



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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO N° 667**

**MAPEAMENTO GEOQUÍMICO POR SEDIMENTOS DE  
CORRENTE DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIM-  
PA: DEFINIÇÃO DE VALORES DE *BASELINE*  
GEOQUÍMICO E APLICAÇÃO DE ÍNDICES AMBIENTAIS**

Dissertação apresentada por:

**JULIO RICHARD FURTADO SERRA**

**Orientador: Prof. Dr. Vinicius Tavares Kütter (UFPA)**

**Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Duarte (SGB)**

---

**BELÉM-PARÁ  
2025**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**

**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

S487m Serra, Julio Richard Furtado.

Mapeamento geoquímico por sedimentos de corrente da bacia hidrográfica do Rio Capim-Pa: definição de valores de baseline geoquímico e aplicação de índices ambientais / Julio Richard Furtado Serra. — 2025.

xii, 98 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Vinicius Tavares Kütter  
Coorientador(a): Prof. Dr. Eduardo Duarte Marques

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2025.

1. Geoquímica de sedimentos. 2. Qualidade ambiental. 3. Elementos potencialmente tóxicos. 4. Análise estatística. 5. Pará. I. Título.

CDD 551.9

---



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

**MAPEAMENTO GEOQUÍMICO POR SEDIMENTOS DE  
CORRENTE DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIM,  
MA-PA: DEFINIÇÃO DE VALORES DE *BASELINE*  
GEOQUÍMICO E APLICAÇÃO DE ÍNDICES AMBIENTAIS**

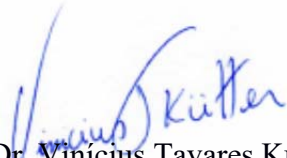
**Dissertação apresentada por:**

**JULIO RICHARD FURTADO SERRA**

**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Mestre em Ciências na Área de  
GEOLOGIA e Linha de Pesquisa Geologia Marinha e Costeira**

**Data de Aprovação: 16 / 01 / 2025**

**Banca Examinadora:**

  
Prof. Dr. Vinicius Tavares Kütter  
(Orientador-UFPA)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** GABRIEL NEGREIROS SALOMAO  
Data: 16/01/2025 20:01:06-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>  
Prof. Dr. Gabriel Negreiros Salomão  
(Membro – ITV)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** PABLO HENRIQUE COSTA DOS SANTOS  
Data: 19/05/2025 09:35:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>  
Prof. Dr. Pablio Henrique Costa dos Santos  
(Membro – UFPA)

*Dedico esse trabalho à minha família,  
em especial aos meus pais, meus avós,  
meu irmão e meus padrinhos  
Obrigado!*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha família, em nome dos meus pais, Emilene e Ricardo Serra por serem meus alicerces, meu porto seguro e a minha base durante esse período. O apoio de vocês foi essencial para isso. Devo tudo a vocês!

Ao meu irmão Jhonathan, por sempre estar ouvindo as minhas ideias e nos encorajando a sempre seguir em frente e nunca desistir de nossos sonhos.

Agradecer a minha mãe-avó Maria das Graças por ter colaborado com minha criação e educação, e acima de tudo ser uma pessoa que me deu diversos ensinamentos para a vida. Agradeço aos meus avós Berenice (*in memorian*) e Edivaldo Serra (*in memorian*) que apesar de não estarem mais nesses planos, sempre torceram pelas minhas vitórias.

Gostaria de agradecer também às minhas tias, Elaine e Erika que sempre estiveram ao meu lado e sempre se preocuparam como se eu fosse um filho, ajudaram imensamente na minha criação. Agradeço imensamente aos meus padrinhos Valdelice e Benedito por representarem meus pais e sempre estarem presentes na minha vida. Principalmente nos momentos em que mais precisei.

À Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG), orgulho em fazer parte da primeira turma de mestrado CAPES 7 do Instituto de Geociências. Grato por toda infraestrutura e por ser a minha casa acadêmica desde a graduação. À coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado. Código de financiamento 001.

Ao Serviço Geológico do Brasil (SGB) e pesquisadores envolvidos na elaboração, coleta e construção do banco de dados geoquímicos do portal GEOSGB, de onde tive a oportunidade obter os dados da pesquisa e realizar o tratamento das amostras.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Vinicius Tavares Kütter e Prof. Dr. Eduardo Duarte Marques pelo apoio, orientação e dedicação ao longo desta pesquisa. Agradeço pela paciência, pelas discussões construtivas e pela constante disposição em compartilhar seus conhecimentos. Além de orientadores, terem sido amigos e dado todo o suporte necessário.

À prof. Dra. Aline Meiguins por toda sua paciência e disponibilidade para ajudar na construção cartográfica.

Ao Prof. Dr. Gabriel Salomão pelas críticas valiosas para a construção do meu trabalho bem como o ensinamento passado pelos seus artigos. Bem como ao Dr. Alessandro Sabá Leite pelas discussões e disponibilidade para conversas e dicas para a melhoria do trabalho.

Ao Prof. Dr. Pablio Henrique dos Santos pela interessantes sugestões e reflexões na interpretação dos resultados, obrigado.

Aos meus amigos do PPGG: Adriane Marques, Brenda Cristancho, Julián Perez, Maria Eduarda, Wivian Carvalho e Brenda Barros, se o mestrado foi mais leve devo a vocês. Mas, em especial ao meu amigo Andrés Fernando que sempre me auxiliou e compartilhou diversos momentos de teorias, desesperos e conquistas acadêmicas. Foi muito conhecer um pouco mais da Colômbia com você. *Muchas gracias, amigo!*

Ao Paulo Reis que foi uma das grandes surpresas da minha vida, obrigado por todos os momentos e por ser uma pessoa essencial em minha vida. Obrigado por tudo!

Não posso deixar de agradecer ao Alan Queiroz, Sou muito grato por todos os momentos, conversas e por todo apoio que sempre me deu no âmbito pessoal, emocional e acadêmico, principalmente por “segurar a barra” dos nossos projetos pessoais. Obrigado!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

Os mapeamentos geoquímicos desempenham um papel fundamental tanto na prospecção mineral quanto nos estudos ambientais. Inicialmente utilizados para identificar anomalias geoquímicas associadas a depósitos minerais, essas pesquisas ganharam relevância no campo da geoquímica ambiental, permitindo monitorar a qualidade de solos, água e sedimentos. O Serviço Geológico do Brasil (SGB), conduz projetos de levantamentos geoquímicos em todo território nacional, um desses projetos realizados entre 2009 e 2012, denominado de “Geoquímica Multiuso” cobriu a área da Bacia Hidrográfica do Rio Capim (BHRC) e gerou um banco de dados de geoquímica de sedimentos de corrente da região. O objetivo desta pesquisa foi utilizar esses dados disponíveis para a elaboração de mapas geoquímicos multielementares e a definição de valores de *baseline* geoquímico em especial para os elementos potencialmente tóxicos. O levantamento incluiu a coleta de 276 amostras de sedimentos de corrente com uma densidade de amostragem de cerca de uma amostra a cada 150 km<sup>2</sup>. As amostras foram processadas em laboratório para análise por ICP-OES e ICP-MS com geração de hidretos para Hg. No total, foram analisados 52 elementos (Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pd, Pb, Pt, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn e Zr). Para o tratamento estatístico, foram calculados o sumário estatístico juntamente com gráficos *box-plots*, histogramas, curvas de probabilidade normal com os dados log-transformados para a estatística univariada; correlação de *Spearman* na estatística bivariada e a análise fatorial (AF) para definição das associações multielementares na estatística multivariada. Foram aplicados três métodos de cálculo do *baseline* geoquímico (BG), incluindo a Mediana  $\pm$  2\*Desvio Absoluto Mediano (mMAD), *Tukey's Inner Fence* (TIF) e Percentis (98, 95, 90, 75). Os resultados revelaram importantes tendências de distribuição geoquímica, com destaque para os elementos potencialmente tóxicos. No total 28 elementos (Ag, Al, Ba, Bi, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hf, Hg, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, Y, Zn e Zr) passaram por testes estatísticos mais complexos, no qual 24 elementos não foram testados pois apresentaram  $\geq 30\%$  dos dados abaixo do limite de detecção. As análises de correlação mostraram que existem 7 correlações com valores de significância maiores que 0,65 e 6 correlações aceitáveis com valores acima de 0,575 e menor que 0,65. Se observou que os níveis de Cr excedem os valores estipulados pela resolução nos três métodos analisados Os valores para TIF (73,11 mg kg<sup>-1</sup>), mMAD (46,76 mg kg<sup>-1</sup>) e Percentil 98th (43,00 mg kg<sup>-1</sup>). Na análise por unidade litológica, as anomalias de Cr foram mais expressivas para as rochas siliciclásticas da Formação Barreiras

com os valores de TIF (182,94 mg kg<sup>-1</sup>), mMAD (90,88 mg kg<sup>-1</sup>) e Percentis 98th (66,28 mg kg<sup>-1</sup>), 95th (62,20 mg kg<sup>-1</sup>), 90th (52,60 mg kg<sup>-1</sup>) e 75th (40,52 mg kg<sup>-1</sup>) e nas Coberturas Lateríticas com TIF (81,76 mg kg<sup>-1</sup>) e mMAD (46,49 mg kg<sup>-1</sup>). O método mMAD foi considerado o mais conservador e robusto, sem superestimar os valores dos limites superiores. A análise fatorial permitiu obter 7 fatores e junto com a espacialização do *mapa de scores* foi possível identificar as associações geoquímica que em suma representam a influência geológica nesses sedimentos, tendo a influência dos terrenos lateríticos, oxi-hidróxidos de Fe e de rochas clásticas aluminossilicáticas como os principais responsáveis pela distribuição dos elementos. Foram calculados índices geoquímicos e ambientais, como o Fator de Enriquecimento, Fator de Contaminação, Grau de Contaminação Modificado e Índice de Risco ecológico Potencial. Esses índices indicaram que em várias microbacias, há indícios de fontes geológicas, porém indicam principalmente nas áreas norte, oeste e sudoeste da BHRC como as áreas consideradas mais contaminadas. Essas abordagens permitiram a identificação de áreas contaminadas, especialmente relacionadas ao Cr, Cu, Hg, Ni e Pb, cujas concentrações excederam os limites estabelecidos pela resolução CONAMA 454/2012 em vários pontos da bacia, porém é válido ressaltar que a normativa usa os valores de referência para sedimento total, sendo o resultado do presente trabalho superestimado em relação a esta normativa. Porém, o uso de índices ambientais deve ser utilizado com cuidado, pois há limitações que ao serem analisados de modo isolado podem trazer informações não tão condizentes com a realidade local, superestimando ou subestimando dados. É importante destacar que apesar de apresentar maiores concentrações destes elementos, os valores encontrados ainda são inferiores a províncias geoquímicas com mineralizações. Isso indica uma forte influência de processos geoquímicos superficiais na adsorção de Cr, Cu, Ni e outros metais potencialmente tóxicos em óxidos-hidróxidos de ferro. Ademais, o trabalho ratifica o uso do método mMAD como o mais robusto e indicado para definição de *baseline*. E o uso de mapas de distribuição geoquímica dos como uma ferramenta essencial de auxílio a gestão territorial.

**Palavras-chave:** geoquímica de baixa densidade; qualidade ambiental; elementos potencialmente tóxicos; análise estatística; Pará.

## ABSTRACT

Geochemical mapping plays a key role in both mineral prospecting and environmental studies. Initially used to identify geochemical anomalies associated with mineral deposits, these studies have gained relevance in the field of environmental geochemistry, enabling the monitoring of soil, water, and sediment quality. The Geological Survey of Brazil (SGB) conducts geochemical survey projects across the national territory. One such project, carried out between 2009 and 2012, called "Multi-use Geochemistry," covered the Capim River Watershed (CRW) area and generated a geochemical sediment dataset for the region. The objective of this research was to use this available data to create multielemental geochemical maps and define baseline geochemical values, particularly for potentially toxic elements. The survey included the collection of 276 stream sediment samples with a sampling density of approximately one sample every 150 km<sup>2</sup>. The samples were processed in the laboratory for analysis by ICP-OES and ICP-MS with hydride generation for Hg. In total, 52 elements were analyzed (Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pd, Pb, Pt, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn, and Zr). For statistical treatment, statistical summaries were calculated along with box plots, histograms, and normal probability curves using log-transformed data for univariate statistics; Spearman correlation for bivariate statistics; and factor analysis (FA) to define multielemental associations in multivariate statistics. Three methods were applied to calculate the geochemical baseline (BG), including the Median  $\pm$  2\*Median Absolute Deviation (mMAD), Tukey's Inner Fence (TIF), and Percentiles (98, 95, 90, 75). The results revealed important geochemical distribution trends, with a particular focus on potentially toxic elements. In total, 28 elements (Ag, Al, Ba, Bi, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hf, Hg, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, Y, Zn, and Zr) underwent more complex statistical tests, while 24 elements were not tested due to  $\geq$ 30% of the data being below the detection limit. Correlation analyses showed that there were 7 correlations with significance values greater than 0.65 and 6 acceptable correlations with values between 0.575 and 0.65. It was observed that Cr levels exceeded the values stipulated by the resolution in all three methods analyzed: TIF (73.11 mg.kg<sup>-1</sup>), mMAD (46.76 mg.kg<sup>-1</sup>), and 98th Percentile (43.00 mg.kg<sup>-1</sup>). In the lithological unit analysis, Cr anomalies were most pronounced for the siliciclastic rocks of the Barreiras Formation, with TIF (182.94 mg.kg<sup>-1</sup>), mMAD (90.88 mg.kg<sup>-1</sup>), and Percentiles 98th (66.28 mg.kg<sup>-1</sup>), 95th (62.20 mg.kg<sup>-1</sup>), 90th (52.60 mg.kg<sup>-1</sup>), and 75th (40.52 mg.kg<sup>-1</sup>), as well as in Lateritic Covers with TIF (81.76

mg.kg<sup>-1</sup>) and mMAD (46.49 mg.kg<sup>-1</sup>). The mMAD method was considered the most conservative and robust, without overestimating the upper limit values. Factor analysis allowed the identification of 7 factors, and along with the spatial mapping of the scores, it was possible to identify the geochemical associations, which primarily reflect the geological influence in these sediments, with lateritic terrains, iron oxyhydroxides, and aluminossilicatic clastic rocks being the main factors responsible for the distribution of the elements. Geochemical and environmental indices were calculated, such as the Enrichment Factor, Contamination Factor, Modified Contamination Degree, and Potential Ecological Risk Index. These indices indicated that, in several microbasins, there are signs of geological sources, but they mainly point to the northern, western, and southwestern areas of the CRW as the most contaminated. These approaches enabled the identification of contaminated areas, especially related to Cr, Cu, Hg, Ni, and Pb, whose concentrations exceeded the limits established by CONAMA Resolution 454/2012 at several points in the basin. However, it is worth noting that the normative uses reference values for total sediment, and the results of the present work are overestimated compared to this standard. Nevertheless, the use of environmental indices must be done with caution, as there are limitations that, when analyzed in isolation, may provide information not entirely aligned with local reality, either overestimating or underestimating data. It is important to highlight that, despite presenting higher concentrations of these elements, the values found are still lower than those found in geochemical provinces with mineralizations. This indicates a strong influence of superficial geochemical processes in the adsorption of Cr, Cu, Ni, and other potentially toxic metals in iron oxyhydroxides. Furthermore, the study reaffirms the use of the mMAD method as the most robust and suitable for defining baselines and the use of geochemical distribution maps as an essential tool for territorial management.

**Keywords:** low density geochemical; environmental quality; potentially toxic elements; statistical analysis; Pará.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Mapa de localização das áreas trabalhadas pelo Serviço Geológico do Brasil no projeto Levantamento Geoquímico de Baixa Densidade entre os anos de 2003 e 2023. Fonte: SGB (2023).	8
Figura 2- The Evolution of Land Use and Cover in the CRW from 1985 to 2020.	29
Figura 3- (A) Capim River Watershed localization. (B)Microbasins map (C) Sampling map and rivers and (D) Geological Map.	34
Figura 4- Histogram, Cumulative Probability Curve, and QQPlot of Cr and Pb (log-transformed).	38
Figura 5- Spearman correlation matrix of the selected chemical elements (raw data and clr-transformed) for the Capim River Watershed.	40
Figure 6- Catchment microbasins map with the values of Factors 1 to Factor 7 from the Factor Analysis.	42
Figura 7- Comparison by box plot between the lower and upper limits for the TIF and mMAD methods.	44
Figura 8- The chemical distribution of elements along the CRW, with a focus on the lower and upper limits of mMAD values, shows noticeable differences in the spatial distribution of each element. This variation highlights how each element behaves differently in relation to its location and concentration, providing insights into the geological and environmental factors that influence the distribution across the region	45
Figura 9- Chemical distribution of elements with a focus on Hg, Mo, Nb, Ni, Pb, and Sn. These elements show similarities in their distribution.	48
Figura 10- The elements V, Ti, U, Th, and Zr follow the same trend as the other elements seen previously.	49
Figura 11- Box plots of 10 potentially toxic elements, showing the baseline variation by geology.	51
Figura 12- Enrichment Factor for Al as the normalizer for Cr, Hg, Pb, Zn, Cu, and Ni.	53
Figura 13- Contamination Factor for Cr, Hg, Pb, Zn, Cu, and Ni and the multielemental indices GCm and IREP.	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação dos projetos de levantamento geoquímico com base na escala de mapeamento em continental, regional e local, destacando as dimensões ideais do grid e densidade nominal de amostragem, além dos principais padrões geoquímicos passíveis de serem detectados. As barras verticais hachuradas mostram sobreposição (cinza) entre as categorias de levantamentos geoquímicos. ....	7
Tabela 2- 8 fatores principais que influenciam nos resultados do background geoquímico. ...	12
Table 3-Summary of formulas for environmental índices and classification. ....	36
Table 4- Statistical summary of the 52 elements. LD = Detection Limits; <LD% = percentage of samples below the LD; Q1 = 25% Quartile; Q3 = 75% Quartile; SD = Standard Deviation; SW = Shapiro-Wilk value (Shapiro-Wilk test); SW log10 = Shapiro-Wilk log-transformed; SW clr = Shapiro-Wilk clr-transformed. UCC – Upper Continental Crust (Rudnick & Gao 2003).....	39
Table 5- Baseline values for the entire Capim River Watershed - CRW. ....	46
Tabela 6- The presents the baseline values calculated for all methods (TIF, mMAD, and the 98th, 95th, 90th, and 75th percentiles). The results obtained for potentially toxic elements using the mMAD method were compared with other studies on stream sediments that also applied the mMAD method to determine geochemical baseline values.).....	52

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>RESUMO</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 JUSTIFICATIVA E PROBLEMÁTICA</b> .....	3
<b>3 OBJETIVOS</b> .....	5
3.1 OBJETIVO GERAL .....	5
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	6
4.1 MAPEAMENTO GEOQUÍMICO DE BAIXA DENSIDADE.....	6
4.2 GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS .....	8
4.3 <i>BACKGROUND</i> E <i>BASELINE</i> GEOQUÍMICO.....	10
<b>4.3.1 Conceitos</b> .....	10
<b>4.3.2 Estimativa dos Valores de <i>Background</i> e <i>Baseline</i> Geoquímico</b> .....	13
4.4 ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS.....	14
<b>5 METODOLOGIA</b> .....	16
5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	16
5.2 ORIGEM DO BANCO DE DADOS GEOQUÍMICOS .....	16
5.3 AMOSTRAGEM E ANÁLISES QUÍMICAS.....	16
5.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS GEOQUÍMICOS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS	
17	
5.5 DEFINIÇÃO DO VALORES DE <i>BASELINE</i> GEOQUÍMICO.....	18
5.6 ÍNDICES AMBIENTAIS .....	19
5.7 CONFECÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS E DE DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA.	20
<b>6 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	21

6.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	21
6.2 GEOLOGIA REGIONAL.....	21
<b>7 (ARTIGO) GEOCHEMICAL MAPPING BY CURRENT SEDIMENTS AND DEFINITION OF BASELINE VALUES IN THE CAPIM RIVER BASIN – PA .....</b>	<b>24</b>
7.1 INTRODUCTION .....	25
7.2 GENERAL ASPECTS OF STUDY AREA.....	27
<b>7.2.1 Land use land cover .....</b>	<b>28</b>
<b>7.2.2 Geological settings.....</b>	<b>30</b>
7.3 MATERIAL AND METHODS .....	32
<b>7.3.1 Dataset, sampling, and chemical analysis of stream sediments .....</b>	<b>32</b>
<b>7.3.2 Geochemical data processing and statistical analyses .....</b>	<b>32</b>
<b>7.3.3 Estimation of Geochemical baseline .....</b>	<b>35</b>
<b>7.3.4 Geochemical Mapping, Geographic Information System (GIS), and Spatial     Analysis .....</b>	<b>36</b>
7.4 RESULTS AND DISCUSSIONS .....	37
<b>7.4.1 Basic statistical analyses, correlation, and factor analysis .....</b>	<b>37</b>
<b>7.4.2 Geochemical baseline of the analyzed elements .....</b>	<b>43</b>
<b>7.4.3 Environmental Indices.....</b>	<b>52</b>
7.5 CONCLUSIONS.....	56
<b>9 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>68</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE A – HISTOGRAMAS, CURVAS DE PROBALIDADE E QQPLOT .....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICE B – BOXPLOTS POR UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA E GERAL</b>	<b>96</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Mapeamentos geoquímicos são técnicas prospectivas frequentemente utilizados para localizar anomalias geoquímicas associadas a depósitos minerais, mas, nos últimos anos, têm sido aplicados em estudos de geoquímica ambiental, contribuindo com melhor gerenciamento dos recursos naturais, identificando possíveis áreas de atenção para a conservação ambiental (Rodrigues & Nalini 2009, Caritat & Cooper 2016). Estudos envolvendo metais são de amplo interesse na área de meio ambiente e exploração mineral, e nos casos em que os valores anômalos estão relacionados a fonte não naturais, os aportes antrópicos estão associados aos diferentes usos e ocupação do solo (Caralinda 2022). A utilização do mapeamento geoquímico é essencial para caracterização da qualidade ambiental de água, solo e sedimentos de corrente e garantir o monitoramento mais eficaz dessas matrizes, identificando a origem geológica, biológica e/ou antrópica na distribuição espacial dos elementos (Licht 2020, Reimann 2005, Salomão *et al.* 2021). Esse tipo de mapeamento é fundamental para entender o comportamento e a distribuição desses elementos no ambiente, servindo como referência para futuras comparações e monitoramento. Deste modo, o mapeamento geoquímico aliado aos conceitos de *background* e *baseline* geoquímico são técnicas utilizadas para determinar faixas de concentrações naturais dos elementos químicos em diferentes meios (rocha, solo, água e sedimentos). A demanda por metais estratégicos para a transição energética como modo de combater as mudanças climáticas têm resultado em maior exploração e consumo de metais (Habib *et al.* 2020, Watari *et al.* 2021). Contudo, a maioria dos produtos que contêm esses elementos não é reciclada e acaba sendo descartada no meio ambiente. Neste contexto se destaca a necessidade de estudos de definição de *baseline* geoquímico e *background* geoquímico.

