Cs	0,31	0,66	0,32	0,52	0,44	0,4	0,42	0,2	0,22	0,36	0,33											
Cu	0,6	0,65	0,66	0,31	0,71	0,67	0,35	0,54	0,58	0,7	0,69	0,23										
Fe	0,64	0,73	0,8	0,39	0,67	0,75	0,36	0,57	0,49	0,73	0,71	0,28	0,85									
Ga	0,6	0,96	0,7	0,47	0,74	0,71	0,37	0,39	0,56	0,57	0,59	0,57	0,74	0,81								
Hf	-0,07	0,08	0,21	-0,18	0,19	0,14	-0,2	-0,07	0,27	-0,04	0,07	-0,25	0,3	0,29	0,18							
Hg	0,54	0,76	0,57	0,36	0,56	0,62	0,23	0,38	0,38	0,43	0,45	0,45	0,59	0,68	0,79	0,12						
In	0,6	0,78	0,75	0,39	0,75	0,77	0,26	0,49	0,58	0,61	0,6	0,32	0,8	0,89	0,88	0,35	0,75					
K	0	0,16	0,12	0,4	0,32	0,02	0,38	0,02	0,08	0,08	-0,01	0,34	0,05	-0,01	0,08	-0,01	-0,01	-0,03				
La	0,22	0,28	0,2	0,25	0,66	0,28	0,29	0,21	0,88	0,35	0,19	0,17	0,49	0,32	0,39	0,24	0,22	0,41	0,2			
Li	0,48	0,63	0,35	0,69	0,6	0,41	0,59	0,44	0,23	0,58	0,4	0,75	0,37	0,35	0,52	-0,21	0,29	0,35	0,41	0,26		
Mg	0,55	0,58	0,41	0,62	0,7	0,5	0,73	0,55	0,44	0,74	0,63	0,52	0,61	0,53	0,56	-0,06	0,36	0,49	0,41	0,46	0,74	
Mn	0,56	0,35	0,39	0,64	0,42	0,47	0,57	0,61	0,26	0,81	0,56	0,22	0,45	0,56	0,37	-0,03	0,3	0,46	-0,01	0,18	0,45	
Mo	0,44	0,63	0,7	0,21	0,62	0,66	0,18	0,31	0,5	0,44	0,51	0,24	0,73	0,78	0,73	0,38	0,61	0,77	0,09	0,36	0,19	
Nb	-0,06	0	0,14	-0,18	0,31	0,13	-0,09	0,04	0,46	0,07	0,09	-0,17	0,37	0,23	0,15	0,55	0,06	0,32	0,02	0,51	-0,18	
Ni	0,64	0,57	0,53	0,44	0,61	0,6	0,59	0,63	0,39	0,87	0,9	0,37	0,76	0,71	0,58	0	0,43	0,57	0,17	0,29	0,56	
P	0,68	0,68	0,61	0,58	0,67	0,61	0,54	0,7	0,5	0,75	0,59	0,42	0,71	0,79	0,71	-0,07	0,61	0,73	0,01	0,39	0,5	
Pb	0,53	0,62	0,48	0,52	0,71	0,58	0,37	0,43	0,59	0,57	0,47	0,32	0,55	0,62	0,69	0,19	0,62	0,73	0,05	0,49	0,35	
Rb	0,25	0,5	0,34	0,49	0,64	0,35	0,46	0,23	0,46	0,36	0,28	0,65	0,37	0,28	0,49	-0,05	0,39	0,36	0,7	0,49	0,57	
Sc	0,65	0,84	0,72	0,43	0,74	0,77	0,38	0,55	0,55	0,75	0,74	0,44	0,85	0,89	0,9	0,2	0,72	0,92	-0,01	0,38	0,5	
Se	0,39	0,67	0,43	0,31	0,49	0,5	0,34	0,23	0,48	0,4	0,46	0,4	0,56	0,55	0,72	0,05	0,65	0,62	0,03	0,33	0,31	
Sn	0,45	0,71	0,62	0,28	0,69	0,62	0,24	0,34	0,58	0,48	0,53	0,26	0,74	0,79	0,8	0,44	0,62	0,84	0,07	0,44	0,24	
Sr	0,01	0,11	-0,19	0,58	0,03	-0,2	0,63	0,05	-0,08	0,11	-0,05	0,4	-0,26	-0,2	-0,03	-0,42	-0,04	-0,23	0,34	0	0,39	
Th	-0,02	0,17	0,13	-0,17	0,42	0,19	-0,08	-0,08	0,69	0,05	0,11	-0,05	0,39	0,24	0,32	0,55	0,27	0,38	-0,02	0,67	-0,2	