A escolha do tipo de amostra é fundamental para o rastreamento da dispersão química dos elementos, sendo os sedimentos de corrente amplamente utilizados tanto em exploração mineral quanto em estudos ambientais. Os sedimentos são formados por partículas de diferentes tamanhos, formas e composições químicas heterogêneas, resultantes do intemperismo seguido pela erosão das rochas, e armazenam informações sobre a geologia local e aportes antrópicos, devido à sua capacidade de reter determinados elementos (Forstner 2020). Além disso, os sedimentos de corrente têm o potencial de acumular minerais pesados e metais traço de origem mineralizada, facilitando a detecção de anomalias geoquímicas que

podem indicar a presença de depósitos minerais ou influências antropogênicas (Rose *et al.* 1979). Um fator adicional que reforça o uso dos sedimentos de corrente é que eles representam não apenas o ponto amostral específico, mas toda a bacia hidrográfica, captando informações desde os cursos d'água principais até seus tributários (Licht 2020), o que amplia o escopo da análise. A região Norte do Brasil se destaca pela mineração e pela crescente expansão do agronegócio, atividades que podem alterar a composição dos sedimentos de corrente devido às mudanças no uso e na cobertura do solo.

Esses estudos são fundamentais para estabelecer parâmetros de base, que possam servir como referência na avaliação de possíveis alterações ambientais futuras. E como não há conhecimento sobre o comportamento dos metais ao longo dessa bacia e quais fatores influenciam nessa distribuição, é fundamental realizar essa identificação. Conforme o exposto, existe uma grande lacuna de conhecimento no que se refere a geoquímica de metais em sedimentos de corrente no nordeste do Pará, principalmente quando se trata de estudos relacionados a *baseline* geoquímico. Ademais, Fagundes *et al.* (2023) aponta que 51% dos principais rios da América do Sul experimentaram mudanças significativas no transporte simulado de sedimentos (QST) durante 1984 - 2019, com 36% devido ao desmatamento da Amazônia e represamento de rios e 15% devido a mudanças na precipitação. Também estimaram uma redução de 10% na entrega média de sedimentos para os oceanos.

A exemplo, do que ocorre na bacia hidrográfica do rio Capim, no qual é particularmente relevante para a região, pois concentra atividades econômicas essenciais para o desenvolvimento do estado do Pará, com destaque para a agropecuária e a mineração. Essa região abriga o maior polo produtor de bauxita e caulim do Brasil, conhecido como Distrito Bauxitífero-Caulinitico de Paragominas-Capim, além de se configurar como um importante rota econômica, conectada ao eixo da rodovia Belém-Brasília e à hidrovía Guamá-Capim. A existência simultânea de grandes aglomerados urbanos e intensas atividades exploratórias de recursos naturais exerce forte pressão sobre o uso e a cobertura da terra, e ressalta a necessidade de estudos aprofundados para compreender a dinâmica da distribuição geoquímica dos elementos nessa bacia. Sendo, assim mediante o exposto faz-se necessário o desenvolvimento do conhecimento atual na Bacia Hidrográfica do Rio Capim, para o gerenciamento e planejamento da região, visando a sustentabilidade desta localidade. Reconhecendo a importância dessa área, o foco desse trabalho o tratamento do banco de dados geoquímicos de sedimentos de corrente, com ênfase nos elementos potencialmente tóxicos (EPTs) da Bacia Hidrográfica do Rio Capim.

## 2 JUSTIFICATIVA E PROBLEMÁTICA

Os processos geológicos são os principais responsáveis pela distribuição espacial de rochas e minerais ao longo de um território, conseqüentemente cada região possui características geológicas, geoquímicas, geomorfológicas, pedológicas, climáticas e hidrográficas (Licht 2001) que conferem singularidades geoquímicas a estes locais. Porém as atividades de origem antrópica podem alterar em menor ou maior escala a ciclagem biogeoquímica de elementos nestes ambientes, podendo causar um desequilíbrio no ecossistema com potencial impacto a saúde humana. A remobilização de metais pode ocorrer através de intemperismo e erosão do solo, porém, atividades como desmatamento, queimadas, colaboram para o processo de mobilização de metais do solo (Pereira 2022).

A ação humana na alteração da paisagem associada as mudanças climáticas globais resultaram na alteração significativas no transporte simulado de sedimentos (QST) durante 1984 - 2019, em 51% dos principais rios da América do Sul (Fagundes *et al.* 2023). Sendo 36% desta alteração, devido ao desmatamento da Amazônia e represamento de rios e 15% devido a mudanças na precipitação. Como resultado se tem um efeito cascata com impacto no ecossistema aquático terrestre e também marinho com estiva de redução de 10% na entrega média de sedimentos para os oceanos.

Somado a isto, nas últimas décadas (1979-2018) têm sido registrada uma amplificação do ciclo sazonal, levando a sazonalidades aumentadas tanto na vazão do rio Amazonas quanto na salinidade oceânica. Esta intensificação do ciclo hidroclimatológico pode se desenvolver no sistema acoplado atmosfera-terra-oceano da Amazônia, favorecendo condições terrestres e marinhas mais extremas (Liang *et al.* 2020).

Conseqüentemente, o ciclo biogeoquímico de metais é alterado podendo trazer impactos negativos a biota aquática, em especial a ictiofauna, a qual a Amazônia é um grande hot spot de biodiversidade. Embora muitos metais e metaloides sejam nutrientes essenciais, em determinadas espécies químicas e concentrações, eles podem ser tóxicos para a vida (Trevizani *et al.* 2023). O aumento de metais nos ambientes aquáticos pode ameaçar várias espécies e levar à perda de biodiversidade, além de repercutir na saúde humana. A demanda por energia renovável para combater as mudanças climáticas têm resultado em maior exploração e consumo de metais e conseqüente maior liberação destes no meio ambiente (Habib *et al.* 2020, Watari *et al.* 2021). Pesquisas relacionadas ao mapeamento geoquímico na escala regional são muito escassos e na Amazônia são ainda mais raros.

Os mapeamentos realizados na região amazônica mais conhecidos foram realizados pelo Serviço Geológico do Brasil nos projetos Geoquímica Multiuso entre 2003 e 2011, e a partir de 2012 passou a ser chamado de Projeto Levantamento Geoquímico de Baixa Densidade (Viglio & Cunha 2018). Estes mapeamentos ocorreram em continuação as atividades desenvolvidas pelo Programa Nacional de Pesquisa em Geoquímica Ambiental e Geologia Médica (PGAGEM) nas bacias hidrográficas do Rio Moju, Acará, Capim, Guamá e Tocantins. Com o aumento de áreas pesquisadas no projeto mapeamento geoquímico de baixa densidade em todo o território nacional, foi possibilitado a elaboração de diversas pesquisas e estudos nesta temática. Outros exemplos são os estudos desenvolvidos pelo Instituto Tecnológico Vale – Desenvolvimento sustentável (ITV-DS) na Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas e as pesquisas desenvolvidas pelas empresas de mineração.

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) estabelece que os órgãos ambientais estaduais devem elaborar valores orientadores para substâncias químicas presentes no solo e nas águas subterrâneas, com base nas características específicas de suas regiões. Essa definição ocorre na resolução Conama nº 420/2009, que trata da gestão de áreas contaminadas e que divide os valores orientadores em três categorias: VRQ (Valor de Referência de Qualidade), que reflete concentrações naturais sem interferência humana; VP (Valor de Prevenção), que aponta o limite máximo antes de impactos ao ambiente ou saúde; e VI (Valor de Investigação), que indica a necessidade de estudos para avaliar riscos e remediação. Somente 5 estados (SP, MG, SC, PR E SC) possuem alguma resolução ou portaria sobre VRQ para solos. Já para sedimentos de corrente, não há resoluções federais que possuem valores de referências específicos, o que mais se aproxima seria a resolução Conama 454/2012 que “estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional”.

A região amazônica, em particular a bacia hidrográfica do rio Capim, carece de estudos detalhados sobre a determinação de *background* e *baseline* geoquímico. A ausência de pesquisas nesse campo resulta em uma lacuna importante no entendimento do comportamento e da distribuição de elementos químicos em sedimentos de corrente, essenciais para o monitoramento e gestão ambiental. Portanto, o presente trabalho torna-se essencial ao preencher essa lacuna, fornecendo dados fundamentais sobre os valores de *background/baseline* geoquímico. Além disso, os resultados encontrados podem subsidiar políticas públicas de gestão territorial, promovendo um uso mais sustentável e informado dos recursos naturais de uma bacia hidrográfica localizada na Amazônia Oriental.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a distribuição e comportamento dos elementos em sedimentos de corrente para a Bacia Hidrográfica do Rio Capim, com ênfase nos Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), baseado em análises estatísticas, uni, bi e multivariadas e definir os valores de *baseline* geoquímico através de métodos estatísticos robustos.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar o intervalo de *baseline* geoquímico dos elementos em sedimentos de corrente, em especial dos EPT's utilizando os métodos mMAD, TIF e Percentis;
- Elaboração de cartografia geoquímica para o reconhecimento da distribuição uni e multielementar dos elementos na BHRC;
- Avaliar a qualidade ambiental dos sedimentos de corrente da BHRC por índices geoquímicos e ambientais;
- Avaliar as anomalias geoquímicas presentes na BHRC e discutir as possíveis fontes para estas anomalias, seja geológica ou antrópica.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 MAPEAMENTO GEOQUÍMICO DE BAIXA DENSIDADE

A prospecção geoquímica ou exploração geoquímica consiste na identificação de anomalias geoquímicas na superfície da crosta terrestre em comparação com as rochas encaixantes ao seu redor (Licht 1998, Licht 2020). Existem diferentes métodos de prospecção geoquímica que consistem em medições de parâmetros químicos, normalmente em concentrações traço, em diferentes materiais naturais da crosta terrestre, tais como: rochas, solos, gossans, sedimentos de corrente, de fundo, fluviais e lacustres, águas subterrâneas e superficiais, além de vapores, gases e vegetação, fornecendo uma visão melhor das condições geoquímicas do ambiente (Carreño 2022). O mapeamento geoquímico tem como objetivo entender a concentração e distribuição dos elementos químicos, além dos princípios que norteiam a sua migração. Os levantamentos geoquímicos utilizados desde o século passado para localizar depósitos minerais, exigem procedimentos de amostragem, controle de qualidade e ações corretivas de desvios das análises, de acordo com metodologias já consolidadas na exploração mineral (Hawkes & Webb 1962, SGB 2020).

Desde 1988, pesquisas realizadas pelo projeto Mapeamento Geoquímico Internacional da UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*) e a IUGS (*International Union of Geological Sciences*) indicaram que os dados geoquímicos da superfície terrestre não eram suficientes além de mostrarem fragilidades. A UNESCO e a IUGS com o intuito de padronizar os padrões metodológico de coletas e procedimentos, criaram o projeto internacional de levantamento geoquímico global denominado de *International Geological Correlation Programme - IGCP* (Darnley *et al.* 1995, Darnley *et al.* 1996, Darnley 1997, Darnley & Garrett 1990, Salomão 2020), no qual, posteriormente em 1995, o IGCP editou seu primeiro relatório de mapeamento geoquímico de nível global, intitulado IGCP 259.

O IGCP 259 destaca que o mapeamento geoquímico oferece uma visão de longo prazo sobre geologia ambiental, geomedicina e geologia econômica para a comunidade científica global. O projeto afirmou que as estratégias ideais envolviam a coleta de diversos materiais terrestres já citados anteriormente, traria informações completas e mais detalhadas da área estudada, mas o custo envolvido nesses projetos permite o estudo de um ou no máximo dois materiais. O relatório ainda trata o sedimento de corrente como um dos materiais mais utilizados. A partir desse relatório que serviu como base para posteriores trabalhos em diversos países, o mapeamento geoquímico tornou-se ainda mais uma ferramenta para melhor compreensão. O mapeamento geoquímico em larga escala no Brasil começou na década de

1960, tornando-se mais efetivo nos anos 1970 e 1980 com o I Plano Mestre Decenal para Avaliação de Recursos Minerais do Brasil (1965-1974) e posteriormente o II Plano Decenal de Mineração – II PDM (1981 – 1990). Esses planos buscaram integrar os levantamentos geológicos na escala 1:250.000 em todas as regiões do país. Para tal, é necessário levar em consideração alguns princípios básicos para os mapeamentos geoquímicos, Salomão (2020) em sua tese lista os seguintes itens: (1) A escala do mapeamento e densidade de amostragem; (2) A escolha do meio amostral; (3) Os critérios de amostragem; (4) A escolha da fração a ser analisada; (5) A escolha do método analítico e (6) Controle de qualidade no mapeamento geoquímico. Similarmente, Licht (2020) cita 8 fatores que influenciam em estudos de mapeamento geoquímico, com mais detalhes na tabela 2.

Em relação a escala do mapeamento, Ferreira *et al.* (2001) utilizou como mapeamento de baixa densidade 1 amostra /135 km<sup>2</sup> enquanto Lapworth *et al.* (2012) utilizou a metodologia proposta pela IGCP. Apesar do IGCP, diferentes propostas foram utilizadas como escala de mapeamento, na tabela 1, é possível verificar como ocorre em geral a classificação dos projetos de levantamento geoquímico.

Tabela 1- Classificação dos projetos de levantamento geoquímico com base na escala de mapeamento em continental, regional e local, destacando as dimensões ideais do grid e densidade nominal de amostragem, além dos principais padrões geoquímicos passíveis de serem detectados. As barras verticais hachuradas mostram sobreposição (cinza) entre as categorias de levantamentos geoquímicos.

Classificação do mapeamento	Escala do mapeamento	Grid de amostragem	Densidade nominal de amostragem	Padrões geoquímicos <sup>a</sup>
Continental (ou global)	1:10.000.000	100 x 100 km	1 amostra / 10.000 km <sup>2</sup>	Padrão global
		80 x 80 km*	1 amostra / 6.400 km <sup>2</sup>	
		≈72 x 72 km	1 amostra / 5.200 km <sup>2</sup>	
	1:5.000.000	50 x 50 km	1 amostra / 2.500 km <sup>2</sup>	Megaprovíncia
40 x 40 km		1 amostra / 1.600 km <sup>2</sup>		
Regional	1:1.000.000	10 x 10 km	1 amostra / 100 km <sup>2</sup>	Província geoquímica
	1:250.000	5 x 5 km	1 amostra / 25 km <sup>2</sup>	
	1:100.000	1 x 1 km	1 amostra / 1 km <sup>2</sup>	
	1:50.000	500 x 500 m	1 amostra / 250.000 m <sup>2</sup>	Anomalias Regionais
	1:25.000 ▲	250 x 250 m	1 amostra / 62.500 m <sup>2</sup>	
	1:10.000 ▲	100 x 100 m	1 amostra / 10.000 m <sup>2</sup>	
Local (ou detalhe)	1:5.000	50 x 50 m	1 amostra / 2.500 m <sup>2</sup>	Anomalias locais
	1:2.500	25 x 25 m	1 amostra / 625 m <sup>2</sup>	
	1:1.000 ■	10 x 10 m	1 amostra / 100 m <sup>2</sup>	
	1:500 ■	5 x 5 m	1 amostra / 25 m <sup>2</sup>	

Nota: ‘\*’ Grid do *Global Geochemical Reference Network* (GRN) (2019). ‘▲’ Fase de acompanhamento na exploração mineral; ‘■’ Fase de ultradetalhe na mineração e exploração mineral. Fonte: Adaptado por Salomão (2020) após Modificação de Demetriades *et al.* (2015, 2018). ‘a’ Hosseini-Dinani *et al.* (2019) baseados em Xie & Yin (1993).

Smith *et al.* (2018) indicou que vários levantamentos geoquímicos em escala global foram conduzidos em países de diferentes continentes em destaque para os países que iniciaram

projetos de mapeamento em seus territórios nacionais Austrália, China, Europa, Índia, México, Estados Unidos da América com o intuito de ajudar na gestão ambiental. O Serviço Geológico do Brasil realiza desde 2003 levantamentos geoquímicos em todo território nacional, inicialmente, o projeto se chamava “Geoquímica Multiuso” e posteriormente passou a se chamar “Levantamento Geoquímico de Baixa Densidade”, na figura 1 é possível verificar as localidades dos projetos bem como o tipo de material amostrado. Para os levantamentos geoquímicos do SGB, são considerados como de baixa densidade de acordo com a malha amostra de 1 amostra para cada 150 km<sup>2</sup>.

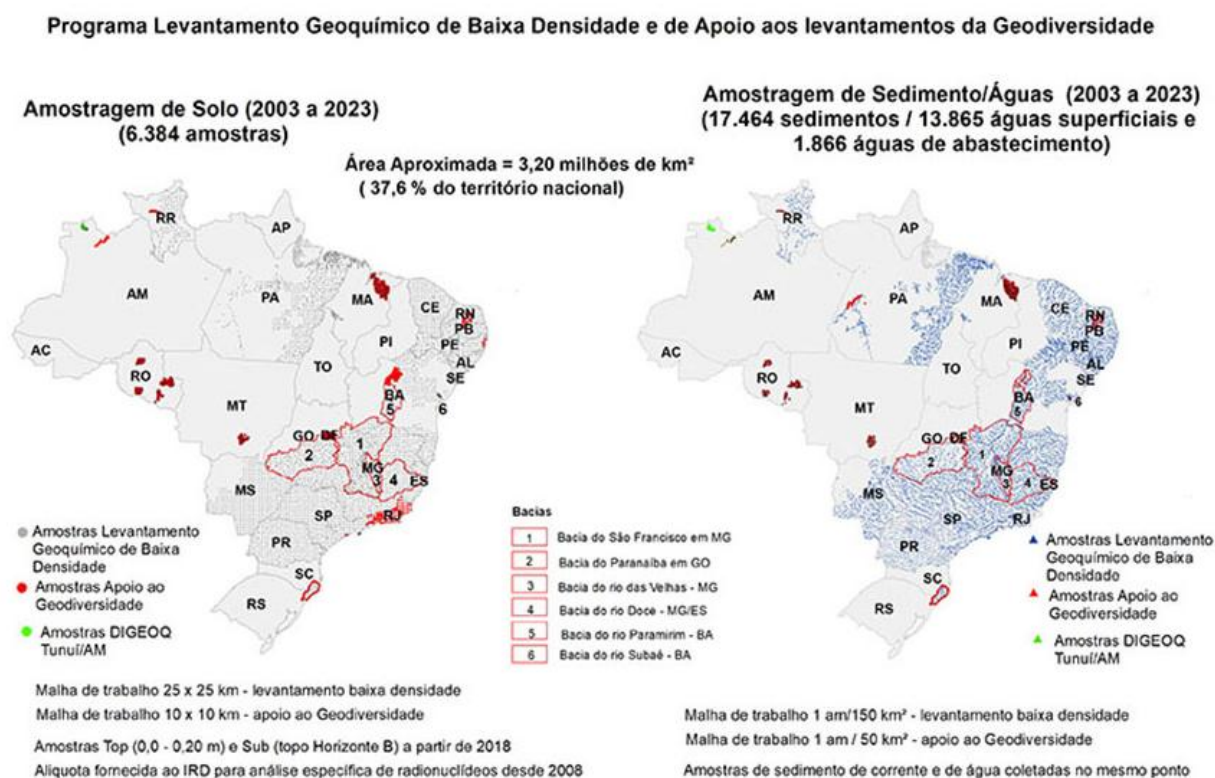


Figura 1- Mapa de localização das áreas trabalhadas pelo Serviço Geológico do Brasil no projeto Levantamento Geoquímico de Baixa Densidade entre os anos de 2003 e 2023. Fonte: SGB (2023).

## 4.2 GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS

A aplicação de estudos envolvendo sedimentos é bem abrangente, Lipp *et al.* (2020) afirmam que a química dos sedimentos de corrente ajuda a entender processos geológicos, climáticos e biológicos, como mudanças climáticas e até formação de montanhas. Onde dados geoquímicos de sedimentos de corrente são usados, por exemplo, para estimar taxas de remoção de CO<sub>2</sub>. Segundo Esteves (1998) os sedimentos de corrente estão divididos em duas camadas: a recente, mais superficial e rica em matéria orgânica, e a permanente, inferior, com baixo teor

orgânico e com condições anaeróbicas. Salomons *et al.* (1984) indicam que o transporte de metais por sedimentos para uma bacia hidrográfica, possui uma real importância no impacto de sua distribuição e influência no ciclo hidrológico, pois pode afetar a qualidade da água, a sedimentação e a recarga dos aquíferos.

Podendo intensificar a contaminação ao longo do tempo. Os metais traços em rios estão diretamente correlacionados ao material particulado, sendo depositados em leitos de rios e várzeas como sedimentos de corrente. Assim, os sedimentos de corrente são eficazes para rastrear fontes de metais e avaliar a contaminação de sistemas fluviais urbanos e rurais (Kuusisto-Hjort & Hjort 2013).

A distribuição espacial dos elementos químicos em mapas pode ser refletida nos sedimentos de corrente, conforme demonstrado em estudos que mostram assinaturas de múltiplos elementos na Província Mineral de Carajás (Salomão *et al.* 2021). De maneira semelhante, Lipp *et al.* (2023), em estudo no norte da Austrália, mostrou como a composição dos sedimentos afeta os padrões espaciais geoquímicos. Laha *et al.* 2024 afirma em estudo na bacia do rio Drini i Bardhë que a geologia e a atividades antrópicas possuem papéis importantes na distribuição dos metais traço (Laha *et al.* 2024). Adicionalmente, o intemperismo das rochas a montante é refletido pelos sedimentos de corrente, influenciando na distribuição dos elementos químicos (Shahrestani *et al.* 2024). Na região do Quadrilátero Ferrífero, a análise de sedimentos auxiliou na identificação de assinaturas geoquímicas e processos de mineralização, contribuindo para o reconhecimento de unidades litológicas e possíveis depósitos minerais (Larizzatti *et al.* 2018). É válido ressaltar que os sedimentos de corrente, são o meio mais amplamente utilizado em mapeamentos geoquímicos regionais em todo o mundo, seja para encontrar áreas mineralizadas, seja para a definição de condições de *baseline* geoquímico (Hawkes & Webb 1962, Rose *et al.* 1979, Lapworth *et al.* 2012).

Diversos fatores ambientais, como variações no pH, no potencial redox e a presença de matéria orgânica, podem afetar a capacidade dos sedimentos de armazenar ou liberar elementos, essa influência é fundamental para entender a dinâmica do fracionamento geoquímico dos sedimentos e que determina a biodisponibilidade e a facilidade de liberação dos metais no meio ambiente (Loureiro *et al.* 2012). A investigação de contaminação por sedimentos de corrente em corpos hídricos traz informações importantes sobre fontes pontuais ou não pontuais de contaminação, fazendo com que seja possível entender a dinâmica dos elementos químicos nos rios (Bilinski & Sakan 2021, Owens *et al.* 2001). Por isso, é importante

avaliar não apenas o teor total dos metais, mas também suas concentrações nas diferentes frações geoquímicas do solo ou do sedimento, para uma análise ambiental mais precisa (Coringa *et al.* 2016, Karbassi *et al.* 2010).

### 4.3 BACKGROUND E BASELINE GEOQUÍMICO

#### 4.3.1 Conceitos

Os termos background e baseline geoquímico apresentam semelhanças e diferenças importantes. Ambos servem como referência para avaliar condições ambientais, distinguir concentrações naturais de influências antrópicas e são essenciais para o monitoramento e gestão ambiental. No entanto, o *background* refere-se exclusivamente aos níveis naturais de elementos químicos, sem qualquer influência humana, representando condições geológicas de longo prazo. Já o *baseline* inclui o estado ambiental "original" ou ideal, que pode considerar condições históricas já influenciadas por atividades humanas, servindo como base para avaliar mudanças ao longo do tempo. Enquanto o *background* é mais estático e focado na variabilidade natural, o *baseline* é dinâmico, incorporando uma perspectiva temporal para análises ambientais.

A discussão sobre a definição deste termo foi proposta inicialmente por Hawkes & Webb (1962) e segundo Licht (2020) a primeira conceituação para *background* foi “a abundância normal de qualquer elemento em qualquer material natural, cujo equilíbrio não foi perturbado pela presença de um depósito mineral”. A discussão da definição dos termos *background* e *baseline*, ainda continua em debate por diferentes escolas de geociências, sendo recomendado, a cada autor indicar qual o conceito que está aplicando. Atualmente, a *International Union of Geological Sciences* (IUGS) lançou um manual (*Manual of Methods for Establishing the Global Geochemical Reference Network*) o qual propõe a padronização de métodos e definição de termos. Sendo assim, para Galuszka (2007a), a definição de *background* significa a concentração de elementos encontrados naturalmente em uma região, de acordo com suas características do meio físico e as dinâmicas espaços-temporais envolvidas neste processo. De modo geral, existem várias denominações para o termo *background*, dentre elas está a definição cunhada por Matschullat *et al.* (2000), onde o termo *background* é definido como uma medida relativa no qual haja diferenciação relacionada a concentrações naturais, porém levando em consideração a atividade antrópicas que influencia neste parâmetro. Além disso, é importante ressaltar que este termo se adequa melhor em áreas onde a ação antrópica ainda não se fez presente, onde a resposta será essencialmente relacionada aos fatores naturais, ou geológicos. Segundo Reimann & Garret (2005), *background* é considerado um valor que

diferencia as concentrações normais de elementos e anomalias, que podem ser indicativas de ocorrência de minério e que as vezes é utilizado como sinônimo de *baseline*. No entanto, não há consenso claro sobre sua definição, evidenciando a necessidade de uma padronização conceitual, com destaque para estudos ambientais (Matschullat *et al.* 2000, Gałuszka 2007, Reimann & Garrett 2005, Reimann & Caritat 2005, Gałuszka & Migaszewski 2012).

Para os casos em que a ação antrópica é evidente, o termo *baseline* é mais adequado, pois, para Gałuszka & Migaszewski (2012), *baseline* é a concentração atual de uma substância química presente em uma amostra ambiental contemporânea, que pode variar de acordo com o tipo de amostra, a localização geográfica e as condições ambientais e antrópica específicas do local. Outros conceitos para *baseline*, como o proposto por Johnson & Demetriadés (2011), no qual define *baseline* geoquímico como a concentração de um parâmetro químico (elemento, espécie ou composto) em uma amostra geológica em um momento específico, determinada por uma técnica analítica. É considerada uma "superfície flutuante", podendo variar ao longo do tempo e entre diferentes locais (diversidade geológica e de usos de coberturas das terras). De acordo com Darnley *et al.* (1995) define o *baseline* geoquímico como a variação predominante na concentração de um elemento no ambiente superficial, refletindo o conteúdo real de um elemento em um determinado momento. Esse conceito abrange tanto as concentrações naturais geogênicas (*background* geoquímico) quanto a contribuição difusa de origem antropogênica, o que foi possibilitado com a criação dos primeiros projetos internacionais para levantamentos geoquímicos globais, como foi citado anteriormente. Demetriadés *et al.* (2018) corrobora o fato de que o *baseline* é um conceito necessário para a avaliação ambiental, pois permite que os pesquisadores e gestores comparem as condições atuais com as condições naturais.

Além do mais como visto na tabela 1, Licht (2020) destaca a importância do meio amostral, granulometria, solubilização, métodos analíticos e os métodos de processamento de dados sobre a variação dos intervalos de *background/baseline* associada aos parâmetros analisados.

Tabela 2- 8 fatores principais que influenciam nos resultados do background geoquímico.

<b>Fatores</b>	<b>Influência</b>
<b>Tipo de amostra coletada</b>	A natureza da amostra (por exemplo, solo, rocha, água, sedimentos de corrente) pode influenciar os resultados e a interpretação do <i>background</i> .
<b>Procedimentos de preparação da amostra</b>	As técnicas utilizadas para preparar as amostras para análise podem alterar a composição química e, conseqüentemente, o valor do <i>background</i> .
<b>Fração a ser analisada</b>	A escolha da fração (por exemplo, total, solúvel etc.) que será analisada pode impactar os resultados, pois diferentes frações podem conter diferentes concentrações de elementos
<b>Técnica analítica utilizada</b>	O método de análise (como espectrometria de massa, fluorescência de raios X etc.) bem como o tipo de digestão ácida pode afetar a precisão e a exatidão dos dados obtidos
<b>Critério para escolha do valor</b>	A forma como o valor de <i>background</i> é definida (por exemplo, média aritmética, mediana) pode influenciar a interpretação dos dados
<b>Densidade amostral</b>	A quantidade de amostras coletadas e sua distribuição espacial são cruciais para garantir que o <i>background</i> seja representativo da área estudada
<b>Variabilidade espacial</b>	As diferenças geológicas e ambientais na área de estudo podem resultar em variações significativas nos dados geoquímicos
<b>Variações temporais</b>	Mudanças ao longo do tempo, como atividades humanas ou processos naturais, podem afetar a composição geoquímica e, portanto, o <i>background</i> .

Fonte: Licht (2020).

#### 4.3.2 Estimativa dos Valores de *Background* e *Baseline* Geoquímico

Segundo Galuszka (2007b) os tipos de métodos principais para estudos voltados para a definição de valores de referência para concentração geoquímica em sedimentos, são eles: (a) direto e (b) estatístico. O primeiro envolve a análise dos dados utilizando média aritmética, geométrica ou mediana, levando em consideração a ausência de atividade antrópica sobre os dados. E o segundo envolve transformações dos dados brutos ( $\log_{10}$ , clr, ilr etc.) com aplicação de estatística robusta, modelagens espaciais (krigagem) e análises gráficas como em histogramas, box plots. Mas para Galuszka & Migaszewski (2011) existem os métodos integrados e que consistem em uma junção de métodos diretos e indiretos. Dentre os principais métodos utilizados para o cálculo de background geoquímico, os métodos indiretos baseados em estatística robusta tendem a ser os mais comuns.

Diversos são os métodos utilizados para definição dos limiares de background geoquímico análises de regressão linear, testes de normalidade, *boxplots*, análise fractal (Selinus & Esbensen 1995). O método 2- $\delta$  iterativo no qual é calculado pela Média  $\pm 2$ \*desvio padrão, foi amplamente utilizado para definir os limiares background (Reimann *et al.* 2005) e que indica uma distribuição normal dos dados, porém esta metodologia está em desuso (Reimann *et al.* 2008), pois não permite uma avaliação abrangente dos dados e na obtenção mais exata dos limiares superiores e inferiores do *background*, afinal, a assimetria dos dados de medida central que podem ser causados por valores anômalos que influenciam diretamente nestes valores.

De acordo com Salomão (2020) as técnicas baseadas em percentis são as abordagens mais simples para a determinação do *background*, com muitos trabalhos desenvolvidos utilizando essa técnica. No entanto, inúmeras limitações associadas a determinação de *outliers* tornam essa técnica frágil (Salomão *et al.* 2021), por esse motivo o autor considera a técnica mMAD a mais robusta, com resultados mais realistas.

O Método mMAD (*Modified Median Absolute Deviation*) é um método estatístico robusto para a identificação dos valores anômalos nos conjuntos de dados geoquímicos, sendo considerado por Reimann *et al.* (2005) o método mais eficaz para estimativa dos valores de background geoquímico, pois possui uma abordagem mais confiável para distribuições assimétricas e dados ambientais.

O cálculo utilizado para a definição é dada por:

$$MAD(y) = 1.48 \cdot \text{median} |y_i - \text{median}(y)| \therefore mMAD = 10(\text{mediana}(y) \pm 2 \cdot [MADy]) \quad (1)$$

Onde, 1.48 é uma constante que auxilia no desvio padrão

O método mMAD, evita a distorção causadas pelos *outliers* que comumente estão presentes em dados geoquímicos (Reimann e Caritat 2017).

Outro método fortemente recomendado é o método *Tukey Inner Fence* (TIF) baseado em Tukey (1977) também conhecido como *boxplots*, sendo recomendado Matschullat *et al.* (2000) e Reimann *et al.* (2005) e que se baseia somente da distribuição dos dados. O método TIF se baseia no uso dos “whiskers” superiores do *boxplots*

Onde,  $Q3 + 1,5 \text{ IQR} =$  terceiro quartil

$\text{IQR} =$  faixa interquartil (valor de  $Q3 - \text{valor de } Q1$ ).

Para calcular é utilizado a seguinte fórmula:

$$(1) \text{ TIF (limiar superior} = 10 (\log_{10} (Q3) + 1,5 \cdot \log (AIQ))$$

$$(2) \text{ TIF (limiar inferior} = 10 (\log_{10} (Q1) - 1,5 \cdot \log (AIQ))$$

$AIQ =$  Amplitude Interquartil ( $Q3 - Q1$ ).

#### 4.4 ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS

A literatura utiliza inúmeros termos para classificar os elementos químicos, tais como: elementos-traço, metal-traço, metais pesados e mais recentemente elementos potencialmente tóxicos (EPTs). Anteriormente, mais comumente denominados como “Metais Pesados”, os elementos potencialmente tóxicos (EPT’s) correspondem a um conjunto de elementos químicos que compõe a crosta e possuem concentrações abaixo de 0,1%. Para Alloway (1990) que apesar de usar o termo “metais pesados”, ainda em voga na época, destaca que a toxicidade dos elementos depende de sua concentração, forma química (especiação) e bioacessibilidade, e ainda explora os efeitos adversos em humanos e animais.

Conforme amplamente reconhecido na literatura, o material de origem desempenha um papel fundamental na distribuição desses elementos no solo (Alloway 1990, Kabata-Pendias & Pendias 2001). Contudo, atividades antrópicas, como a mineração e a indústria metalúrgica, também contribuem de forma significativa para a introdução de EPT’s no meio ambiente. A mineração, por exemplo, libera metais para os sistemas fluviais através de rejeitos e para a

atmosfera na forma de poeira enriquecida. Por sua vez, a metalurgia emite metais para o ar como subprodutos dos processos de refino em altas temperaturas. Enquanto a agricultura libera metais para bacias hidrográficas por meio de fertilizantes, pesticidas e resíduos orgânicos, que são transportados por escoamento superficial, lixiviação e drenagem.

Os elementos potencialmente tóxicos são aqueles que dependendo da concentração podem ocasionar efeitos deletérios na saúde humana, animal ou vegetal. Logo, Plant *et al.* (2001) classificou os elementos em dois grupos: elementos essenciais que são necessários para a vida animal e vegetal, como K, Na, Ca, P e vários elementos de transição, cuja deficiência pode causar desordens fisiológicas. Por outro lado, os EPT's podem ter efeitos adversos mesmo em baixas concentrações, como no caso de As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, V e Zn.

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica consistiu no levantamento de artigos, livros, teses, dissertações, relatórios de pesquisa, e qualquer outra bibliografia relacionada ao tema. A pesquisa foi feita em base de dados nacionais e internacionais como o Portal de Periódico da Capes, *Science Direct*, Google Acadêmico, *Springer*, *Scielo*, *Elsevier* etc.

### 5.2 ORIGEM DO BANCO DE DADOS GEOQUÍMICOS

Este trabalho utilizou o banco de dados geoquímicos de sedimentos de corrente do projeto “Geoquímica Multiuso” do Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM, são dados públicos, com acesso pelo portal GEOSGB (<https://geosgb.cprm.gov.br/>).

O mapeamento geoquímico multiuso no estado do Pará é a continuação de todas as atividades desenvolvidas pelo Programa Nacional de Pesquisa em Geoquímica Ambiental e Geologia Médica (PGAGEM).

### 5.3 AMOSTRAGEM E ANÁLISES QUÍMICAS

A preparação do campo e a coleta de amostras de sedimentos de corrente foram realizados pelo SGB-CPRM em estações de amostragem previamente definidas em diversas microbacias, de forma composta, com ajuste *in loco* caso houvesse dificuldades de acesso que impossibilitasse chegar na estação de amostragem. As amostragens nas estações representam aproximadamente 1 amostra para aproximadamente 150 km<sup>2</sup>, as coletas foram realizadas entre os anos de 2009-2011. Todas as etapas seguiram os protocolos determinados para os levantamentos geoquímicos em escala geológica regional. A configuração da coleta das amostras é caracterizada pelo conceito de bacia de proveniência, onde cada amostra coletada, representa uma microbacia e os resultados das concentrações representam uma junção de todos os fatores que contribuem para o aporte sedimentar nessa área. As coletas ocorreram de forma composta sempre que possível no canal ativo da drenagem em trechos mais retilíneos. No total foram coletadas 276 amostras de sedimentos de corrente nas sub-bacias da BHRC, nos afluentes do Rios Capim e dos rios Ararandeuá, Surubiju, Carandiru-açu e encaminhadas aos laboratórios da SGS- GEOSOL®. A escolha para a coleta dos sedimentos de corrente, ocorreu na porção mais ativa do canal de drenagem, preferencialmente na porção mais retilínea.

Posteriormente, essas amostras receberam tratamento para a realização da análise química, quando foram previamente secadas em estufas a uma temperatura de 60°C e posteriormente as amostras foram quarteadas e peneiradas em malhas de <0,175mm. Em

seguida, as amostras foram pulverizadas e digeridas com água régia. Após a digestão das amostras, estas foram diluídas em solução aquosa e analisadas por ICP-MS (espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado) e ICP-OES (Espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado) para os elementos maiores associado ao sistema de gerador de hidretos para os menores e elementos-traço totalizando 52 elementos (Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Pd, Pb, Pt, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Tl, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn e Zr).

#### 5.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS GEOQUÍMICOS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados das análises químicas previamente realizadas pelo SGB-CPRM passaram por um pré-tratamento visando a padronização (com a conversão para um mesmo sistema de medidas para facilitar o tratamento estatístico). Em posse dos dados, foi verificado quais os elementos estava acima de 70%. Em seguida os dados foram processados estatisticamente para a aquisição de parâmetros descritivos como amplitude, médias, desvio padrão, mediana, coeficiente de variação etc. Posteriormente, os dados foram plotados em gráficos de dispersão, histogramas, gráficos de probabilidade e *boxplots*. Além disso, os dados disponibilizados foram utilizados para análises estatísticas multivariadas, com a obtenção de matrizes de correlação de *Spearman* e análise fatorial

As correlações são ferramenta de análise estatística, usadas para quantificar a relação entre duas variáveis. Existem duas metodologias mais comuns e amplamente aplicadas para verificar essa relação: o teste de Correlação de *Pearson* (estatística paramétrica) e o teste de Correlação de *Spearman* (estatística não-paramétrica). A Correlação de *Pearson* é indicada para avaliar a relação entre variáveis contínuas e que seguem uma distribuição normal. Seu coeficiente varia entre -1 e 1. O valor de 1 indica uma correlação positiva perfeita, onde o aumento de uma variável está diretamente associado ao aumento da outra. Um valor de -1 indica uma correlação negativa perfeita, ou seja, aumento de uma variável pode estar associado à diminuição da outra. Porém, a Correlação de *Spearman* é uma medida de correlação que não depende da linearidade e, diferentemente da correlação de *Pearson*, ela não assume normalidade dos dados, sendo útil para dados ordinais ou que apresentam uma relação não linear, como no caso de dados geoquímicos, que geralmente possuem uma distribuição não normal. O coeficiente de *Spearman*, também varia entre -1 e 1, com valores próximos de 1 ou -1 indicando uma forte correlação. A análise fatorial (AF) é uma técnica utilizada para compreender o padrão de correlações dentro de um conjunto de variáveis observadas. Semelhante à análise de componentes principais (PCA), seu objetivo é reduzir a

dimensionalidade dos dados, mas com o foco adicional de identificar fatores latentes que expliquem as relações subjacentes entre as variáveis. Entretanto, a PCA tem como principal objetivo construir componentes que expliquem 100% da variância do sistema de dados, enquanto a AF tem por objetivo mostrar a melhor estrutura de correlação entre as variáveis consideradas (Reimann *et al.* 2002). Porém, em dados geológicos e geoquímicos raramente se conhece o número de fatores previamente, sendo necessário considerar o conhecimento geológico para identificar possíveis fatores que influenciem a distribuição dos dados, porém estes fatores são conhecidos posteriormente com os dados obtidos (Landim *et al.* 2007). As variáveis são expressas em termos de vetores ortogonais e agrupadas de acordo com sua magnitude e relacionamento, determinando o número mínimo de causas subjacentes à variabilidade composicional. Para realizar a análise fatorial foi selecionado somente os elementos que possuíam acima de 70% do limite de detecção e os dados foram CLR (*Centred Log Ratio*) transformados de acordo com a equação que representa as razões logarítmicas para cada componente, tendo como base a média geométrica de todos os componentes, para tal foi utilizado o pacote *opensource do software* CoDaPack Versão 2.03.01. As análises estatísticas desse trabalho foram construídas no *software* livre Rstudio V. 4.3.2 e no *software* Statistica versão 12.

## 5.5 DEFINIÇÃO DO VALORES DE BASELINE GEOQUÍMICO

Para a determinação do *Baseline* Geoquímico foram utilizadas técnicas como: Representação boxplots (Tukey's Inner Fence – TIF), no qual se baseia em frequência acumulada dos elementos químicos, o teste  $Median \pm 2 * Median Absolute Deviation$  (mMAD), baseado na transformação dos dados em logaritmos e, em seguida, a mediana e o desvio absoluto da mediana são calculados a partir desse conjunto. Com base nesses valores, os limites inferiores (obtidos com o uso de um operador negativo) e superiores (obtidos com o uso de um operador positivo) são determinados em uma escala logarítmica e as técnicas utilizando percentis P75°, P90°, P95° e P98°. Esses testes foram utilizados em diversos estudos de background geoquímico como por exemplo (Reimann & Caritat 2005, 2017, Sahoo *et al.* 2020a, 2020b, Salomão *et al.* 2018, 2019, Queiroz 2023). Vale ressaltar que os valores calculados neste estudo foram baseados em bacias hidrográficas, com o cálculo realizado para a BHRC como um todo, e o cálculo por unidades litoestratigráficas.

O método mMAD é considerado o método mais robusto, em estudos que exigem uma análise rigorosa de dados geoquímicos e ambientais (Reimann *et al.* 2005). Mas, para seu uso é necessário que os dados possuam uma distribuição normal, o que praticamente não ocorre

quando se trata de dados geoquímicos, por este motivo, antes da aplicação é necessário realiza a log transformação na base 10. O método TIF que consiste em um método gráfico e é conhecido como “limiares do box plot” foi baseado em Turkey (1977), onde os limiares são calculados a partir dos *whsikers* superiores (Q3) e inferiores (Q1), estabelecendo dessa forma os limites. Tal qual o mMAD, os dados também precisam ser logtransformados, sendo amplamente recomendado por Matschullat *et al.* (2000) e Reimann *et al.* (2005), porém é mais eficaz quando a porcentagem de *outliers* forem inferiores a 10%.