Ti	-0,01	-0,06	0,06	-0,13	0,12	0,08	0,01	0,12	0,24	0,24	0,23	-0,3	0,34	0,26	0,02	0,61	-0,11	0,24	-0,11	0,31	-0,12	
Tl	0,53	0,75	0,51	0,71	0,66	0,56	0,43	0,49	0,39	0,61	0,45	0,75	0,44	0,52	0,72	-0,15	0,64	0,6	0,3	0,29	0,7	
U	0,24	0,45	0,38	0,04	0,68	0,48	0,09	0,14	0,75	0,3	0,36	0,22	0,62	0,48	0,59	0,45	0,47	0,61	0,12	0,7	0,1	
V	0,65	0,75	0,72	0,37	0,64	0,76	0,39	0,58	0,49	0,79	0,81	0,34	0,83	0,92	0,82	0,18	0,67	0,87	-0,11	0,29	0,4	
Y	0,44	0,46	0,41	0,4	0,86	0,49	0,39	0,44	0,78	0,57	0,4	0,24	0,67	0,55	0,58	0,33	0,41	0,66	0,22	0,83	0,42	
Zn	0,65	0,51	0,63	0,53	0,64	0,62	0,45	0,73	0,39	0,71	0,58	0,22	0,65	0,7	0,56	0,15	0,45	0,67	0,13	0,33	0,48	
Zr	-0,05	0,09	0,25	-0,2	0,17	0,16	-0,22	-0,04	0,26	-0,02	0,08	-0,28	0,33	0,32	0,19	0,97	0,11	0,37	-0,05	0,21	-0,22	

Continua...

	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	P	Pb	Rb	Sc	Se	Sn	Sr	Th	Ti	Tl	U	V	Y	Zn
<b>Mn</b>	0,55																		
<b>Mo</b>	0,32	0,26																	
<b>Nb</b>	0,03	0	0,37																
<b>Ni</b>	0,8	0,62	0,47	0,07															
<b>P</b>	0,62	0,62	0,51	0,09	0,65														
<b>Pb</b>	0,5	0,48	0,52	0,26	0,47	0,6													
<b>Rb</b>	0,58	0,17	0,36	0,17	0,4	0,36	0,39												
<b>Sc</b>	0,63	0,53	0,71	0,19	0,73	0,77	0,68	0,39											
<b>Se</b>	0,4	0,25	0,52	0,12	0,42	0,52	0,5	0,36	0,65										
<b>Sn</b>	0,44	0,32	0,78	0,43	0,52	0,56	0,63	0,39	0,8	0,55									
<b>Sr</b>	0,3	0,23	-0,27	-0,39	0,07	0,12	0,03	0,24	-0,15	0	-0,21								
<b>Th</b>	0,06	-0,08	0,4	0,68	0,06	0,13	0,39	0,25	0,29	0,33	0,49	-0,29							
<b>Ti</b>	0,13	0,25	0,16	0,65	0,21	0,07	0,13	-0,13	0,21	0	0,32	-0,33	0,37						
<b>Tl</b>	0,61	0,46	0,44	-0,11	0,51	0,63	0,62	0,66	0,66	0,46	0,44	0,27	0,04	-0,23					
<b>U</b>	0,31	0,07	0,64	0,61	0,34	0,36	0,56	0,49	0,54	0,5	0,66	-0,26	0,86	0,26	0,33				
<b>V</b>	0,6	0,6	0,67	0,15	0,78	0,77	0,64	0,28	0,95	0,6	0,74	-0,16	0,21	0,26	0,56	0,45			
<b>Y</b>	0,6	0,39	0,53	0,5	0,49	0,56	0,65	0,56	0,62	0,42	0,61	-0,06	0,57	0,35	0,48	0,73	0,53		
<b>Zn</b>	0,65	0,66	0,47	0,19	0,67	0,67	0,61	0,34	0,66	0,31	0,52	-0,04	0,09	0,26	0,52	0,31	0,67	0,58	
<b>Zr</b>	-0,08	-0,02	0,4	0,55	0,01	-0,05	0,16	-0,09	0,24	0,06	0,45	-0,46	0,52	0,64	-0,16	0,42	0,22	0,3	0,15

**Tabela 2** – Coeficientes da matriz de correlação de 41 elementos presentes em sedimentos ativos de corrente da BHRP (*chl*).