## 5.6 ÍNDICES AMBIENTAIS

Os índices geoquímicos são parâmetros utilizados para analisar elementos químicos em sedimentos, destacando-se os teores de elementos. Índices como o Fator de Enriquecimento (FE), Fator de Contaminação (FC), Índice de Poluição (PLI), Grau de contaminação (GC), Grau de Contaminação modificado (GCm) e Índice de Risco Ecológico Potencial (IREP), se configuram como os mais utilizados para estes fins (Aprile & Bouvy, 2008, Mortatti *et al.* 2010). Para os cálculos dos índices, o valor de referência utilizado para os índices com a mediana dos dados, pois é um valor que tem menos interferência dos *outliers*, além do cálculo pela segmentação das unidades litoestratigráficas.

O Fator de Enriquecimento (FE), foi calculado tendo Al, Fe + Mn, Ca + Mg como elementos normalizadores, pois são elementos de extrema abundância na crosta terrestre, sendo constituinte essencial dos aluminossilicatos, argilominerais, óxidos/hidróxidos de Ferro e carbonatos, sendo mais estáveis as influências ambientais, entregando resultados mais precisos e confiáveis (Ho *et al.* 2012). Este cálculo é utilizado em cada amostra para verificar a quão enriquecida está.

O Fator de Contaminação (FC) é utilizado para quantificar o aporte antrópico nos sedimentos (Hakanson 1980), indicando as microbacias que possuem os maiores valores. É calculado pela razão entre a concentração do metal no sedimento e o valor de referência (*background*) do metal na área de estudo.

Enquanto, O Gcm é obtido pelo somatório de todos os FC's da área dividido pela quantidade de metais considerados e avalia o grau geral de contaminação do local estudado. Ambos os índices foram propostos por Hakanson (1980).

O índice de risco ecológico Potencial (IREP) é utilizado para avaliar o risco ecológico associado à poluição em ambientes aquáticos, como no caso de sedimentos de corrente. É

calculado com base em fatores de risco específicos para diferentes poluentes, e leva em consideração a sensibilidade ecológica deste poluente para o meio. Onde cada elemento possui um fator de resposta tóxico padronizado.

## 5.7 CONFECÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS E DE DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA

Para a delimitação das microbacias, foi utilizada uma imagem SRTM juntamente com os *shapefiles* OTTO Pfafstetter nos níveis 3, 6 e 7. Esse processo de delimitação envolveu a utilização de Modelos Digitais de Elevação (DEM) gerados com imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e a contribuição de recursos vetoriais para a análise hidrológica. Foi admitido os dados definidos pelo Sistema Ottobacias (Resolução n. 30/2002 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Segundo a classificação federal do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) Resolução nº 32/2003, a Bacia Hidrográfica do Rio Capim está na Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia (RHTA). No entanto, de acordo com a classificação estadual do Pará, conforme a Resolução nº 04/2008 do CERH, a bacia pertence à Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental (RHANO).

Os mapas de uso e ocupação do solo foram gerados a partir dos dados do MAPBIOMAS com imagens dos anos 1985, 1995, 2005, 2010, 2015 e 2020 com auxílio da plataforma *Google Earth Engine*. Para a elaboração dos shapes e mapas foram utilizados os softwares ArcGis v. 10.8 e QGis 2.34.

## 6 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 6.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi realizado dentro dos limites da Bacia Hidrográfica do Rio Capim (BHRC) região nordeste do Pará. Distanto cerca de 130km da capital Belém do Pará. A BRC está localizada na região nordeste do estado do Pará, fazendo parte dos estados do Pará (95,22%) e do Maranhão (4,78%), possuindo uma área total de 37.485,75 km<sup>2</sup> sendo dividida em alto, médio e baixo capim (Lima & Ponte 2012, Gomes *et al.* 2018), se limita a oeste pela Bacia Hidrográfica do Acará e ao norte pela Bacia Hidrográfica do Rio Guamá. No estado do Pará, esta bacia hidrográfica abrange os municípios de Aurora do Pará, Dom Eliseu, Goianésia do Pará, IPIXUNA do Pará, Paragominas, Rondon do Pará, São Domingos do Capim e Ulianópolis. Onde somente Aurora do Pará, Goianésia do Pará, IPIXUNA do Pará, Rondon do Pará e São Domingos do Capim, estão com a sede municipal na região da BHRC (Lima & Ponte 2012, Gomes *et al.* 2021).

### 6.2 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

O uso do solo, é um conceito diretamente conectado à descrição física do espaço utilizado (Di Gregorio & Jensen 1997). O relevo da região é marcado por baixas altitudes, com suave e leves ondulado, marcado por platôs sub-horizontais e terraços escalonados. Esses platôs possuem bordas abauladas sustentadas por argilas oxidadas. Os vales são planos, com cursos d'água encaixados entre 20 e 80 metros acima do nível do mar (Gomes 2023). Em termos de vegetação, a região era originalmente coberta por Floresta Ombrófila Densa Submontana sobre solos bem drenados, de baixa fertilidade e altamente lixiviados (IBGE 2004). Em relação ao clima, possui duas estações definidas como período chuvoso de fevereiro, março e abril, e o período menos chuvoso de agosto a outubro (Gomes *et al.* 2018). A partir da classificação climática de Köppen-Geiger, a BHRC está inseridas em dois tipos climáticos Am (Tropical de Monção) e Af (Tropical Equatorial). O Rio Capim que dá nome a Bacia é o maior rio da área de estudo.

### 6.2 GEOLOGIA REGIONAL

- i) Sequências metassedimentares Neoproterozoicas do embasamento do setor meridional do Cinturão Araguaia;

O Cinturão Araguaia é caracterizado como uma unidade geotectônica localizada na borda leste e sudeste do Cráton amazônico e limitado na porção setentrional e oriental pela

Bacia do Parnaíba, e a sudeste pelo Complexo Porto Nacional (2,14 Ga) e Rio dos Mangues (2,0Ga), estando na porção norte da Província Tocantins (Almeida 1984, Arcanjo & Moura 2000, Gorayeb *et al.* 2000). Composto por duas unidades, denominadas de Complexo Colmeia e pelo Supergrupo Baixo Araguaia (Abreu 1979). É constituída essencialmente rochas ígneas e metamórficas em um terreno de baixo a médio grau metamórfico com rochas variando idades entre arqueano e neoproterozoico (Gorayeb *et al.* 2020). Hasui *et al.* (1975) propuseram a denominação de Formação Estrondo para a sequência Psamo-pelítica da região, posteriormente Abreu (1979) caracterizou a sequência estratigráfica do Supergrupo Baixo Araguaia, elevou a Formação Estrondo a Grupo, integrando a Formação Morro do Campo e a Formação Xambioá, e o Grupo Tocantins composto pela Formação Pequizeiro (Base) e a Formação Couto Magalhães (topo), sendo esta primeira aflorante no município de Goianésia do Pará, dentro da área de influência da BRC. A Formação Pequizeiro contém as litologias clorita-muscovita-quartzo, xistos com intercalações subordinadas de cálcio xistos, quartzitos, magnetita-muscovita filitos (Hasui *et al.* 1977, Abreu 1979, Gorayeb 1989, Gorayeb *et al.* 2008, Pinheiro 2011).

ii) Rochas sedimentares Mesozoicas da Bacia do Marajó;

Segundo Cunha *et al.* (2019) o Grupo Itapecuru é composto pela Unidade Indiferenciada e pelas formações Alcantara e Cujupe. Rossetti (2001) indica que a litologia desta área é composta por pelitos arenosos, argilitos com intercalações de calcário e arenitos finos com grânulos de quartzo. A Formação Ipixuna se caracteriza por grande importância econômica, pela presença de depósitos de caulim. Os depósitos de caulim da Formação Ipixuna (Cretáceo Superior) que afloram próximo à cidade de Ipixuna do Pará, nordeste do estado do Pará. Conforme Cunha (2015), os depósitos de caulim apresentam composição dominada por arenitos, conglomerados e pelitos.

iii) Coberturas Sedimentares Cenozoicas

De acordo com Almeida (2018) as coberturas lateríticas maduras e são representados por relevos mais elevados como platôs, são mais evoluídos com horizontes mais bem desenvolvidos. A Formação Barreiras de idade Oligo-Miocênica, corresponde a rochas siliciclásticas como arenitos, argilitos, e conglomerados que estão localizadas em toda região litorânea do Brasil (Rossetti 2006). Os Sedimentos Pós-Barreiras recobrem discordantemente a sucessão do Grupo Barreiras e horizontes de perfis das Coberturas Lateríticas Imaturas, estes são depósitos arenosos consolidados e semi-consolidados, compostos por areias com

granulometria fina a média (Vasquez & Rosa-Costa 2008). Os depósitos recentes são marcados por Depósitos Aluvionares, relacionados às planícies aluvionares atuais dos principais cursos d'água, constituídos por sedimentos arenosos a argilosos, com níveis de cascalho e matéria orgânica, inconsolidados a semiconsolidados e por Depósitos Litorâneos, depósitos sedimentares de praias, dunas, manguezais e pântanos salinos, são compostos de granulometria tamanho areia (Prata & Lima 2021).

## **7 (ARTIGO) GEOCHEMICAL MAPPING BY CURRENT SEDIMENTS AND DEFINITION OF BASELINE VALUES IN THE CAPIM RIVER BASIN – PA**

Authors: Serra, J.R.F.<sup>a\*</sup>, Barón, A.F.G.<sup>a</sup>, Kütter, V.T.<sup>a</sup>, Marques, E.D.<sup>b</sup>, Lima, A.M.M.<sup>c</sup>  
<sup>a</sup> Graduate Program in Geology and Geochemistry, Faculty of Geology, Institute of Geosciences, Federal University of Pará, Rua Augusto Corrêa S/n, CEP 66075-110, Belém, PA, Brazil

<sup>b</sup> Geological Survey of Brazil (SGB/CPRM), Belo Horizonte Regional Office, 30140-002, Brazil

<sup>c</sup> Graduate Program in Environmental Sciences, Federal University of Pará, Belém 66075-110, Brazil\* Corresponding author.

E-mail address: julio.serra@ig.ufpa.br

### **ABSTRACT**

Geochemical mapping is an essential tool in mineral prospecting and environmental studies, allowing for more effective monitoring of the quality of environmental matrices. This study used data from geochemical surveys conducted by the Brazilian Geological Survey (SGB) in the Capim River Basin (CRW), including the collection and analysis of 276 stream sediment samples between 2009 and 2012. The objective of the research was to develop multielement geochemical maps and define geochemical baseline values, focusing on potentially toxic elements. A total of 52 elements were analyzed, but only Ag, Al, Ba, Bi, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hf, Hg, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, Y, Zn, and Zr presented  $\geq 70\%$  of the results above the detection limit. Three methods of geochemical baseline calculation were applied: mMAD, Tukey's Inner Fence (TIF) and percentiles (98, 95, 90, 75). The study reinforces the mMAD method as the most appropriate to define geochemical baseline, highlighting the importance of geochemical maps in territorial management. The statistical analysis revealed multielement associations and correlations that indicate the strong geological influence on the distribution of chemical elements in sediments, originating from lateritic deposits, aluminosilicate and ferruginous clastic rocks present throughout the study area. The results showed that elements such as Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn presented concentrations above the limits established by CONAMA resolution 454/2012. However, these values were considered overestimated compared to the normative, which uses total sediments, while the study focused on the fine fraction of sediments ( $< 80$ mesh), more representative in environmental terms. It is suggested that environmental indices be used carefully to avoid incorrect interpretations and conclusions and that regionalized indices be created that take into account aspects of the region of application.

## 7.1 INTRODUCTION

Geochemical mapping is a prospecting technique frequently used to locate geochemical anomalies associated with mineral deposits. However, in recent years, it has been applied in environmental geochemistry studies, contributing to better natural resource management by identifying areas that require attention for environmental conservation (Rodrigues & Nalini 2009, Caritat & Cooper 2016). Studies involving metals are of great interest in the fields of environmental science and mineral exploration. In cases where anomalous values are linked to non-natural sources, anthropogenic inputs are associated with different land uses and land cover (Caralinda 2022). The use of geochemical mapping is essential for characterizing the environmental quality of water, soil, and stream sediments, ensuring more effective monitoring of these matrices by identifying the geological, biological, and/or anthropogenic origin of element spatial distribution (Licht 2020, Reimann 2005, Salomão *et al.* 2021). This type of mapping is fundamental for understanding the behavior and distribution of these elements in the environment, serving as a reference for future comparisons and monitoring.

In this context, the need for geochemical mapping studies to define the geochemical baseline and geochemical background of metals in the Amazon stands out, contributing to better natural resource management. Darnley *et al.* (1995) define the geochemical baseline as the predominant variation in the concentration of an element in the surface environment and, moreover, as the actual content of an element at a given point in time. It includes natural geogenic concentrations (geochemical background) and diffuse anthropogenic contributions. For cases where anthropogenic activity is evident, the term *baseline* is more appropriate. According to Gałuszka and Migaszewski (2012), *baseline* refers to the current concentration of a chemical substance present in a contemporary environmental sample, which may vary depending on the sample type, geographic location, and specific environmental and anthropogenic conditions of the site.

Geochemical mapping, along with the definition of the geochemical baseline, has advanced significantly in recent years, driven by technological improvements, the expansion of study scopes, and practical applications. This progress is mainly due to the development of more modern analytical techniques and the integration of geoprocessing tools in geochemistry, which facilitate data interpretation for environmental, climatic, exploration, and social purposes. Additionally, global initiatives such as the *Global Geochemical Baselines Project* have contributed to the standardization of methodologies, enabling comparisons across

different regions of the world and aiding in the identification of geochemical anomalies, contamination monitoring, and environmental impact assessments (Johnson & Demetriades 2011, Demetriades *et al.* 2018).

Despite these advances, due to Brazil's continental territorial extension, there is still no homogeneous geographical coverage of geochemical surveys across all regions, especially in the Amazon region. This results in a scarcity of information due to difficult access and high logistical costs, in addition to often insufficient sampling density, which compromises the representativity and spatial resolution of studies.

In the Amazon, geochemical mapping studies of metals, as well as the definition of geochemical background and baseline, are still limited. However, geochemical surveys conducted by SGB, ITV-DS (Salomão *et al.* 2018, 2020, 2021, Sahoo *et al.* 2020a, 2020b, 2023, Souza-Filho *et al.* 2022, Quaresma *et al.* 2022), and private companies are the best examples of initiatives aimed at filling existing gaps in remote and isolated areas of the Amazon. Although the Capim River Watershed - CRW has been covered by SGB's geochemical survey, the region still lacks research for estimating geochemical baseline values. This is particularly concerning given its economic and social importance to the state. The region is the largest grain producer in Pará, includes the Guamá-Capim Waterway, which facilitates the transport of grains from producing municipalities (Gomes 2023), and accounts for approximately 8.1% of the state's population (SEPLAD 2023). For this reason, the lack of monitoring and consistent time series makes it difficult to analyze long-term trends in the geochemical behavior of this region. More detailed studies in critical areas such as the Amazon are essential to improving the understanding of geochemical processes and promoting the sustainable management of natural resources.

Thus, as sediments are potential carriers of substances and chemical elements, this study aimed to process the geochemical database of stream sediments, particularly potentially toxic elements (PTEs) from the Capim River Watershed – CRW to estimate the geochemical baseline of 28 metals (Ag, Al, Ba, Bi, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hf, Hg, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, Y, Zn, and Zr) and generate geochemical distribution maps. These maps will serve as a reference for these elements in the region and support regional land management.

For this purpose, univariate, bivariate, and multivariate statistical treatments were applied, along with environmental indices calculations, including the Enrichment Factor (EF), Contamination Factor (CF), Modified Contamination Degree (mCd), and Potential Ecological

Risk Index (PERI). This approach allows for an assessment of the behavior and environmental quality of stream sediments through geochemical maps.

## 7.2 GENERAL ASPECTS OF STUDY AREA

This study was conducted within the boundaries of the Capim River Watershed (CRW), located in the northeastern region of Pará and the southwestern region of Maranhão, approximately 130 km from the capital, Belém, Pará. The CRW (Figure 3) is situated in the northeastern part of the state of Pará, covering portions of both Pará (95.22%) and Maranhão (4.78%), with a total area of 37,485.75 km<sup>2</sup>. It is divided into Upper, Middle, and Lower Capim (Lima & Ponte 2012, Gomes *et al.* 2018, Gomes *et al.* 2021) and is bordered to the west by the Acará River Basin and to the north by the Guamá River Basin.

In the state of Pará, this river basin encompasses the municipalities of Aurora do Pará, Dom Eliseu, Goianésia do Pará, Ipixuna do Pará, Paragominas, Rondon do Pará, São Domingos do Capim, and Ulianópolis. Among these, only Aurora do Pará, Goianésia do Pará, Ipixuna do Pará, Rondon do Pará, and São Domingos do Capim have their municipal headquarters within the CRW region (Lima & Ponte 2012). In Maranhão, it includes areas of the cities of Açailândia, Cidelândia, and Vila Nova dos Martírios. This study used data defined by the Ottobacias System (Resolution No. 30/2002 of the National Water Resources Council).

About your hydrology, the main river in the region is the one that bears the name of the basin, the Capim River, which stretches approximately 600 km from its source to where it flows into the Guamá River. The Capim River is formed by the confluence of the Ararandeuá and Surubiju rivers, with a smaller contribution from the Jotubá Stream, specifically near the Serra dos Coroados, in the municipalities of Paragominas and Ipixuna do Pará (Lima *et al.* 2021). In addition to these, the Capim River has several tributaries, including the Água Boa, Cauaxi, Candiru-Açu, Candiru-Mirim, Ipixuna, and Potiritá rivers.

Regarding the climate, this river basin has a meteorological station from the National Institute of Meteorology (INMET) and exhibits typical Amazonian characteristics, with precipitation varying from 1,400 mm to 3,100 mm. The region has two distinct seasons: the rainy season, from February to April, and the less rainy season, from August to October (Gomes *et al.* 2018). According to the Köppen-Geiger climate classification, the CRW is located within two climate types: Am (Monsoon Tropical) and Af (Equatorial Tropical).

The pedology of the region is dominated by oxisols, with a predominance of dystrophic yellow oxisols, followed by neosols, argisols, and gleysols (Gomes *et al.* 2018). Almost the entire region (76% of the territory - 28,405.79 km<sup>2</sup>) consists of yellow oxisols. The geomorphology of the region is characterized by the Lower Plateaus of the Parnaíba Basin, located in the northeastern portion of the state of Pará, occupying a part of the northeastern state of Pará, east of the Tocantins River.

According to the IBGE classification (2009), it is part of the Gurupi/Grajaú River Plateau region. According to Nunes (2013), the average altitude is 114 meters in the central portion, varying between 2 meters in the northern part and 411 meters in the southern part. The lower plateaus of the region are supported by thick aluminous ferruginous lateritic profiles, with ferruginous crusts that slow down erosion. The drainage of these plateaus forms hills and ridges, while the main rivers, such as those forming the Capim River, have shaped meandering valleys adjusted to the base level, with a dendritic drainage pattern (Dantas & Teixeira 2013). The BHRC has an irregular drainage network that gives it an elongated rectangular shape, due to the low slope in the region (Lima 2005).

In terms of vegetation, the region was originally covered by Submontane Dense Ombrophilous Forest on well-drained, low-fertility, and highly leached soils (IBGE 2004). This vegetation is a plant formation found near fluvial environments, occupying floodplain areas, and is referred to as "Riverside Forest" or "Riparian Forest" (IBGE 2012).

### **7.2.1 Land use land cover**

According to Lima (2005), this region experiences an unequal combination of mining, livestock activities, the market, and plant extraction, in addition to being part of the region with the highest production in Pará. The evolution of land use and occupation in the CRW during the years 1985, 1995, 2005, 2010, 2015, and 2020 can be seen in figure X. Sousa *et al.* (2017) analyzed land use and occupation changes in the municipalities of Ulianópolis and Paragominas for the years 2004, 2008, 2010, and 2012 and found that these municipalities lost forest areas to pasture, annual crops, and secondary vegetation. In Paragominas, 3% of the area was lost to pasture and secondary vegetation, while in Ulianópolis, 5% was lost to annual crops and 71% to secondary vegetation. These studies support the findings of Adami *et al.* (2015), which indicate that the main land uses replacing native forests were pasture and secondary vegetation, although the percentage of pasture decreased over the years.

Gomes *et al.* (2018) conducted studies comparing extreme climatic events and land use in the CRW and observed that the greatest changes were in the headwaters of the rivers, with pasture being the most prominent land use. Later, Dias *et al.* (2019) analyzed that the transformation of forests into small, disconnected fragments caused the most significant changes in the region's hydrological processes. The Temporal Analysis of the 35 years visually demonstrates that the main changes are associated with the reduction of native forest areas and the increase in pasture areas, as well as palm oil plantations, soy, forestry, and other types of temporary crops. Another class that increased during this period was urbanized areas.