	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Ga	Hf	Hg	In	K	La	Li		
Al	0,09																						
As	0,12	0,18																					
Ba	0,21	0,13	-0,12																				
Be	-0,07	0,11	-0,02	-0,01																			
Bi	0,29	0,1	0,38	-0,24	0,11																		
Ca	0,16	-0,03	-0,33	0,54	-0,12	-0,38																	
Cd	0,44	-0,18	0,05	0,26	-0,14	0,09	0,23																
Ce	-0,3	-0,21	-0,23	-0,28	0,35	-0,11	-0,2	-0,34															
Co	0,14	-0,08	0,07	0,11	0,16	0,14	0,15	0,34	-0,13														
Cr	-0,01	-0,03	0,12	-0,22	-0,16	0,23	0,02	0,1	-0,27	0,54													
Cs	-0,01	0,45	-0,11	0,4	0,04	-0,03	0,29	-0,13	-0,13	-0,12	-0,06												
Cu	0,02	0,04	0,28	-0,48	0,23	0,26	-0,39	0,03	0,04	0,39	0,31	-0,44											
Fe	0,12	0,2	0,54	-0,27	-0,03	0,32	-0,28	0,13	-0,27	0,36	0,35	-0,4	0,6										
Ga	0,05	0,88	0,3	-0,11	0,23	0,25	-0,28	-0,22	-0,02	0,03	0,05	0,21	0,29	0,38									
Hf	-0,34	-0,33	-0,09	-0,29	-0,26	-0,16	-0,3	-0,3	0,09	-0,52	-0,23	-0,34	-0,15	-0,12	-0,33								
Hg	0,14	0,47	0,16	-0,06	0,02	0,22	-0,22	-0,02	-0,09	-0,12	-0,04	0,14	0,11	0,22	0,52	-0,18							
In	-0,02	0,27	0,42	-0,37	0,22	0,46	-0,54	-0,06	0,03	0,18	0,16	-0,38	0,55	0,66	0,57	-0,05	0,38						
K	-0,14	-0,06	-0,2	0,42	0,04	-0,35	0,33	-0,18	-0,11	-0,32	-0,31	0,47	-0,47	-0,58	-0,33	0,07	-0,24	-0,65					
La	-0,27	-0,31	-0,36	-0,17	0,35	-0,24	-0,07	-0,28	0,86	-0,2	-0,38	-0,09	-0,03	-0,42	-0,2	0,15	-0,22	-0,15	0,09				
Li	0,2	0,37	-0,1	0,53	0,21	-0,07	0,42	0,19	-0,28	0,18	-0,02	0,69	-0,24	-0,29	0,13	-0,44	-0,12	-0,34	0,43	-0,14			
Mg	0,11	0,01	-0,16	0,24	0,26	-0,04	0,42	0,19	-0,11	0,43	0,28	0,25	0,15	-0,14	-0,07	-0,44	-0,22	-0,19	0,22	0,01	0,52		
Mn	0,24	-0,21	0,01	0,48	-0,16	0,03	0,35	0,41	-0,25	0,6	0,21	-0,1	-0,08	0,17	-0,22	-0,27	-0,15	-0,03	-0,19	-0,26	0,16		
Mo	-0,11	0,08	0,34	-0,4	0,01	0,2	-0,39	-0,29	0	-0,19	0,02	-0,21	0,28	0,39	0,22	0,18	0,21	0,3	-0,15	-0,11	-0,42		
Nb	-0,43	-0,52	-0,19	-0,38	-0,11	-0,22	-0,27	-0,24	0,35	-0,4	-0,22	-0,3	-0,09	-0,27	-0,44	0,57	-0,31	-0,12	0,07	0,44	-0,45		
Ni	0,16	-0,01	0,08	-0,06	0,13	0,2	0,13	0,24	-0,27	0,73	0,76	-0,05	0,5	0,3	0,03	-0,43	-0,11	0,09	-0,15	-0,29	0,22		
P	0,28	0,15	0,14	0,26	0,06	0,06	0,23	0,41	-0,11	0,33	0,03	0,08	0,09	0,27	0,12	-0,57	0,13	0,13	-0,25	-0,14	0,18		
Pb	0,02	0,03	-0,2	0,21	0,1	-0,08	0,01	-0,05	0,17	-0,09	-0,17	0,01	-0,34	-0,19	0,05	-0,01	0,09	0,03	-0,09	0,16	-0,08		
Rb	-0,22	0,13	-0,2	0,29	0,34	-0,2	0,17	-0,26	0,12	-0,18	-0,24	0,6	-0,29	-0,53	0,01	-0,21	-0,02	-0,37	0,73	0,22	0,44		
Sc	0,05	0,47	0,32	-0,32	0,14	0,38	-0,35	0,03	-0,13	0,46	0,42	-0,16	0,63	0,66	0,67	-0,32	0,3	0,76	-0,61	-0,32	-0,04		
Se	-0,07	0,31	-0,08	-0,09	-0,07	0,04	0,01	-0,25	0,12	-0,15	-0,01	0,1	0,05	0	0,36	-0,17	0,38	0,1	-0,12	-0,02	-0,11		
Sn	-0,25	0,2	0,14	-0,42	0,07	0,07	-0,4	-0,33	0,09	-0,22	-0,03	-0,26	0,27	0,32	0,33	0,3	0,13	0,44	-0,23	-0,01	-0,43		
Sr	0,04	0,07	-0,37	0,69	-0,18	-0,39	0,76	0,08	-0,12	-0,13	-0,16	0,56	-0,7	-0,55	-0,25	-0,16	-0,1	-0,66	0,52	0	0,47		
Th	-0,44	-0,27	-0,25	-0,49	0,14	-0,13	-0,37	-0,48	0,68	-0,42	-0,28	-0,26	0,02	-0,25	-0,11	0,48	-0,02	0,05	-0,09	0,64	-0,56		
Ti	-0,32	-0,51	-0,26	-0,29	-0,32	-0,27	-0,07	-0,09	0,06	-0,07	0,05	-0,41	-0,02	-0,09	-0,53	0,6	-0,47	-0,16	-0,02	0,2	-0,33		
Tl	0,12	0,41	-0,04	0,49	0,15	0,04	0,12	0,09	-0,12	0,09	-0,09	0,65	-0,37	-0,28	0,31	-0,46	0,31	-0,1	0,28	-0,14	0,51		
U	-0,39	-0,11	-0,13	-0,57	0,37	0,1	-0,48	-0,49	0,62	-0,25	-0,12	-0,15	0,26	-0,12	0,12	0,22	0,08	0,2	-0,13	0,55	-0,45		
V	0,06	0,27	0,37	-0,35	0,02	0,4	-0,26	0,1	-0,17	0,54	0,57	-0,28	0,6	0,78	0,47	-0,29	0,24	0,7	-0,69	-0,39	-0,19		
Y	-0,21	-0,28	-0,2	-0,26	0,63	-0,06	-0,2	-0,15	0,61	0,11	-0,17	-0,27	0,29	-0,13	-0,04	0,04	-0,14	0,21	-0,13	0,69	-0,13		
Zn	0,29	-0,14	0,27	0,16	0,02	0,2	0,06	0,55	-0,29	0,27	0,06	-0,27	0,1	0,23	-0,12	-0,15	-0,1	0,14	-0,16	-0,25	0,1		
Zr	-0,33	-0,33	-0,04	-0,32	-0,31	-0,15	-0,34	-0,25	0,07	-0,5	-0,21	-0,38	-0,11	-0,05	-0,32	0,97	-0,21	-0,02	0,03	0,11	-0,46		

Continua...