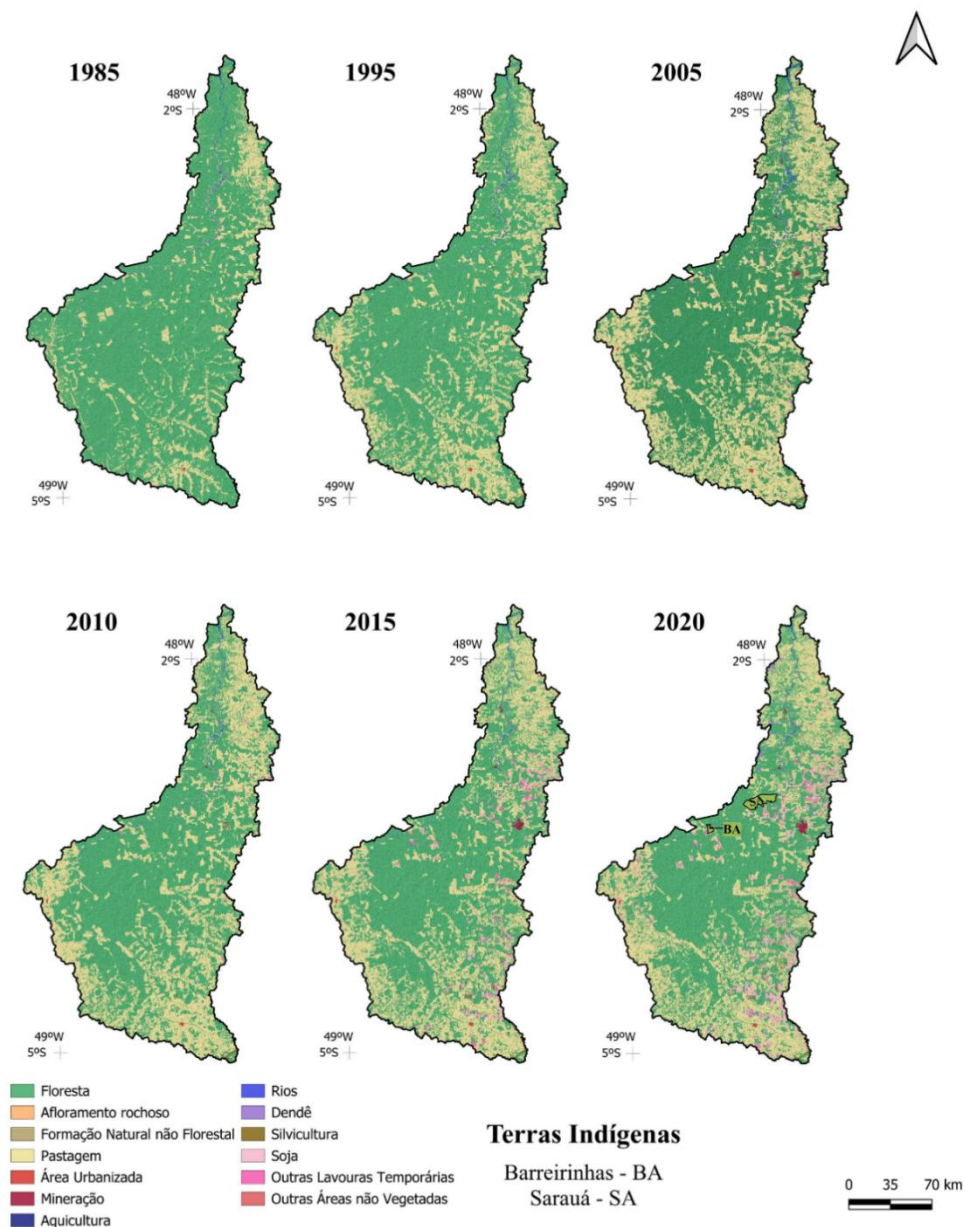


Figura 2- The Evolution of Land Use and Cover in the CRW from 1985 to 2020.

### 7.2.2 Geological settings

For simplification in this study, the geology of the CRW (figure 3) is grouped into three associations:

- i) Neoproterozoic metasedimentary sequences of the basement in the southern sector of the Araguaia Belt

The Araguaia Belt represents the basement of this association. In the study area, it is represented by the Tocantins Group, which consists of the Pequiizeiro Formation (base) and the Couto Magalhães Formation (top). The first formation outcrops in the municipality of Goianésia do Pará, within the influence area of the BRC. The Pequiizeiro Formation contains chlorite-muscovite-quartz lithologies, schists with subordinate intercalations of calcareous schists, quartzites, and magnetite-muscovite phyllites (Hasui *et al.* 1977, Abreu 1979, Gorayeb 1989, Gorayeb *et al.* 2008, Pinheiro 2011).

- ii) Mesozoic sedimentary rocks of the Marajó Basin

There are few studies related to the Marajó Basin, which is located mostly in the state of Pará and partially in the state of Amapá. Most of the studies have been conducted by the National Petroleum Council (CNP), Petrobras, and Texaco (ANA 2018). The region is bordered to the north by the Guiana Shield, to the northeast by the Amazonas Mouth Basin and the Caciporé Basin, to the west and southwest by the Amazonas Basin, to the south by the Brazilian Shield, and to the southeast by the Grajaú Basin. The Grajaú Basin is separated from the area by the Capim Arch (or Tocantins), a flexure of the Marajó Graben (Costa *et al.* 2002). The Itapecuru Group consists of the Undifferentiated Unit and the Alcântara and Cujupe formations, separated by discontinuous surfaces. The lithology of the region, according to Rossetti (2001), is characterized by sandy pelites, tabular claystones with intercalations of limestone, and fine sandstones with quartz granules. It features layers of sandstones and lenses of shale (Rossetti 2001, Vaz *et al.* 2007). The Ipixuna Formation is globally known for its high-quality kaolin deposits, composed of claystones and fine to medium sandstones, moderately selected and essentially kaolinitic (soft kaolin). Mineralogically, it consists of quartz, pseudomorphs of kaolinite derived from feldspar, micas, and aluminum phosphates from the goyazite-crandallite series (Kotschoubey *et al.* 1996, Santos Jr. & Rossetti 2003, Rossetti, 2004). The upper portion of the Ipixuna Formation often shows enrichment in iron oxyhydroxides, popularizing it as "mosqueado" kaolin, which is covered by lateritic crust fragments with kaolinitic, goethitic, and hematitic composition, and subordinately gibbsitic and anatase (Truckenbrodt *et al.* 1991). The

lateritic origin of the kaolins and kaolinized sandstones in the Ipixuna Formation was demonstrated in Costa *et al.* (2009).

iii) Cenozoic sedimentary cover

According to Almeida (2018), the mature lateritic covers are represented by higher reliefs such as plateaus, being more evolved with well-developed horizons. The Brazilian Amazon contains the most notable bauxite and kaolin deposits in Brazil, commonly known as the Paragominas-Capim bauxite-kaolin province. The bauxite deposits in Pará are located in the municipalities of Juruti, Trombetas, Paragominas, and Rondon do Pará (Boulangé & Carvalho 1997, Kotschoubey *et al.* 1997, Lucas, 1997, Kotschoubey *et al.* 2005, Costa *et al.* 2014, Pantoja 2015, Oliveira *et al.* 2016). Meanwhile, the kaolin deposits are in the eastern Amazon, in the northeastern Pará, and are characterized as the largest kaolin province in Brazil, with two large mines in operation (Santos *et al.* 2019).

The lateritic profiles in the Paragominas region consist, from base to top, of a layer of clayey bauxite, massive bauxite, iron-aluminous hard crust, fragmented iron-aluminous hard crust, spherulitic horizon, and nodular bauxite horizon. The lateritic profiles with kaolin lie over the Ipixuna Formation, while the profiles with bauxite are above the Itapecuru Group from the Paleogene (Santos *et al.* 2021). All the lateritic covers in the Amazon are capped by a thick clayey material, ranging in color from red to yellow, approximately 10 to 15 meters thick, called Belterra clay (Oliveira *et al.* 2016).

The Barreiras Formation mainly consists of Neogene sediments and is composed of a variety of lithologies, including sandstones, claystones, siltstones, and fluvial to estuarine origin sediments. These are products resulting from the erosion and transport of materials from the Gurupi belts and the Grajaú Basin (Baía *et al.* 2023). The post-Barreiras sediments unconformably cover the succession of the Barreiras Group and horizons of immature lateritic covers profiles. These are consolidated and semi-consolidated sandy deposits, composed of fine to medium-grained sands (Vasquez & Rosa-Costa 2008). Recent deposits are marked by alluvial deposits, related to the current alluvial plains of the main watercourses, consisting of sandy to clayey sediments, with gravel and organic matter levels, unconsolidated to semi-consolidated, and by coastal deposits, sedimentary deposits from beaches, dunes, mangroves, and saline swamps, composed of sand-sized granulation (Prata & Lima 2021).

## 7.3 MATERIAL AND METHODS

### 7.3.1 Dataset, sampling, and chemical analysis of stream sediments

For this study, the geochemical database of the Capim River Hydrographic Region was used, obtained from stream sediments during the execution of the "Multiuse Geochemistry" project by the Geological Service of Brazil – SGB/CPRM. The stream sediments were collected between 2009 and 2011, and their results are publicly available in the Geological Service of Brazil's database on the GEOSGB portal (<https://geosgb.cprm.gov.br/>). The methodology adopted by SGB in the project consisted of composite samples collected from the most active portion of the rivers, preferably from the straighter sections, until 2 kg of samples were obtained.

In the study area, 276 samples (figure 3) were collected from the tributaries of the Capim, Ararandeuá, Surubiju, and Carandiru-Açu Rivers with a sampling grid of 1 sample/~150 km<sup>2</sup>. In the laboratory, the samples were dried at 60°C in an oven, quartered, sieved to the <80 mesh fraction, pulverized, and subjected to digestion with aqua regia (3 HCl:1 HNO<sub>3</sub>). A total of 52 elements were analyzed using ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry) for major elements, ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) for minor and trace elements, and coupled with a hydride generator system for Hg analysis.

### 7.3.2 Geochemical data processing and statistical analyses

The procedures for the application of univariate, bivariate, and multivariate statistics were used by several authors in research with geochemical data (Caritat *et al.* 2001, Caritat & Cooper 2016, Reimann & Caritat 2017, Reimann *et al.* 2008, 2018, Salomão *et al.* 2018, 2019). Data from 52 elements (Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Pd, Pb, Pt, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Tl, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn, and Zr) were analyzed, initially to verify the percentage of elements with concentrations greater than 70% of the detection limit of the method. A logarithmic transformation (log<sub>10</sub>) was then applied to the raw data of the selected elements to normalize the data, aiming to avoid overestimating or underestimating positive and negative anomalies (Reimann *et al.* 2008).

The CRW is composed of seven lithostratigraphic units, from the basement to the top, with the following sample percentages and sample numbers: the Pequizeiro Formation, with 4.71% and 13 samples; the Itapecuru Group, with 34.78% and 94 samples; the Ipixuna Formation, with 34.05% and 94 samples; the Lateritic Cover, with 19.92% and 55 samples; the

Barreiras Formation, with 6.52% and 18 samples; the Post-Barreiras Sediments, with 0% and no samples; and the Alluvial Deposits, also with 0% and no samples. The last two units, Post-Barreiras Sediments and Alluvial Deposits, only had one sample each, however, these were grouped with the samples from the Barreiras Formation, as it is the geological unit with the greatest similarity and proximity to these formations. This grouping aims to ensure greater statistical accuracy, as a small number of samples in these units could compromise the analysis. For statistical treatment, the statistical summary was calculated along with boxplot graphs, histograms, and normal probability curves for univariate statistics.

The statistical summary is an essential tool in exploratory data analysis, as it allows summarizing large volumes of data into measures that represent the main characteristics of a data set. According to Grunsky (2010), it is the first step in identifying trends, patterns, and structures in the data. Spearman's correlation was used to identify the best correlations between the variables. A value of 0 indicates the absence of a systematic relationship between two variables. The classification of Spearman's correlation was segmented as follows: (1) Light blue (0.50 to 0.59); (2) Dark blue (0.60 to 0.70); (3) Green (0.71 to 0.80); (4) Orange (0.81 to 0.90); and (5) Red (0.91 to 0.99). In this study, values of correlation greater than 0.80 were considered to have a high correlation, values between 0.65 and 0.79 were considered to have an intermediate correlation, and values below 0.65 were considered to have an insignificant correlation.

After the data were clr-transformed using the CoDaPack software (version 2.03.01), factor analysis was performed using Statistica software. Factor analysis (FA) was conducted to define multielemental associations in multivariate statistics. Factor analysis uses the concept of compositional data, which are widely used in mineral exploration, as they transform the data into clr, ilr, or alr to ensure more effective interpretation of the results (Reimann *et al.* 2002, Carranza 2011, Marques *et al.* 2023). In this study, the CLR (Centered Log Ratio) transformation was initially performed using CoDaPack Version 2.03.01. Additionally, factor scores were calculated for each sampling point. According to Marques *et al.* (2023), the elements Zr and Hf generate high loadings in the feasibility analysis and influence the system's variance; therefore, they were excluded from the factor analysis. For grouping, the chosen method was Ward's method, and the selected distance measure was 1-Pearson. All statistical data in this study were performed using the following software: Microsoft Office Excel, STATISTICA® 12, RStudio Version 4.3.2.

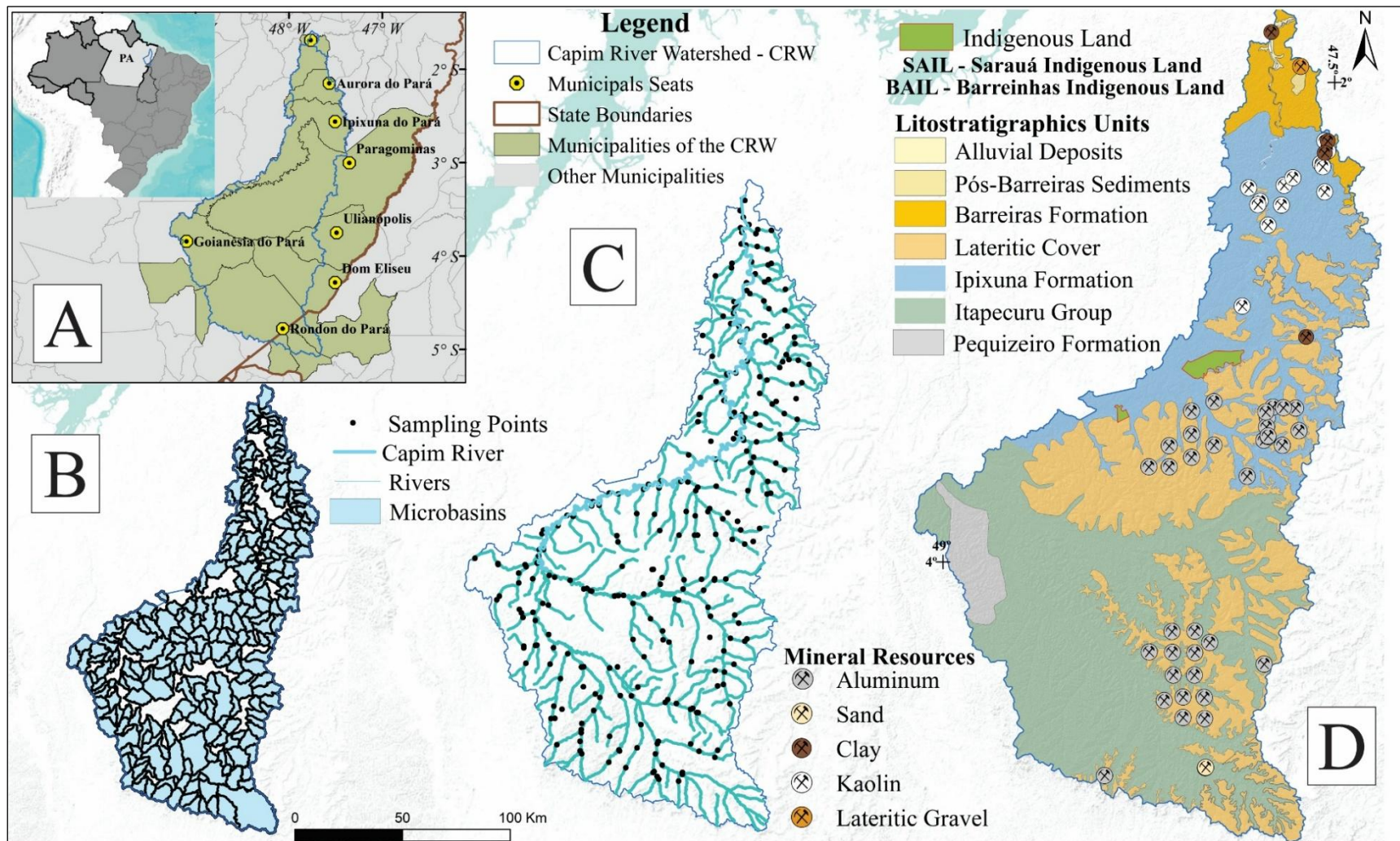


Figura 3- (A) Capim River Watershed localization. (B) Microbasins map (C) Sampling map and rivers and (D) Geological Map.

### 7.3.3 Estimation of Geochemical baseline

For the definition of the Geochemical Baseline, the following methodologies were used: (1) Median  $\pm$  2\*Median Absolute Deviation (mMAD) (Reimann *et al.* 2005), widely used in the literature, as it is considered a more robust methodology; (2) Tukey's Inner Fence (TIF) and Percentiles 98, 95, 90, 75. It is worth noting that the values calculated in this study were based on river basins, with the calculation performed for the entire CRW, as well as calculations by lithostratigraphic units.

To calculate mMAD, the following formula is used (Eq. 1):

$$MAD = K \cdot Median (|Xi - Median (X)|) \quad \text{Eq. 1}$$

Where

K = a constant for adjusting to a normal distribution (K = 1,4826);

Xi = Median concentration.

To calculate the upper (Eq. 2) and lower (Eq. 3) intervals of the mMAD, the following formula is used:

$$Upper\ Limit = Median(x) + 2 \cdot MAD \quad \text{Eq. 2}$$

$$Lower\ Limit = Median(x) - 2 \cdot MAD \quad \text{Eq. 3}$$

Regarding the TIF, the formulas (Eq. 4 and Eq. 5) for its calculation the formula is used:

$$(1) \text{ TIF (Upper limit} = 10 (\log_{10} (Q3) + 1,5. \log (AIQ)) \quad \text{Eq. 4}$$

$$(2) \text{ TIF (Lower Limit} = 10 (\log_{10} (Q1) - 1,5. \log (AIQ)) \quad \text{Eq. 5}$$

IQR = Interquartil Range (Q3 -Q1).

### 7.3.4 Calculation of environmental indices

The geochemical and environmental indices analyzed for the 276 microbasins include: Enrichment Factor (EF), Contamination Factor (CF), Modified Contamination Degree (MCd), and Potential Ecological Risk Index (PERI), using the potentially toxic elements considered in CONAMA Resolution 454/2012 (Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn). These indices are recommended by several authors (Aprile & Bouvy 2008, Mortatti *et al.* 2010). The EF was calculated using two normalizers: 1) Al, representing clay minerals; 2) Fe + Mn, representing iron and manganese oxyhydroxides. The CF is the ratio between the metal concentration in the sediment and the reference (background) value of the metal in the study area. The MCd is obtained by summing all the CFs of the area and dividing by the number of metals considered, assessing the overall degree of contamination. Finally, the PERI calculates the number of times the element's

concentration exceeded the reference (background) value based on the sum of all CFs (Hakanson 1980). In Table 3, all the formulas for the environmental and geochemical indices are provided.

Table 3-Summary of formulas for environmental indices and classification.

Índice	Fórmulas	Valor	Classificação
EF	EF = (Cn / CM sample) / (CM Background / CM Normalizing Element)	<1	Mineral Enrichment
		1 – 3	Low Enrichment
		3 – 5	Moderate Enrichment
		5 – 10	Moderately High Enrichment
		10 – 25	High Enrichment
		25 – 50	Very High Enrichment
		>50	Extremely High Enrichment
CF	FC = Cn / CMedian	<1	Low Contamination
		1 – 3	Moderate Contamination
		3 – 6	Considerable Contamination
		>6	Very High Contamination
GC MCd	GC = $\sum_{i=1}^n FC_i$ GCm = $(\sum FC_i) / n$	<1,5	Null or Very Low
		1,5 – 2	Very Low
		2 – 4	Moderate
		4 – 8	High
		8 – 16	Very High
		16 – 32	Extremely High
		$\geq 32$	Ultra High
PERI	PERI = $\sum_{i=1}^{**n} Tr^i * FC_i$	<90	Low Ecological Risk
		90 – 180	Moderate Risk
		180 – 360	Strong Risk
		360 – 600	Very Strong Risk
		>600	Extremely Strong Risk

Where: Cn is the concentration of the chosen metal; CM "sample" is the concentration of the median of the normalizing element, CM background is the concentration of the chosen element, and CM normalizer is the concentration of the normalizing element. Tri is the toxic response factor for substance i; FCi is the contamination factor for each element i; \*\*n is the total number of substances considered. The toxic response factors for each element are: As (10), Cd (30), Co (5), Cr (2), Cu (5), Mo (5), Ni (5), Pb (5), U (2), Zn (1) (Hakanson 1980).

#### 7.3.4 Geochemical Mapping, Geographic Information System (GIS), and Spatial Analysis

According to the federal classification by the National Water Resources Council (CNRH) Resolution No. 32/2003, the Capim River Watershed is in the Tocantins-Araguaia Hydrological Region (RHTA). However, according to the state classification of Pará, as per Resolution No. 04/2008 of CERH, the watershed belongs to the Western Northeast Atlantic Hydrological Region (RHANO). For the delimitation of the microbasins, an SRTM image was used along with the OTTO Pfafstetter shapefiles at levels 3, 6, and 7. The land use and land cover maps were generated using MAPBIOMAS data with images from the years 1985, 1995, 2005, 2010, 2015, and 2020, utilizing the Google Earth Engine platform.

## 7.4 RESULTS AND DISCUSSIONS

### 7.4.1 Basic statistical analyses, correlation, and factor analysis

The statistical summary of the 28 elements (Ag, Al, Ba, Bi, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hf, Hg, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, Y, Zn, and Zr) with  $\geq 70\%$  of the samples above the detection limit is presented in Table 4. Additionally, this table includes the average concentrations of the elements in the upper continental crust (Upper Crust Concentration – UCC, Rudnick & Gao 2003) for comparison with the enrichment of the elements considered in this study. Regarding the remaining elements, when compared to UCC, none of the elements had a median higher than the average crustal values. A total of 24 elements (As, Au, B, Be, Ca, Cd, Cs, Ge, In, K, Li, Mg, Mn, Na, P, Pd, Pt, Re, S, Sb, Se, Ta, Te, and W) were not used for further statistical analysis. Therefore, these elements were not used in the Spearman correlation analysis or the factor analysis.

After applying the Shapiro-Wilk test to the raw and log-transformed data, only the log-transformed Cr and Pb data obtained values  $>0.05$  in the test (Figure 4). This supports the effect of multiple populations in geochemical data, as these rarely present a normal distribution (Reimann *et al.* 2008, Grunsky 2010, Lapworth *et al.* 2012).

The test showed that most elements had a very low p-value. In addition, the histograms (see Appendix A) confirm the positive skewness of the raw geochemical data. Pearson or Spearman correlation is commonly used for analysis between two variables. However, Pearson correlation has limitations, such as its inability to detect non-linear relationships and its high sensitivity to outliers, as is the case with outliers in geochemical data (Barbiero & Vetoratto 2008).

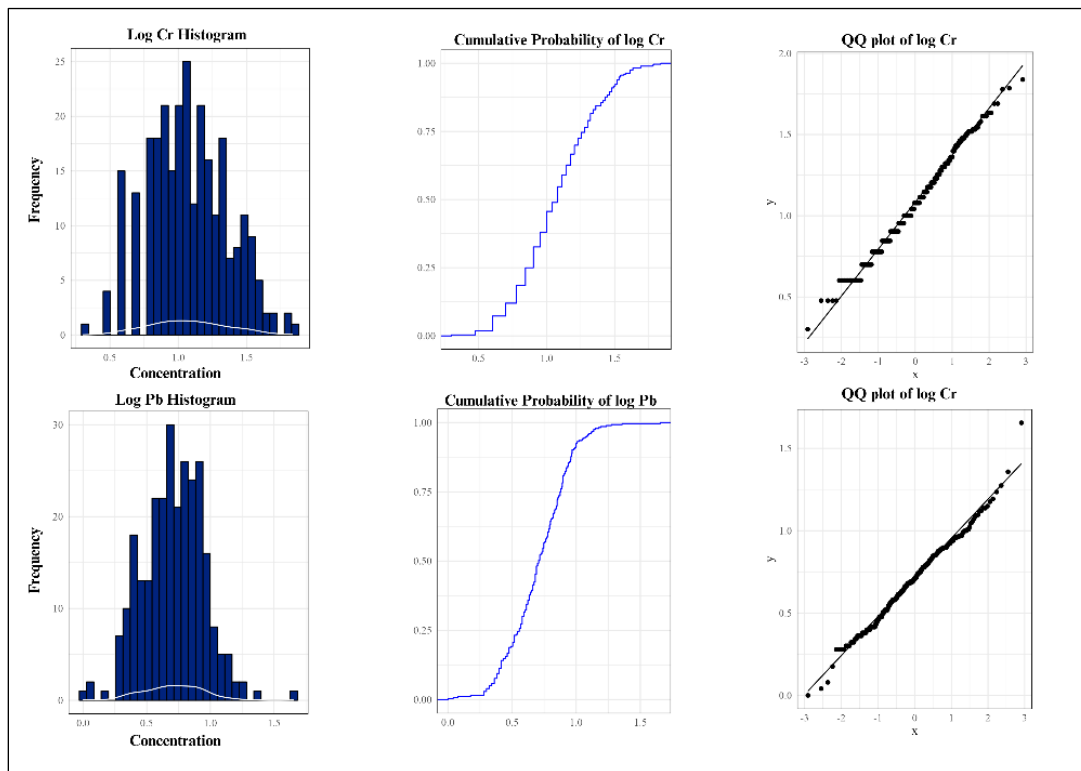


Figure 4- Histogram, Cumulative Probability Curve, and QQPlot of Cr and Pb (log-transformed).

On the other hand, Spearman's correlation is less affected by the effects of outliers. The results of the correlation with the clr-transformed data (Figure 5) show that there are 7 correlations with significance values greater than 0.65 and 6 acceptable correlations with values above 0.575 and less than 0.65. The correlations between Ga-Al are common, as both tend to substitute each other due to their ionic radii, and gallium is typically found in bauxites in isomorphous substitution with aluminum (Torma & Jiang 1991).

Similarly, the correlations between Cr-Al, Al-V, V-Cr, Ba-Sr reflect their affinity with lateritic crusts (Costa *et al.* 2004, Costa *et al.* 2005, Santos 2017), with the latter being associated with feldspars. The correlations between Ce-La (Rare Earth Elements) and Hf-Zr are also common, associated with heavy minerals commonly found in Amazonian lateritic terrains, as observed by Santos (2017) in Rondon do Pará.

Table 4- Statistical summary of the 52 elements. LD = Detection Limits; <LD% = percentage of samples below the LD; Q1 = 25% Quartile; Q3 = 75% Quartile; SD = Standard Deviation; SW = Shapiro-Wilk value (Shapiro-Wilk test); SW log10 = Shapiro-Wilk log-transformed; SW clr = Shapiro-Wilk clr-transformed. UCC – Upper Continental Crust (Rudnick & Gao 2003).

Element	Unit	LD	%<LD	Minimum	Q1.25%	Median	Q3.75%	Maximum	Mean	DP	MAD	Skewness	Kurtosis	S-W	S-W log10	S-W clr	UCC
<b>Ag</b>	mg.kg-1	0.01	2.54	<0.01	0.05	0.06	0.09	0.46	0.07	0.05	0.03	3.23	17.68	<0.05	<0.05	<0.05	53
<b>Al</b>	%	0.01	0.00	0.07	0.25	0.49	1.32	4.48	0.95	1.00	0.49	1.53	1.67	<0.05	<0.05	<0.05	8.15
<b>Ba</b>	mg.kg-1	5	26.81	<5	<5	9	17	241	15.88	23.83	9.64	<5	<5	<0.05	<0.05	<0.05	624
<b>Bi</b>	mg.kg-1	0.02	15.22	<0.02	0.03	0.05	0.08	0.34	0.06	0.05	0.03	1.99	6.67	<0.05	<0.05	<0.05	0.16
<b>Ce</b>	mg.kg-1	0.05	0.00	0.71	4.85	8.4	15.9	393.1	16.14	30.02	6.19	8.14	90.36	<0.05	<0.05	<0.05	63
<b>Co</b>	mg.kg-1	0.1	1.09	<0.1	0.4	0.6	1	10.2	1.04	1.46	0.44	3.63	14.77	<0.05	<0.05	<0.05	17.3
<b>Cr</b>	mg.kg-1	1	0.00	2	7.8	12	19	69	14.8	10.6	7.4	1.84	4.40	<0.05	0.14	<0.05	92
<b>Cu</b>	mg.kg-1	0.5	0.72	<0.5	2.7	4.1	6.2	65.1	5.56	6.03	2.37	5.24	40.67	<0.05	<0.05	<0.05	28
<b>Fe</b>	%	0.01	0.00	0.11	0.66	0.94	1.34	22.5	1.18	1.47	0.50	11.18	156.62	<0.05	<0.05	<0.05	3.52
<b>Ga</b>	mg.kg-1	0.1	0.00	0.4	1.7	3.4	6.9	18.5	4.8	4.0	2.7	1.2	0.7	<0.05	<0.05	<0.05	17.5
<b>Hf</b>	mg.kg-1	0.05	1.81	<0.05	0.22	0.43	0.71	12.4	0.69	1.17	0.34	6.65	56.60	<0.05	<0.05	<0.05	5.3
<b>Hg</b>	mg.kg-1	0.01	13.77	<0.01	0.02	0.04	0.07	0.18	0.05	0.04	0.03	1.04	0.93	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
<b>La</b>	mg.kg-1	0.1	0.00	0.2	2.3	3.9	7.6	219	7.7	16.0	2.8	9.2	109.8	<0.05	<0.05	<0.05	31
<b>Mo</b>	mg.kg-1	0.05	5.07	<0.05	0.17	0.33	0.48	7.42	0.54	0.96	0.23	4.73	24.39	<0.05	<0.05	<0.05	1.1
<b>Nb</b>	mg.kg-1	0.05	0.72	<0.05	0.26	0.41	0.62	3.07	0.55	0.49	0.25	2.51	7.67	<0.05	<0.05	<0.05	12
<b>Ni</b>	mg.kg-1	0.5	6.16	<0.5	1.4	2	2.8	36.9	3.17	4.99	1.04	4.49	21.44	<0.05	<0.05	<0.05	47
<b>Pb</b>	mg.kg-1	0.2	0.00	1	3.6	5.1	7.5	45.2	5.9	3.9	2.8	4.2	35.5	<0.05	0.12	<0.05	17
<b>Rb</b>	mg.kg-1	0.2	24.64	<0.2	<0.2	0.6	1.2	20.3	1.1	2.1	0.7	5.5	38.2	<0.05	<0.05	<0.05	84
<b>Sc</b>	mg.kg-1	0.1	0.00	0.2	0.9	1.4	2.2	5.8	1.7	1.1	0.9	1.3	1.9	<0.05	<0.05	<0.05	14
<b>Sn</b>	mg.kg-1	0.3	0.72	<0.3	0.9	1.2	1.6	11.8	1.5	1.3	0.6	4.6	27.2	<0.05	<0.05	<0.05	2.1
<b>Sr</b>	mg.kg-1	0.5	6.16	<0.5	0.9	1.6	2.8	21	2.4	2.9	1.2	3.7	16.9	<0.05	<0.05	0.18	320
<b>Th</b>	mg.kg-1	0.1	0.00	0.6	4.1	6.3	9.6	136	8.3	9.9	3.7	8.4	98.1	<0.05	<0.05	<0.05	10.5
<b>Ti</b>	%	0.01	6.52	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.6	0.1	0.01	0.01	<0.1	<0.1	<0.05	<0.05	<0.05	3800
<b>U</b>	mg.kg-1	0.05	2.54	<0.05	0.23	0.34	0.54	5.66	0.46	0.51	0.22	5.78	48.26	<0.05	<0.05	<0.05	2.7
<b>V</b>	mg.kg-1	1	1.09	<1	7	12	19.3	83	16.5	15.5	8.9	1.9	3.9	<0.05	<0.05	<0.05	97
<b>Y</b>	mg.kg-1	0.05	0.00	0.4	1.3	1.9	2.9	28.5	2.6	2.8	1.1	4.8	33.7	<0.05	<0.05	0.08	21
<b>Zn</b>	mg.kg-1	1	10.14	<1	2	3	7	39	4.9	5.4	2.9	2.7	10.6	<0.05	<0.05	0.55	67
<b>Zr</b>	mg.kg-1	0.5	0.00	1.1	8.5	15.6	25.5	380	23.9	35.9	12.2	5.8	46.2	<0.05	<0.05	<0.05	193

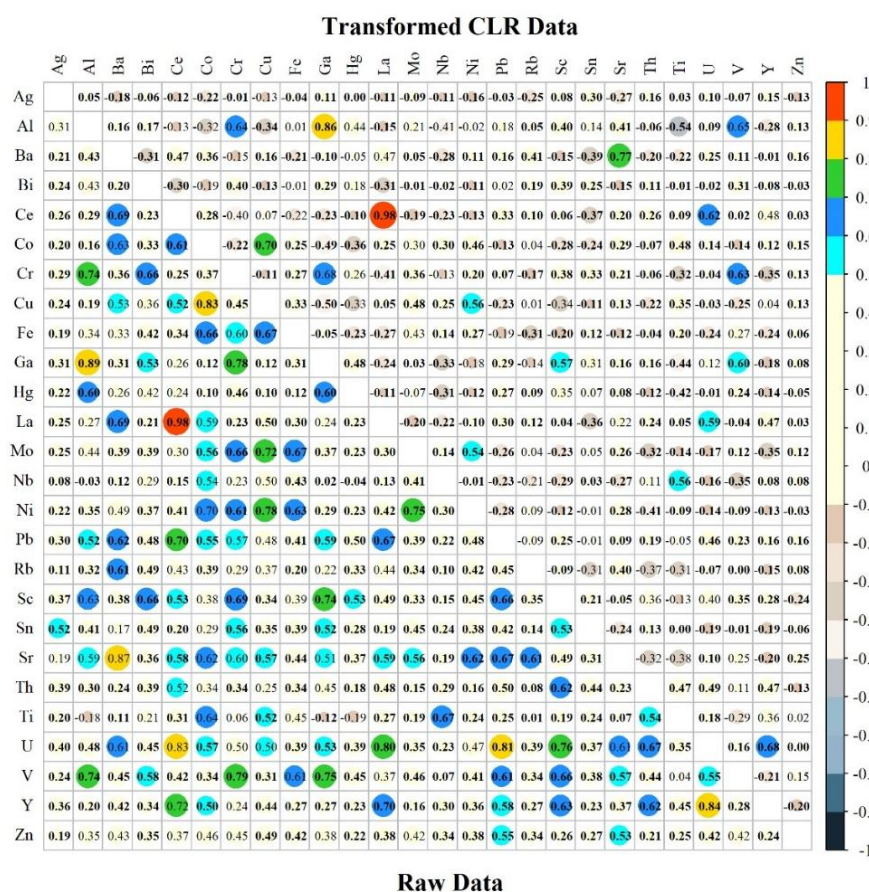


Figura 5- Spearman correlation matrix of the selected chemical elements (raw data and clr-transformed) for the Capim River Watershed.

Factor analysis generated seven factors that account for 75.97% of the system's variance. Factor 1 (21.49% of the system's variance) shows positive correlations for V-Ga-Cr-Al (Figure 6), representing aluminous supergene deposits. This factor also coincides with the bauxite deposits of the Paragominas Bauxite Province and the region of Rondon do Pará. The positive correlation indicates that V is commonly associated with lateritic environments, being linked to the structure of Fe oxyhydroxides, such as goethite. In these minerals, V can be adsorbed on the surface of the oxyhydroxides and/or partially replace  $Fe^{3+}$  with  $V^{3+}$  (Schwertmann & Pfab 1994). When compared with land use and occupation, the highest concentrations of this factor occur in the southeastern portion of the CRW, in pasture and soybean plantation areas in the municipality of Dom Eliseu, Pará.

Factor 2 accounts for 16.70% of the system's variance and shows positive correlations for U-Ce-La-Y-Th (Figure 6), likely associated with zircon and, to a lesser extent, anatase. These minerals are commonly found as resistate and neoformed phases in weathering profiles of the Amazon region and have been identified in the Rio Capim area (Costa *et al.* 2009). The presence of zircon, staurolite, rutile, and tourmaline was reported in a study by James *et al.*

(2018) on rocks from the Barreiras and Ipixuna Formations in the Goianésia do Pará region. These minerals were also found by Nascimento & Góes (2007) in the Itapecuru Formation. Additionally, Costa *et al.* (2009) described these minerals in the Ipixuna Formation and identified ilmenorutile, topaz, and kyanite, though they were rare. In the score map, the highest values occur at the contact between the Pequizeiro Formation and the Itapecuru Group, as well as in the Ipixuna Formation rocks in the municipalities of Goianésia do Pará, Rondon do Pará, and Ipixuna.

Factor 3 (14.45%) (Figure 6) exhibits positive correlations among Ba, Sr, and Rb, suggesting an association with clay minerals and secondary phases. This factor consists of alkali and alkaline earth metals, with Rb frequently replacing K in potassium feldspars and micas due to similarities in their ionic radius and geochemical behavior (Faure 1998, Winter 2001), indicating that feldspars are the source of these elements. Abreu (2019) observed a decrease in Ba-Sr-Rb concentrations from the base to the top of the lateritic profile in the pilot bauxite mines of Rondon do Pará. Additionally, these elements were linked to illite/muscovite, which are more enriched in the clay horizon, matrices, and surface soil compared to the rock material (crusts, nodules, and spherulites). When compared with the land use and land cover map, this factor is more evident in pasture areas in the southwestern portion of the study area.

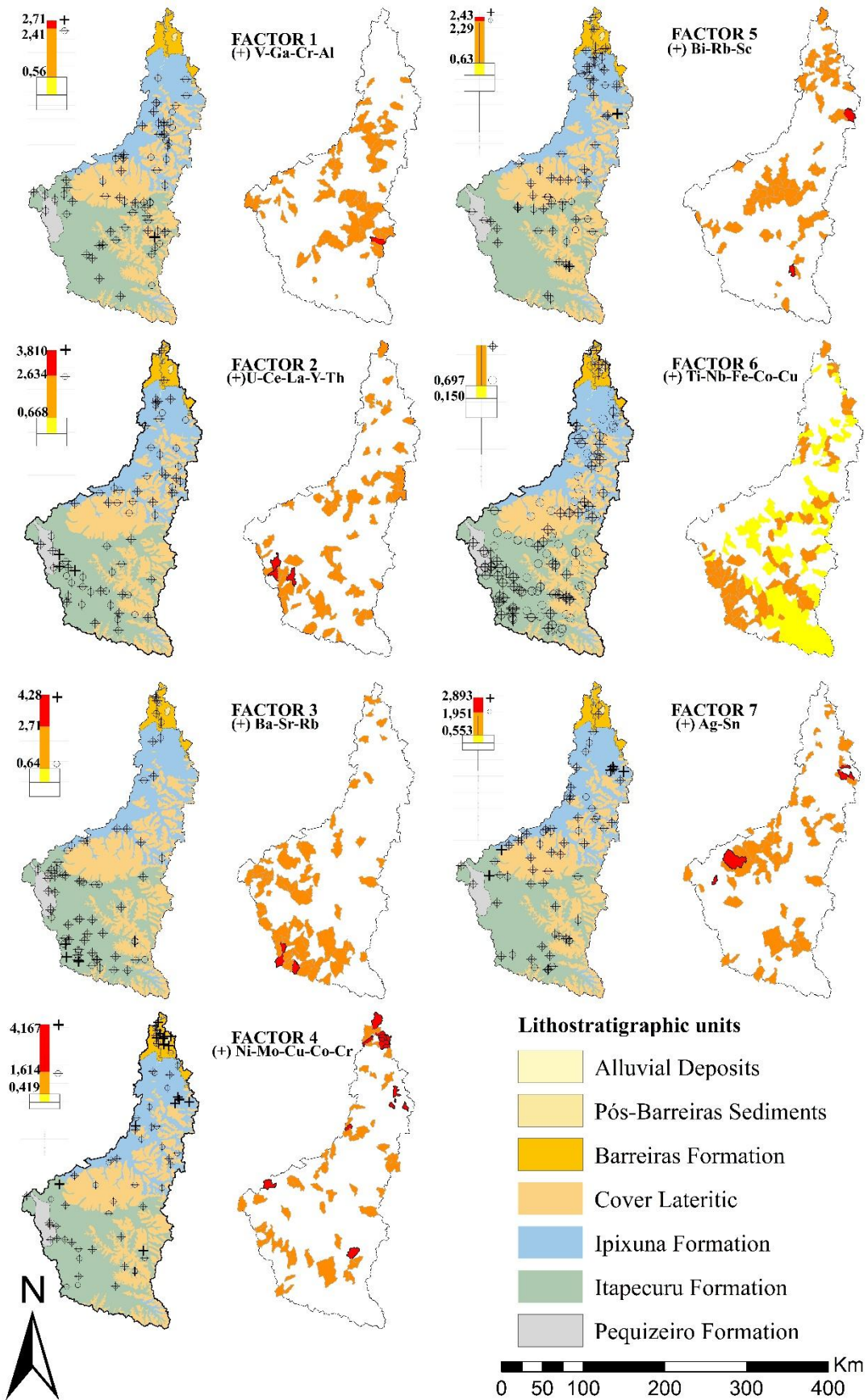


Figure 6- Catchment microbasins map with the values of Factors 1 to Factor 7 from the Factor Analysis.

Factor 4 (9.63%) (Figure 6) shows positive correlations for Ni-Mo-Cu-Co-Cr. This association is commonly found in ferromagnesian minerals. However, in regions containing supergene-origin rocks, such as the CRW, these elements may be associated with iron oxides and hydroxides (hematite and goethite). These elements can occur as trace components in hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) but also in goethite ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), where they may have been assimilated through adsorption processes. According to data from Costa *et al.* (2009), these elements exhibit higher concentrations in the upper portions of lateritic profiles, in association with ferruginous crusts, which corroborates their intrinsic relationship with iron oxides and hydroxides. The highest scores are found in rocks of the Ipixuna Formation, Itapecuru Formation, Lateritic Cover, and especially in the Barreiras Formation. This accumulation is likely related to the prominent presence of lateritic profiles with ferruginous crusts, which form one of the characteristic horizons at the top of the Barreiras Formation (Kotschoubey & Truckenbrodt 1981). Another noteworthy aspect is the presence of "ironstones," as described by Costa *et al.* (2004) in the Barreiras Formation, which can be found in the Amazon region associated with Cenozoic sedimentary sequences and are generally composed of goethite.

Factor 5 shows positive correlations for Bi-Rb-Sc, which may indicate an association with micas and aluminous-siliciclastic rocks in the area. Factor 6 presents positive correlations for Ti-Nb-Fe-Co-Cu, indicating lateritic crusts, as these elements tend to concentrate in ferruginous lateritic nodules, suggesting provenance. Titanium (Ti) and niobium (Nb) are frequently found in resistant minerals such as anatase, rutile, and ilmenite, which can accumulate in lateritic profiles. This factor is similar to Factor 4, as previously explained; however, Factor 6 is more associated with resistate minerals, while Factor 4 is linked to adsorption processes.

Factor 7 (3.85%) shows positive correlations for Ag-Sn, which may suggest the assimilation of these elements at different levels in the lateritic profile. Santos (2017) observed that Sn was present along with the ferroaluminous crusts, and the distribution of this factor is similar to the distribution of Factor 4, which infers that these elements are associated with Fe and Al oxyhydroxides by adsorption. In relation to land use and cover, the highest scores are related to pasture areas and plantations of soy and palm oil.

#### **7.4.2 Geochemical baseline of the analyzed elements**

The results show two main trends for the upper thresholds:  $\text{TIF} > 98\text{th} > \text{mMAD}$  or  $\text{TIF} > \text{mMAD} > 98\text{th}$ , as found in previous studies (Reimann *et al.* 2018, Reimann & Caritat 2017, Sahoo *et al.* 2019a, Salomão *et al.* 2018, 2019, 2020). The other elements follow less prominent

trends, but almost always, mMAD is higher than the 95th percentile. The method considered more robust was the MMAD, while methods such as TIF overestimated the values for certain elements, as shown below. When comparing the upper ranges of BG values for the total CRW and by lithological units with the Level 1 and 2 limits of the CONAMA Resolution 454/12, it was observed that Cr levels exceed the values stipulated by the resolution in all three methods analyzed: TIF ( $73.11 \text{ mg kg}^{-1}$ ), mMAD ( $46.76 \text{ mg kg}^{-1}$ ), and the 98th percentile ( $43.00 \text{ mg kg}^{-1}$ ). It is important to note that the comparison of the data from the present study with the CONAMA Resolution 454/12 should be made with caution, as the resolution provides a guideline limit for total sediment, while the present work evaluated the <80 mesh fraction. In Table 5, the baseline values for the three methods applied to the CRW are presented. In Figure 7, there are box plots for the TIF and mMAD methods, highlighting the potentially toxic elements according to CONAMA. It is possible to observe that TIF tends to present higher values.