	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	P	Pb	Rb	Sc	Se	Sn	Sr	Th	Ti	Tl	U	V	Y	Zn
<b>Mn</b>	0,18																		
<b>Mo</b>	-0,44	-0,32																	
<b>Nb</b>	-0,37	-0,26	0,12																
<b>Ni</b>	0,61	0,24	-0,13	-0,38															
<b>P</b>	0,12	0,32	-0,21	-0,33	0,11														
<b>Pb</b>	-0,2	0,1	-0,15	0,02	-0,3	-0,01													
<b>Rb</b>	0,31	-0,27	-0,11	-0,03	-0,06	-0,19	0,01												
<b>Sc</b>	0,1	0,06	0,16	-0,39	0,4	0,18	-0,14	-0,32											
<b>Se</b>	-0,1	-0,21	0,09	-0,12	-0,11	0	0,03	0,03	0,15										
<b>Sn</b>	-0,31	-0,33	0,45	0,2	-0,13	-0,25	-0,06	-0,2	0,31	0,06									
<b>Sr</b>	0,23	0,21	-0,42	-0,19	-0,15	0,13	0,13	0,34	-0,56	-0,01	-0,39								
<b>Th</b>	-0,37	-0,41	0,17	0,63	-0,43	-0,36	0,12	0,02	-0,18	0,13	0,31	-0,25							
<b>Ti</b>	-0,14	0,04	-0,12	0,64	-0,1	-0,3	-0,07	-0,32	-0,21	-0,23	0,12	-0,13	0,32						
<b>Tl</b>	0,16	0,08	-0,17	-0,44	-0,04	0,13	0,24	0,54	0,01	0,02	-0,31	0,38	-0,32	-0,56					
<b>U</b>	-0,23	-0,49	0,32	0,44	-0,17	-0,34	0,04	0,16	0,03	0,19	0,36	-0,41	<b>0,83</b>	0,05	-0,19				
<b>V</b>	0,06	0,21	0,14	-0,37	0,46	0,26	-0,12	-0,49	<b>0,87</b>	0,11	0,23	-0,53	-0,24	-0,09	-0,15	-0,08			
<b>Y</b>	0,15	-0,13	-0,05	0,28	-0,02	-0,09	0,08	0,17	0,04	-0,1	0,07	-0,31	0,46	0,13	-0,13	0,54	-0,07		
<b>Zn</b>	0,19	0,4	-0,23	-0,18	0,2	0,24	0,06	-0,29	0,06	-0,32	-0,13	-0,1	-0,38	-0,01	-0,06	-0,39	0,15	-0,03	
<b>Zr</b>	-0,48	-0,24	0,19	0,56	-0,42	-0,53	-0,05	-0,28	-0,25	-0,18	0,31	-0,2	0,47	0,63	-0,49	0,19	-0,22	0	-0,13

## APÊNDICE D – Pesos (*loadings*) das variáveis nas Componentes Principais

**Tabela 1** - Pesos das variáveis em relação às oito primeiras componentes principais para sedimentos ativos de corrente na BRP (dados brutos).

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Ag	0.1656	-0.1396	0.1781	-0.1815	0.1707	-0.0753	0.0561	-0.1995
Al	0.2291	0.0120	-0.0106	0.2151	-0.0371	0.2176	0.0003	0.0176
As	0.1696	-0.0769	0.1126	-0.0233	0.0211	-0.1613	-0.1897	-0.0881
Ba	0.1804	-0.1250	-0.0580	-0.1955	0.2134	0.0568	0.0000	-0.0644
Be	0.1996	0.1381	-0.1361	0.0046	0.0721	-0.2133	-0.0455	0.0165
Bi	0.1669	-0.0561	0.1317	0.0047	0.1746	-0.1295	-0.0133	-0.1660
Ca	0.1343	-0.1246	-0.2116	-0.1589	-0.0888	0.0591	0.1727	0.2393