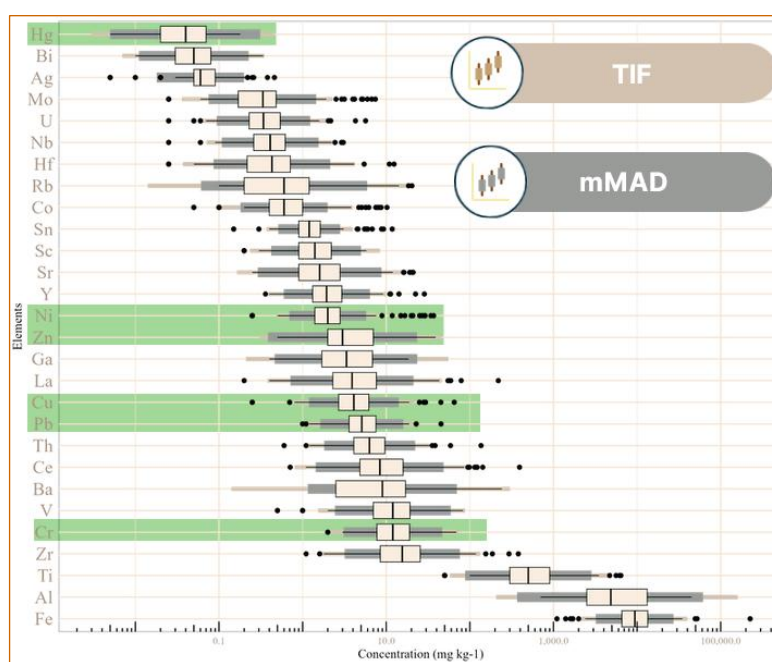


Figura 7. Comparison by box plot between the lower and upper limits for the TIF and mMAD methods.

In the lithological unit analysis, it is important to highlight that the sample size is a crucial factor for estimating baseline data, as the statistical criterion must be respected to ensure greater statistical reliability. The highest concentrations of Cr were more significant in the siliciclastic rocks of the Barreiras Formation with TIF values ( $182.94 \text{ mg kg}^{-1}$ ), mMAD ( $90.88 \text{ mg kg}^{-1}$ ), and percentiles 98th ( $66.28 \text{ mg kg}^{-1}$ ), 95th ( $62.20 \text{ mg kg}^{-1}$ ), 90th ( $52.60 \text{ mg kg}^{-1}$ ), and 75th ( $40.52 \text{ mg kg}^{-1}$ ), in the Lateritic Coverages with TIF ( $81.76 \text{ mg kg}^{-1}$ ) and mMAD

(46.49 mg kg<sup>-1</sup>), and in the Itapecuru Group with TIF (74.15 mg kg<sup>-1</sup>), MMAD (46.76 mg kg<sup>-1</sup>) and percentiles 98th (41.00 mg kg<sup>-1</sup>). In the lateritic environment, such as the one in the region, Cr is generally associated with Fe oxyhydroxides through adsorption. With the exception of lateritic profiles developed over mafic rocks, Cr is not a common element in supergenic environments developed over sedimentary rocks. On the other hand, when comparing the data on the highest Cr concentrations with land use and coverage maps, it was found that Cr is also associated with areas of pastures, soybean, and palm oil plantations present in the CRW. In Figure 8, it is possible to observe that the potentially toxic elements Cr, Cu, and Co present anomalies primarily in the northern and southwestern sectors of the CRW. These anomalies indicate higher concentrations of these elements in these areas, which may be related to local geological conditions or human activities that could impact the environment in those regions.

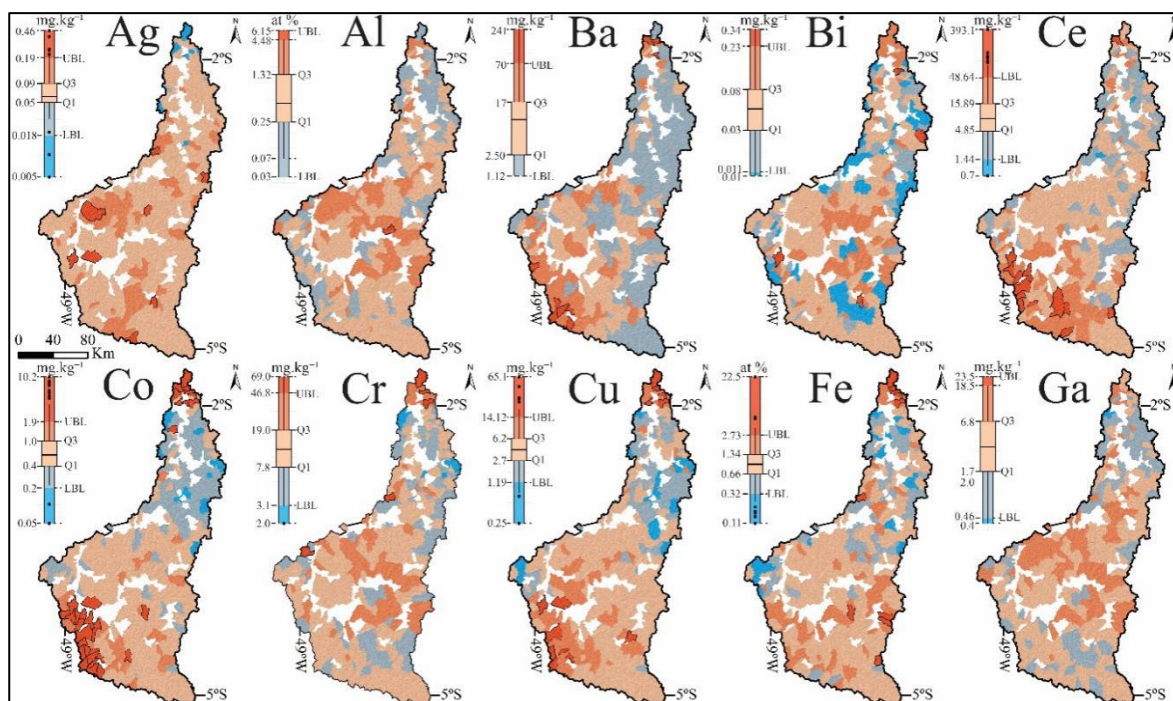


Figura 8. The chemical distribution of elements along the CRW, with a focus on the lower and upper limits of mMAD values, shows noticeable differences in the spatial distribution of each element. This variation highlights how each element behaves differently in relation to its location and concentration, providing insights into the geological and environmental factors that influence the distribution across the region

Table 5- Baseline values for the entire Capim River Watershed - CRW.

Elements	<LD (%)	TIF		mMAD		PERCENTIS			
		LSB	LIB	LSB	LIB	98th	95th	90th	75th
<i>Ag</i>	2,54	0,217	0,021	0,199	0,018	0,215	0,143	0,120	0,090
<i>Al</i>	3,26	16,015	0,021	6,146	0,037	3,810	3,243	2,500	1,320
<i>Ba</i>	0	301,448	0,141	70,031	1,157	94,500	53,000	36,500	17,000
<i>Bi</i>	28,01	0,348	0,007	0,227	0,011	0,190	0,140	0,120	0,080
<i>Ce</i>	0	94,783	0,810	48,643	1,435	96,705	47,020	32,110	15,888
<i>Co</i>	0	3,953	0,101	1,992	0,181	6,850	3,625	2,400	1,000
<i>Cr</i>	1,63	73,113	2,011	46,764	3,079	43,000	34,250	30,000	19,000
<i>Cu</i>	0	21,574	0,776	14,118	1,191	18,550	13,625	10,950	6,200
<i>Fe</i>	0,98	4,013	0,215	2,728	0,320	3,035	2,423	2,065	1,340
<i>Ga</i>	0	55,395	0,210	23,506	0,463	15,250	13,300	11,400	6,850
<i>Hf</i>	0,33	4,226	0,037	2,141	0,086	3,155	2,275	1,350	0,713
<i>Hg</i>	1,63	0,458	0,003	0,311	0,005	0,135	0,110	0,090	0,070
<i>La</i>	13,68	46,025	0,381	21,235	0,716	49,000	22,825	14,950	7,625
<i>Mo</i>	0	2,277	0,036	1,453	0,075	4,625	1,553	0,820	0,480
<i>Nb</i>	5,21	2,283	0,071	1,555	0,108	2,090	1,578	1,110	0,620
<i>Ni</i>	1,3	7,920	0,495	5,748	0,696	25,250	7,925	4,500	2,800
<i>Pb</i>	6,19	22,982	1,170	15,971	1,629	14,550	11,900	9,300	7,525
<i>Rb</i>	0	17,636	0,014	5,917	0,061	6,450	4,325	2,400	1,200
<i>Sc</i>	0	8,408	0,235	4,987	0,421	4,700	3,625	3,000	2,200
<i>Sn</i>	0	3,939	0,371	2,812	0,512	5,800	2,675	2,200	1,625
<i>Sr</i>	0	15,365	0,164	8,785	0,291	11,800	7,150	4,600	2,800
<i>Th</i>	0	34,619	1,140	22,255	1,812	28,700	18,700	14,400	9,625
<i>Ti</i>	0	0,468	0,006	0,285	0,009	0,350	0,228	0,150	0,090
<i>U</i>	6,84	1,943	0,064	1,233	0,094	1,530	1,190	0,800	0,540
<i>V</i>	2,93	87,732	1,536	59,165	2,434	66,000	48,250	36,500	19,250
<i>Y</i>	1,3	10,009	0,390	6,402	0,594	9,160	7,245	5,175	2,965
<i>Zn</i>	0,33	45,835	0,305	23,344	0,386	20,500	15,000	11,000	7,000
<i>Zr</i>	10,09	132,438	1,629	76,063	3,179	109,500	71,950	44,300	25,450

In the northeastern region of Pará, there is a significant amount of Aluminum-Phosphate-Sulfate (APS) deposits originating from different lithologies (Costa *et al.* 2016). These phosphate rocks are used for agricultural purposes, primarily due to the increased research on the use of lateritic aluminum phosphates as an alternative source of phosphorus (Monteiro & Oliveira 1984, Francisco 2006, Freitas 2009, Silva *et al.* 2015). In their research, Queiroz (2022) found Cr and other metals above UCC levels in the phosphate rocks of the Bonito-PA region.

The limits established by the TIF and mMAD methods provide the most relevant results, highlighting geology as the main controlling factor in the distribution of elements, rather than anthropogenic activities. However, specific anthropogenic activities can contribute effectively to the accumulation of these metals. According to Abraham *et al.* (2017), after burning events, there is an increase in the mobility of metals in the soil, with elevated concentrations of metals such as Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn, and As. In the Amazon, Almeida *et al.* (2005) linked the mobilization of Hg in the soil after forest conversion into pastures in the state of Rondônia, associating land use and land cover changes, including burning, with the mobilization of metals in the soil.

Another study on this topic is Yamasoe *et al.* (2000), who associated biomass burning with the release of trace elements like Cu, Zn, Pb, Hg, Cr, and Ni, noting significant emissions and influence on biogeochemical cycles. In Figure 9, as well as in Figure 10, it was observed that the highest concentrations of the elements are in the southwest and north regions of the area, particularly in the Barreiras Formation and the Itapecuru Group. However, it is important to highlight that the Barreiras Formation had fewer samples compared to the other units, which could make the results somewhat biased.

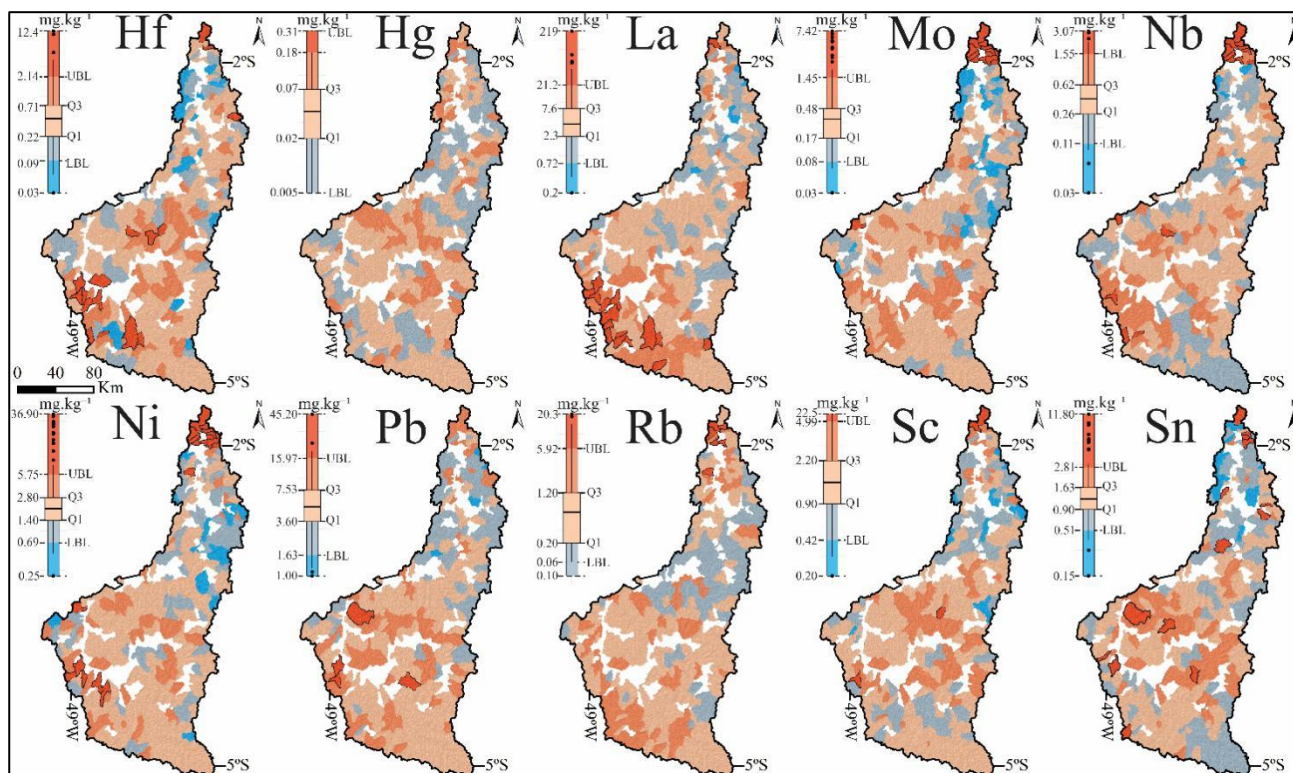


Figura 9. Chemical distribution of elements with a focus on Hg, Mo, Nb, Ni, Pb, and Sn. These elements show similarities in their distribution.

The region is part of the so-called "deforestation arc" or "green arc," which is composed of 49 municipalities in the Legal Amazon that, according to the Amazon Deforestation Calculation Program (PRODES), have the highest deforestation rates in the region (Delazeri 2016). In Paragominas, one of the municipalities that make up the Rio Capim watershed, 7% of its territory was affected by fire in 2015, while in 2016, this value increased to 12%, with areas mapped as having a fire risk above 50% (Sales *et al.* 2019). The elements Th, Ti, U, V, Zn, and Zr also follow a similar distribution along the CRW, which may support the discussion about adsorption by iron oxides and hydroxides and their association with resistant minerals.

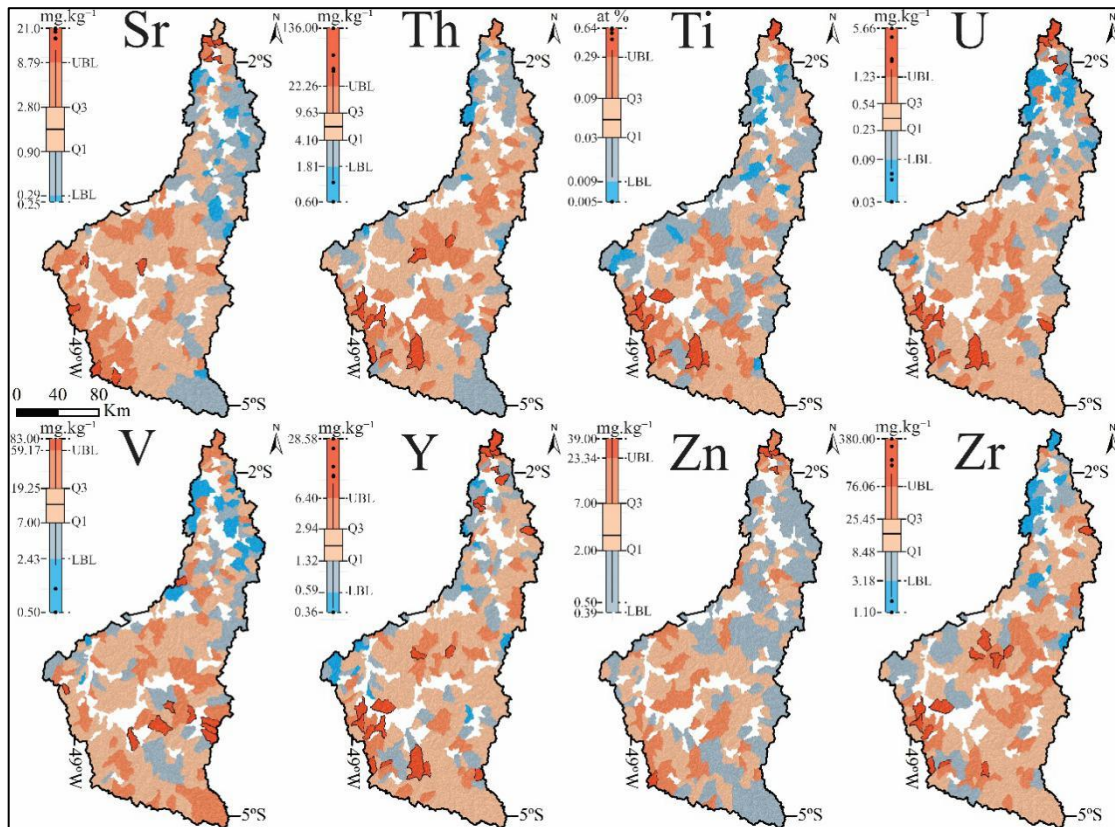


Figure 10- The elements V, Ti, U, Th, and Zr follow the same trend as the other elements seen previously.

According to the MAPBIOMAS Fire Bulletin (2024), during the months of September and October 2024, Pará emerged as one of the states with the highest number of areas affected by wildfires. In October, it was the Brazilian state with the largest accumulated burned area (1,513,074 ha). In the municipalities of the CRW, the affected areas ranged from 3 to 20,398 ha, with Paragominas being the most impacted municipality in the region. The intense wildfires in the area support the fact that changes in land use and land cover influence the mobility of metals in this region. In Figure 28, the boxplot highlights six potentially toxic elements considered by CONAMA Resolution 454/2012, comparing them with the results of the TIF and mMAD methods. It is possible to observe that the baseline values for TIF are almost Always higher than those for mMAD, meaning that the TIF method tends to overestimate the threshold data.

In Figure 11, the distribution of major, minor, and trace elements analyzed in each of the lithostratigraphic units is presented using boxplots (Appendix B) for each geological unit. This graph shows the distribution of the data, allowing the identification of outliers and the presence of positive skewness in the distribution (Rudnick & Gao 2003).

By analyzing the boxplot graphs of the elements, it was observed that they present higher medians in the lateritic covers, which was expected as it is a major element with great abundance in the Earth's crust, as well as the fact that the region is enriched in this element. The only elements whose values in the CRW exceeded those obtained in other studies were Hg, Mo, and Sn, compared to the data from Salomão *et al.* (2020) in the Itacaiúnas River Basin. In comparison with the Vazante Group, found by Amarante (2021) in the Vazante-Paracatu Mineral Province, only aluminum showed higher values than those found (Table 6).

This comparison is effective and highlights the strong influence of the local geology on the distribution of chemical elements throughout the river basins. In the case of CRW, the concentrations of Hg, Mo, and Sn are associated with iron oxyhydroxides, as a small portion (in trace levels) is assimilated by these chemical compounds, a characteristic of this area. Meanwhile, the higher concentration of Al compared to the Vazante-Paracatu Province is linked to supergene processes of Al concentration that occurred in the CRW, predominantly composed of laterites and sedimentary rocks with intense weathering. Therefore, when comparing the CRW with different river basins, it is evident that the geochemical distribution reflects not only environmental and transport characteristics but also the particularities of the geological framework.