Cd	0.1605	-0.1723	0.1737	-0.2015	0.1441	-0.0312	0.0583	-0.0466
Ce	0.1150	0.2545	-0.0654	-0.0152	0.0862	-0.2134	0.2088	0.0886
Co	0.2129	-0.1268	-0.0697	-0.1089	-0.1894	-0.0932	-0.0149	0.0103
Cr	0.0640	-0.0457	0.0109	0.0545	-0.4203	-0.0436	0.2907	-0.4705
Cs	0.0955	-0.0170	-0.3339	0.0818	0.1402	0.2116	-0.0241	-0.1056
Cu	0.1991	-0.0141	-0.0347	-0.0014	-0.1763	-0.1577	-0.3786	0.0380
Fe	0.1968	-0.0983	0.2104	-0.0037	0.0000	-0.0229	-0.1221	-0.0938
Ga	0.2246	0.0554	0.0667	0.2494	-0.0315	0.1728	-0.0033	0.0148
Hf	0.0151	0.2530	0.1419	-0.3174	-0.0929	0.3633	-0.1247	-0.1077
Hg	0.1513	0.0579	0.1009	0.2976	0.0381	0.2645	0.0694	0.0707
In	0.2269	0.0245	0.1655	0.1180	0.0221	0.0768	-0.0892	0.0894
K	0.0619	0.0828	-0.3206	-0.0752	0.0017	0.0305	-0.4587	-0.1253
La	0.0953	0.2669	-0.1109	-0.1061	0.0897	-0.2579	0.1475	0.1422
Li	0.1780	-0.1174	-0.2551	-0.1037	0.0558	0.0917	-0.0957	-0.0401
Mg	0.1320	-0.0815	-0.2335	-0.1527	-0.2917	-0.0175	0.0129	0.0283
Mn	0.1799	-0.1748	0.0884	-0.2162	0.1393	-0.0032	0.0439	0.0214
Mo	0.1390	0.1954	0.0519	0.1784	0.0251	-0.1375	-0.0017	-0.1650
Nb	0.0191	0.2883	0.0700	-0.2188	-0.0495	0.0296	0.0370	-0.0353
Ni	0.1273	-0.0824	-0.1077	-0.0494	-0.4851	-0.0753	0.1652	-0.2552
P	0.2102	-0.1031	-0.0421	-0.0533	0.0287	0.0029	0.0649	0.1497
Pb	0.1746	0.0823	0.0551	-0.0552	0.0983	0.0254	0.3481	0.0144
Rb	0.1200	0.1740	-0.3244	0.0249	0.0921	-0.0684	-0.1956	-0.1006
Sc	0.2364	-0.0655	0.1253	0.1020	-0.1064	0.0673	-0.0928	0.0944
Se	0.1522	0.1017	-0.0328	0.2690	-0.0528	-0.0159	0.1508	0.0648
Sn	0.1668	0.1380	0.0672	0.2085	-0.0678	0.0591	-0.0891	0.1812
Sr	0.0191	-0.1171	-0.3168	-0.0943	0.0390	0.3536	0.2443	0.1242
Th	0.0469	0.3484	0.0881	-0.1246	-0.0037	0.1423	0.0945	-0.0482
Ti	0.0250	0.0616	0.0816	-0.2070	-0.2840	-0.0815	0.0113	0.5327
Tl	0.1795	0.0001	-0.1567	0.0308	0.2313	0.1674	0.1615	-0.1068
U	0.0988	0.3321	0.0089	-0.0026	0.0193	-0.0462	0.0862	-0.1557
V	0.2118	-0.0878	0.1325	0.1012	-0.1573	0.0960	-0.0751	0.1583
Y	0.1656	0.2289	-0.0877	-0.1026	0.0315	-0.2258	0.0296	0.0828
Zn	0.1670	-0.1405	0.1623	-0.1826	0.1083	-0.0508	0.0416	0.0137
Zr	0.0224	0.2443	0.1701	-0.3066	-0.1081	0.3561	-0.1561	-0.0703

**Tabela 2** - Pesos das variáveis em relação às sete primeiras componentes principais para sedimentos ativos de corrente na BRP ( $\log_{10}$ ).

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Ag	0.1613	-0.0961	0.1792	0.0082	-0.0255	0.2020	-0.1680
Al	0.1937	-0.0540	-0.0484	-0.2390	0.0978	-0.0436	0.1708
As	0.1695	0.0110	0.1099	-0.1183	0.2151	0.0677	-0.2145
Ba	0.1429	-0.2055	-0.0813	0.1314	0.1321	0.3068	0.1591
Be	0.2001	0.0376	-0.1667	0.0409	-0.0098	0.0925	-0.1431
Bi	0.1787	0.0131	0.0985	-0.1197	0.0030	0.0495	-0.2508
Ca	0.1247	-0.2104	-0.0911	0.2394	-0.0346	-0.0858	0.2705
Cd	0.1485	-0.1130	0.2128	0.1518	0.0070	0.2289	-0.1681
Ce	0.1166	0.1119	-0.1066	0.0931	-0.4091	0.0211	-0.1075
Co	0.1901	-0.1086	0.1018	0.1858	-0.0966	-0.1135	-0.0354
Cr	0.1597	-0.0500	0.1600	0.0629	-0.0636	-0.4336	-0.0274
Cs	0.1107	-0.1885	-0.2469	-0.1792	0.0203	-0.1666	0.0129
Cu	0.2016	0.0795	0.0769	0.0328	0.0040	-0.1666	-0.1318
Fe	0.2008	0.0440	0.1970	-0.0569	0.0952	0.0099	0.0253
Ga	0.2061	0.0235	-0.0226	-0.2336	0.0261	-0.0165	0.1444
Hf	0.0409	0.3219	0.0075	0.1088	0.3494	0.0629	0.1750
Hg	0.1598	0.0155	0.0274	-0.3211	-0.0248	0.0686	0.1647
In	0.2070	0.1020	0.0740	-0.1085	0.0210	0.0935	0.0700
K	0.0459	-0.0781	-0.3512	0.1165	0.4321	-0.0625	-0.1700
La	0.1222	0.1432	-0.2693	0.1922	-0.2603	0.1126	-0.0605
Li	0.1430	-0.2265	-0.1432	0.0646	0.1331	-0.0371	-0.1030
Mg	0.1724	-0.1460	-0.0798	0.2179	0.0502	-0.2121	-0.0438
Mn	0.1445	-0.1204	0.1782	0.2367	-0.0338	0.1669	0.1559
Mo	0.1623	0.1522	-0.0049	-0.1663	0.1347	-0.0226	-0.0844
Nb	0.0588	0.3040	-0.0937	0.1775	-0.0233	-0.0065	-0.0464
Ni	0.1768	-0.0964	0.0996	0.1562	0.0023	-0.3782	-0.0888
P	0.1890	-0.0926	0.0663	0.0176	-0.1770	0.1239	0.0458
Pb	0.1763	0.0461	-0.0361	0.0039	-0.1133	0.2500	0.1725
Rb	0.1216	-0.0469	-0.4004	-0.0226	0.1394	-0.0950	-0.1604
Sc	0.2163	0.0214	0.0968	-0.0869	-0.0090	-0.0807	0.0636
Se	0.1512	0.0256	-0.0648	-0.2144	-0.1788	-0.1617	0.2356
Sn	0.1791	0.1534	-0.0085	-0.1007	0.1038	-0.0516	0.1718
Sr	0.0091	-0.2820	-0.2043	0.1108	0.0066	0.0799	0.4513
Th	0.0804	0.3076	-0.1953	0.0129	-0.2008	0.0275	0.0887
Ti	0.0499	0.2264	0.1117	0.3746	0.0771	-0.1844	0.2263
Tl	0.1702	-0.1400	-0.1430	-0.1410	0.0410	0.1604	-0.0421
U	0.1424	0.2387	-0.1998	-0.0530	-0.1145	-0.0205	-0.0906
V	0.2055	0.0026	0.1759	-0.0542	-0.0491	-0.1465	0.0890
Y	0.1748	0.1237	-0.1724	0.1821	-0.1143	0.1293	-0.1182
Zn	0.1776	-0.0452	0.1644	0.1448	0.1183	0.2224	-0.1206
Zr	0.0413	0.3255	0.0517	0.1074	0.3451	0.0405	0.1698

**Tabela 3** - Pesos das variáveis em relação às oito primeiras componentes principais para sedimentos ativos de corrente na BRP (*clr*).

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Ag	0.1834	-0.0113	0.0928	-0.1058	0.2111	-0.0218	0.2636	-0.0521
Al	0.1249	0.0336	-0.3412	-0.1274	-0.0796	0.0047	-0.2332	0.0101
As	0.1221	0.1452	-0.0399	-0.0827	0.0603	-0.3459	0.1151	-0.1674
Ba	0.1018	-0.2528	-0.0062	-0.0731	0.2074	-0.0473	-0.1914	0.0135
Be	-0.0309	0.0198	-0.1692	0.3542	0.2067	-0.2118	-0.1039	0.0314
Bi	0.1136	0.1300	-0.0481	-0.0230	0.1157	-0.1312	0.4065	0.1990
Ca	0.0823	-0.2587	0.0598	0.0390	-0.0978	0.1292	-0.1587	-0.2430
Cd	0.1977	-0.0296	0.2006	-0.0389	0.2319	-0.0649	0.0860	-0.0610
Ce	-0.1027	0.0236	0.0093	0.2208	0.0941	0.2711	0.2429	-0.1239
Co	0.2371	0.0006	0.1346	0.2530	-0.0401	0.0725	-0.0368	0.1339
Cr	0.1693	0.0579	0.1117	0.0808	-0.3691	0.1301	0.2288	0.2448
Cs	0.0446	-0.2055	-0.2697	-0.0225	-0.1323	0.0181	0.0797	0.1058
Cu	0.1010	0.2348	0.0252	0.2448	-0.1053	-0.1170	-0.0200	-0.1520
Fe	0.1741	0.2526	0.0578	-0.0812	0.0207	-0.0908	-0.1000	-0.1262
Ga	0.0941	0.1688	-0.3330	-0.0597	-0.0133	0.0553	-0.2001	0.0284
Hf	-0.2493	0.0732	0.1442	-0.1849	-0.0478	-0.1277	-0.1243	0.1529
Hg	0.0629	0.1127	-0.2378	-0.1920	0.0575	0.1644	0.1202	0.0080
In	0.0737	0.2817	-0.1005	0.0321	0.1630	-0.0164	-0.2040	0.0801
K	-0.1185	-0.2515	-0.0643	-0.0304	-0.1166	-0.3024	0.0013	-0.0524
La	-0.2070	-0.0461	-0.0187	0.3084	0.1644	0.1137	-0.0461	-0.1247
Li	0.1338	-0.2398	-0.1139	0.0829	-0.0309	-0.1733	-0.1013	0.1082
Mg	0.1528	-0.1494	0.0333	0.2886	-0.1849	-0.1018	-0.1389	0.0326
Mn	0.1762	-0.0661	0.2269	-0.0131	0.1524	0.1151	-0.1091	0.1091
Mo	-0.0839	0.1871	-0.1107	-0.0936	-0.0493	-0.2080	0.1510	-0.1902
Nb	-0.2682	0.0484	0.1278	0.0152	-0.0016	0.0073	0.0133	-0.0166
Ni	0.2091	0.0082	0.1202	0.2177	-0.3317	-0.0187	0.0924	0.1097
P	0.1864	-0.0274	0.0030	0.0334	0.2106	0.2266	-0.0706	-0.4097
Pb	-0.0539	-0.0299	-0.0337	-0.0721	0.3048	0.2763	-0.0562	0.4617
Rb	-0.1028	-0.1898	-0.2549	0.1660	-0.0834	-0.2043	0.0306	0.0501
Sc	0.1885	0.2349	-0.1005	0.0878	-0.0400	0.0536	-0.2080	0.1336
Se	-0.0056	0.0420	-0.2130	-0.0462	-0.1363	0.3375	0.0805	-0.1872
Sn	-0.0879	0.2048	-0.1067	-0.0700	-0.0869	-0.0403	-0.2935	-0.0833
Sr	0.0090	-0.3079	-0.0361	-0.1276	-0.0262	0.1527	-0.1121	-0.0861
Th	-0.2763	0.1059	-0.0432	0.1156	0.0460	0.1729	0.0303	0.0449
Ti	-0.1524	0.0386	0.3069	-0.0146	-0.1519	0.0832	-0.2544	0.1250
Tl	0.0962	-0.1559	-0.2599	-0.0338	0.1628	-0.0360	0.0609	0.3101
U	-0.2192	0.1448	-0.1360	0.2065	0.0310	0.0136	0.1539	0.0843
V	0.2195	0.2225	0.0045	0.0492	-0.1040	0.1326	-0.1185	0.0876
Y	-0.1279	0.0451	-0.0015	0.4030	0.2329	-0.0592	-0.1103	0.0211
Zn	0.1662	0.0219	0.1914	-0.0269	0.2631	-0.2080	-0.0814	0.0483
Zr	-0.2343	0.0961	0.1637	-0.1972	-0.0623	-0.1201	-0.1346	0.1341