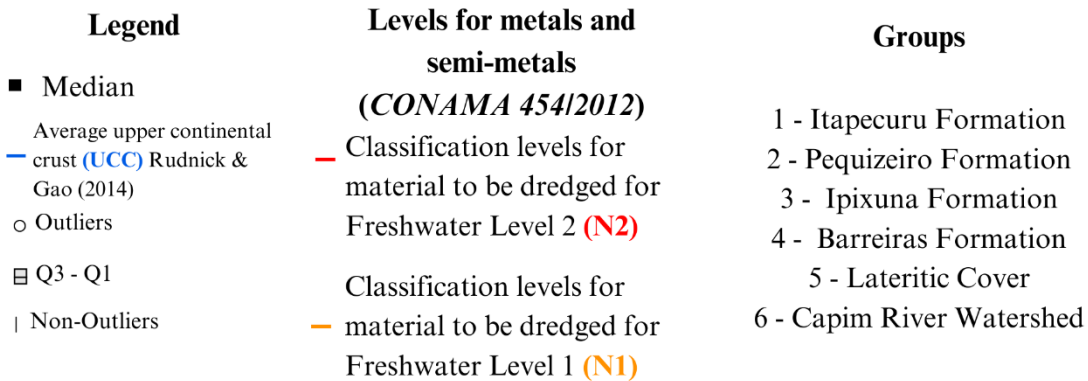
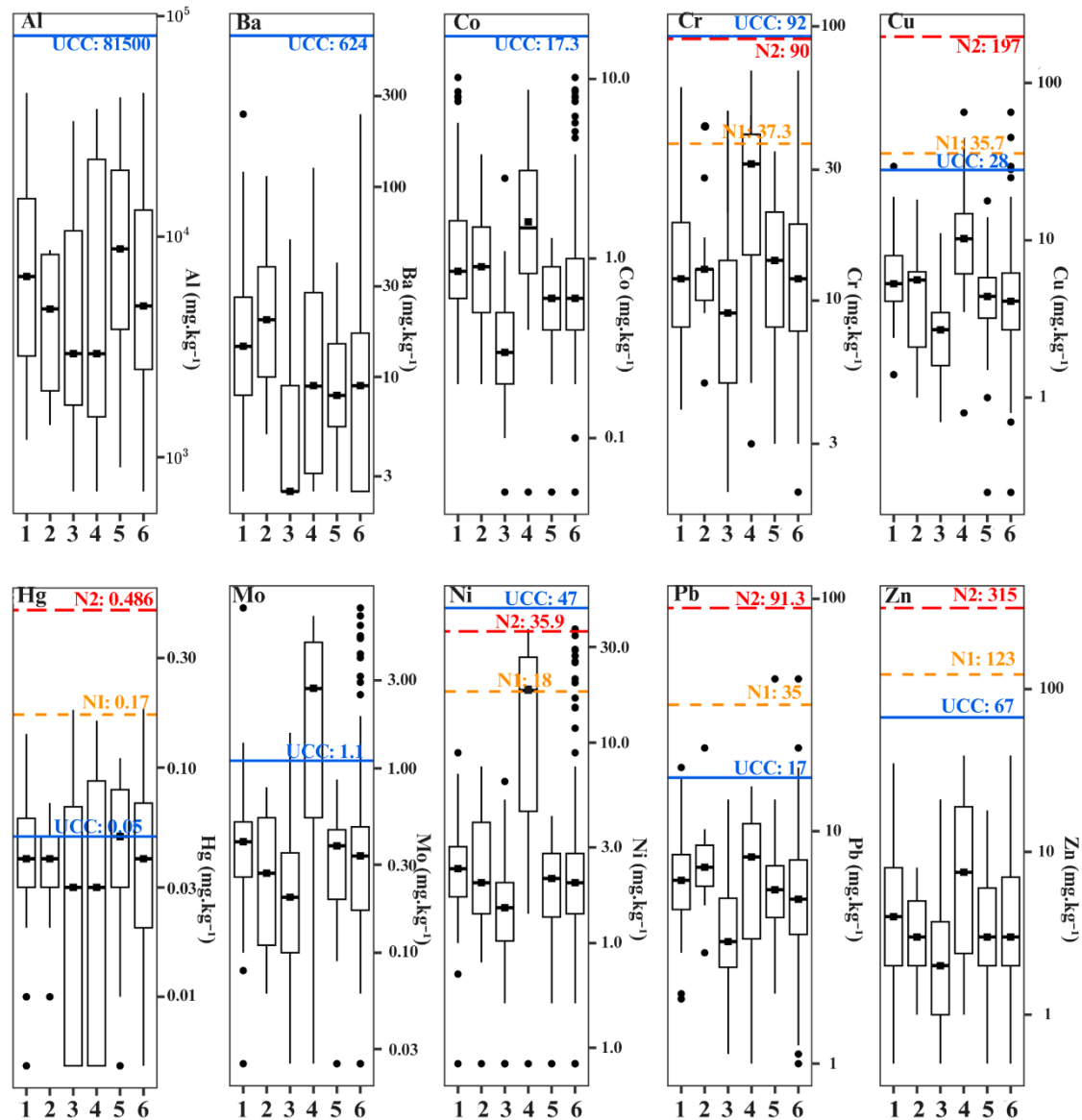


Figura 11- Box plots of 10 potentially toxic elements, showing the baseline variation by geology.

Tabela 6- The presents the baseline values calculated for all methods (TIF, mMAD, and the 98th, 95th, 90th, and 75th percentiles). The results obtained for potentially toxic elements using the mMAD method were compared with other studies on stream sediments that also applied the mMAD method to determine geochemical baseline values.).

Elements	Salomão <i>et al.</i> (2020) – Itacaiunas River Watershed	Amarante (2021) – Vazante Group	Capim River Watershed
Al %	-	2,53	<b>6,15</b>
Ba mg kg <sup>-1</sup>	199,66	157,22	70,03
Co mg kg <sup>-1</sup>	44,07	44,54	1,99
Cr mg kg <sup>-1</sup>	154,78	52,18	46,76
Cu mg kg <sup>-1</sup>	138,15	53,21	14,12
Fe %	10,65	7,57	2,73
Hg mg kg <sup>-1</sup>	0,14	-	<b>0,31</b>
Mo mg kg <sup>-1</sup>	1,27	-	<b>1,45</b>
Ni mg kg <sup>-1</sup>	33,90	41,24	5,75
Pb mg kg <sup>-1</sup>	35,55	52,01	15,97
Sn mg kg <sup>-1</sup>	2,27	-	<b>2,81</b>
V mg kg <sup>-1</sup>	203,04	86,96	59,13
Zn mg kg <sup>-1</sup>	59,90	168,74	23,34

### 7.4.3 Environmental Indices

Of the 28 elements studied, six elements were selected (Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn), primarily because these elements have high toxicity potential and cause well-known detrimental effects. These elements are considered Potentially Toxic Elements (PTEs) by CONAMA Resolution 454/2012. Geochemical indices were calculated using reference values for each of the geological units. This approach allowed for a more robust and representative analysis of the data, considering the distinct characteristics of each unit, which provides a more specific interpretation of the geochemical variations in the studied region. For the Fe index, the calculation was based on one normalizer (Al) representing the phases of clay minerals and oxide-hydroxides, as these are abundant elements in the crust and have a high affinity for trace elements, either through adsorption processes, coprecipitation, or ionic radius similarity.

Since none of the elements had their medians higher than the UCC values, the use of this reference was not adopted, as the data for the enrichment factor (EF) would have been underestimated. In a global analysis, there were no significant divergences when comparing the two normalizers. However, when Al was used as a normalizer, it showed a greater propensity for the Itapecuru Group and, to a lesser extent, the Ipixuna Group, with a focus on Cu, Ni, and

Zn. This indicates that these elements distribute similarly to clay minerals, showing a chemical correlation.

For normalizer, it was possible to observe that geological diversity strongly influences the values, as the trend for all elements is mineral enrichment (<1) and low enrichment (1-3). The GIT and FB units exhibit enrichment ranging from moderate to very high enrichment, with the latter being particularly notable for Hg and Pb, where iron oxides-hydroxides are considered the main carriers of metals in this area. This area is mainly dominated by sandstones and claystones with a high degree of weathering, as well as ferruginous sandstones of the FB. But, in general, all six elements have at least one micro-basin with moderate enrichment.

Although the pattern indicated mineral enrichment, locations where the enrichment ranges from moderately high to high enrichment are close to the more urbanized regions, making it necessary to consider anthropogenic influence in these areas. In percentage terms, using Al as a normalizer, 69.60% (Hg) of the micro-basins were classified as mineral enrichment, with elevated enrichment at 0.36% for Cr, Cu, Ni, and 0.72% for Zn, and extremely high enrichment at 1.45% for Zn and Cu. The analysis with Fe + Mn revealed mineral enrichment in 52.94% of the micro-basins for Cr, with elevated enrichment at 0.72% for Hg, and very high enrichment in 0.36% of the micro-basins. For FEAl of Cr, there were 5 micro-basins with moderately high enrichment and 2 micro-basins with high enrichment. For EFAl of Hg, there were 9 micro-basins with moderately high enrichment and 1 micro-basin with high enrichment (Figure 12).

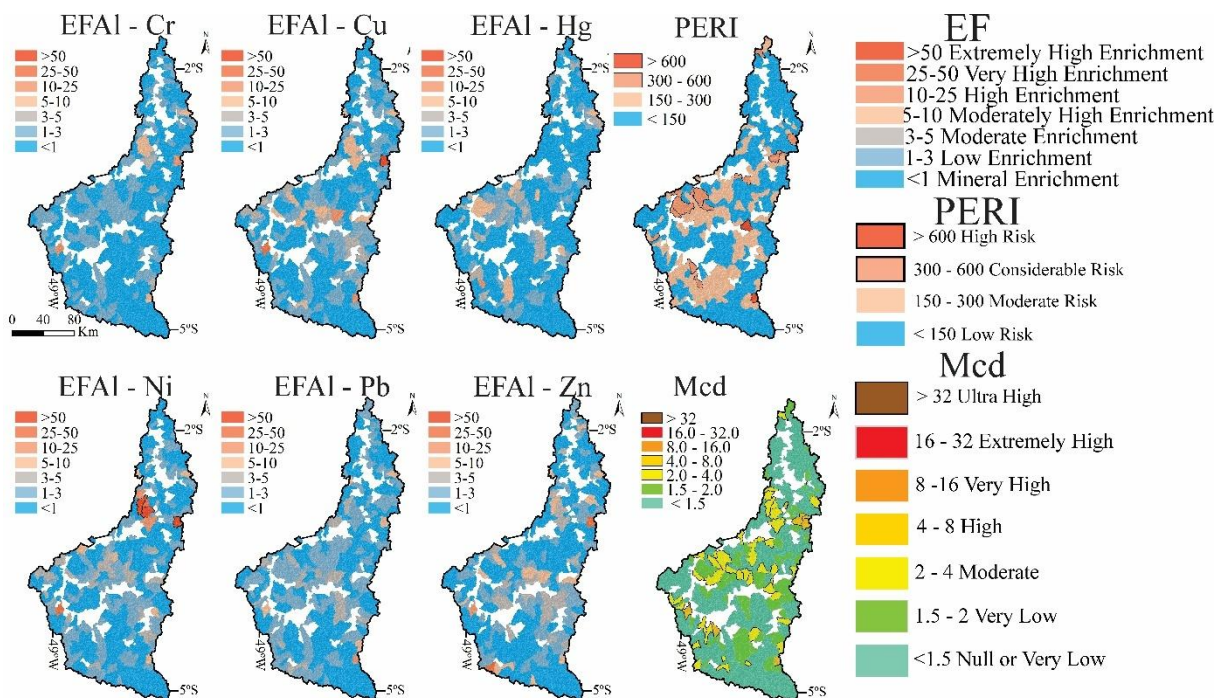


Figura 12. Enrichment Factor for Al as the normalizer for Cr, Hg, Pb, Zn, Cu, and Ni.

Regarding the Contamination Factor (FC) (Figure 13), the results related to the Contamination Factor (FC) indicated considerable contamination for all the elements analyzed, with very high contamination in 1 microbasin for Pb, 1 for Cu, and 5 for Zn. Regarding considerable contamination, the FC classified 17 microbasins with considerable contamination for Zn, 12 for Hg, 10 for Cu, 7 for Cr, 5 for Pb, and 4 for Ni.

The spatial distribution of considerable contamination values also does not show a clear pattern, with microbasins belonging to all litostratigraphic units except the Pequizeiro Formation. This does not necessarily indicate anthropogenic contamination, as previously mentioned, these elements are adsorbed by iron oxide-hydroxide structures, which are very common throughout the entire watershed. Concerning anthropogenic activities, since the region has intense agricultural activities, by-products or waste from these activities could be the main sources, although this was not clearly identified.

Among the multielement indices, the GCm (Figure 12) estimates the overall contamination level of the studied region, considering all the chosen elements. The result for this index is provided as a single value. When analyzing the basin as a whole, the highest degree obtained was high contamination (between 4 and 8), in 7 microbasins, mostly concentrated near the urban area of Paragominas (3 microbasins). More dispersed, but mainly in the central region of the area, where lateritic covers predominate, 41 microbasins with moderate contamination were found, and the remaining had low or very low contamination. Subsequently, the segmented analysis by litostratigraphic units showed a significant reduction in contamination, with the elimination of microbasins classified as having a high contamination degree and a decrease in the number of microbasins with moderate contamination to 25. The use of segmentation by litostratigraphic units can provide a more reliable understanding of the local condition for contamination. Furthermore, the reference value used directly influences the higher or lower number of contaminated microbasins.

Finally, the IREP (Figure 12) shows 2 microbasins with values  $>600$  (extreme risk) and 15 microbasins with significant risk (300-600) for the basin as a whole. However, when the calculation is performed using litostratigraphic units, the IREP decreases to 16 microbasins with medium risk (150-300) and all other basins with low risk ( $<150$ ), showing similar behavior when the GCm was applied using geology as a reference. The municipalities of Paragominas and Rondon do Pará have the highest number of contaminated microbasins. The spatial distribution of the indices in relation to land use and cover indicated more contaminated areas

near urban centers, mainly close to the urban area of Paragominas and areas of pastures or soybean plantations. However, despite being widely used tools in environmental assessment, indices such as the Contamination Factor (FC), Enrichment Factor (FE), Modified Contamination Degree (mCd), and Potential Ecological Risk Index (PERI) have limitations that must be considered for a more accurate interpretation of the data.

The FC (Figure 13) is based on the relationship between the concentration of the analyzed elements and a reference value, which can be influenced by natural variability. Thus, the composition of soils and sediments can lead to contamination classifications that do not always reflect real anthropogenic influence, but rather only the geological reflection of the area. Another issue is that the index does not take into account the bioavailability of the elements, that is, the fraction that is effectively available for interaction with organisms and ecosystems. Elements adsorbed in poorly soluble minerals or associated with stable phases may present low environmental risks, even when classified as high contamination by the FC. Another aspect to consider is that the FC does not differentiate the toxicity of the elements.

The FE, in turn, assesses the degree of enrichment of an element in relation to a normalizer. However, this index can be influenced by the choice of normalizer, as chemical elements exhibit significant variations in the environment.

On the other hand, the GCm, which sums the contamination factors of several elements, may overestimate contamination by giving equal weight to all elements, without considering differences in toxicity or geochemical mobility. As a result, areas with high concentrations of less toxic elements may be classified as highly contaminated, masking the true risks associated with more dangerous elements. The IREP combines the concentration of elements with toxicity and ecological response factors, aiming for a more comprehensive environmental risk assessment. However, this index is based on generalized toxicity coefficients, which do not reflect the tropical climate, as in the case of the CRW. Additionally, this index may not account for processes like bioaccumulation and chemical speciation, which directly influence toxicity.

It is important to highlight that the spatial variability of samples can also significantly influence the results. The heterogeneous distribution of elements in microbasins can lead to differences in the index values, making it difficult to precisely define contaminated areas. Therefore, areas with fewer samples may appear more contaminated, as in the northern portion of the CRW area, where the Barreiras Formation is located. These factors reinforce the need to integrate other evaluation methods, such as chemical speciation analysis, bioavailability, and

ecotoxicological studies, for a more realistic characterization of the environmental risk associated with each element.

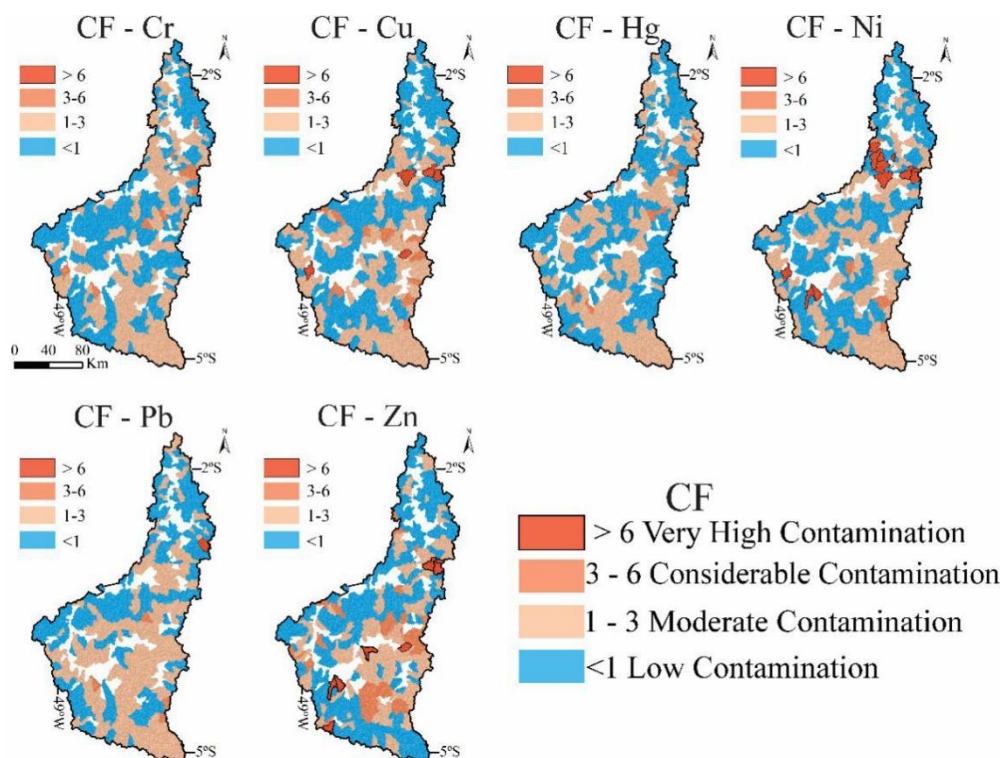


Figura 13. Contamination Factor for Cr, Hg, Pb, Zn, Cu, and Ni and the multielemental indices GCm and IREP.

## 7.5 CONCLUSIONS

The data presented in this study, regarding geochemical mapping, were essential for the spatial visualization of the elements throughout the entire basin. The results show two main trends for the upper thresholds in the different methods, which are:  $TIF > 98^{th} > mMAD$  or  $TIF > mMAD > 98^{th}$ . Among the methodologies applied to define the geochemical baseline, the mMAD method stood out as the most robust and effective, providing more conservative values for the riverbed sediments of the studied region. This is because this methodology is particularly suited for scenarios with high data variability and the presence of outliers. In comparison with the other methods evaluated, the obtained thresholds showed a tendency to overestimate the values. The study also highlights the need to establish reference values for chemical elements at a regional level, as decisions related to land management and public policies concerning the management of contaminated or potentially contaminated areas depend on them.

Additionally, the study included a comparison with CONAMA Resolution 454/2012, both for the baseline results and the environmental indices. Although this resolution is not

specifically aimed at riverbed sediments, it addresses the environmental matrix most relevant to the studied context. It is important to note that the results obtained tend to be overestimated, as the resolution refers to the concentration of metals in the total sediment fraction, while the study considered the fine fraction (<80 mesh). It is known that metals tend to adsorb preferentially onto fine fractions (silt/clay), which are also richer in organic matter (OM), providing favorable sites for bonding with metals.

The environmental indices present weaknesses in their application, which is related to the fact that they were generated based on studies conducted in temperate environments, using ecotoxicological reference values for species typical of these regions. This raises questions about the direct applicability of these indices in tropical environments, such as in the specific case of the present study. For this reason, it is highly recommended to adapt or even create environmental indices that consider the context of the studied area. Although the environmental indices indicate different contaminated areas, the study suggests that there is a strong geological influence in the region, but the possibility of anthropogenic contamination is not ruled out, especially due to the different economic and social activities in the area. The geochemical baseline values defined in this study can be used in future geochemical surveys to assess the anthropogenic contribution in this basin. Supplementary material for this article can be found in the appendix section.

## **Acknowledgments**

To Capes (code 001) for granting the postgraduate scholarship for the execution of this master's research. To the Geological Survey of Brazil (SGB) for providing access to the geochemical databank of stream sediments and geochemical mapping of the Capim River Watershed.

## **References**

Abreu Daiveson Serrão. 2019. *Mineralogy and geochemistry of immature lateritic profiles in Abel Figueiredo - Rondon do Pará, Eastern Amazon*. Advisor: Marcondes Lima da Costa. Ms Dissertation, Institute of Geosciences, Federal University of Pará, Belém, 112 p. Available at: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11839>. Accessed on: Mar. 15, 2024.

Abreu F.A.M. 1978. *Stratigraphy and structural evolution of the northern segment of the Paraguai-Araguaia Fold Belt*. MS Dissertation, Center for Geophysical and Geological Sciences, Federal University of Pará, Belém, 90 p.

Abreu Francisco de Assis Matos de. 1990. *Geotectonic evolution of the Precambrian in the mid-northern region of Brazil and its correlation with West Africa*. PhD Thesis, Federal University of Pará, Belém, 440 p.

Abreu Daiveson Serrão. 2019. *Mineralogy and geochemistry of immature lateritic profiles in Abel Figueiredo - Rondon do Pará, Eastern Amazon*. Advisor: Marcondes Lima da Costa. MS Dissertation, Institute of Geosciences, Federal University of Pará, Belém, 112p. Available at: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11839>. Accessed on: Mar. 15, 2024.

Adami M., Gomes A. R., Coutinho A. C., Esquerdo J. C. D. M., Venturieri A. 2015. Land use and land cover dynamics in the state of Pará between 2008 and 2012. In: 17<sup>o</sup> Brazilian Symposium on Remote Sensing, João Pessoa, *Proceedings*. p. 7029-7035.

Almeida Stephanie Regina Costa. 2018. *Characterization of the lateritic profile of the deposits in the Paragominas bauxite province in Rondon do Pará, Southern block of the Alumina Rondon Project*. Orientador: Prof. Dr. Antônio Emídio de Araújo Santos Júnior. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Geologia, Marabá, 45p.

Amarante Rafael Tarantino. 2021. *Geochemical mapping using stream sediments on the edge of the São Francisco Craton and Brasília Belt, Minas Gerais: definition of geochemical background and application of multivariate statistical analysis*. MS Dissertation Environmental Analysis and Modeling, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, 108 p. Available at: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/42625>. Accessed on: Sep. 20, 2023.

Aprile F. M. & Bouvy M. 2008. Distribution and enrichment of heavy metals in sediments at the Tapacurá River Basin, Northeastern Brazil. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, **12**: 1-8.

Barbiero A. & Vettorato D. 2008. When is the Pearson coefficient not a suitable tool for examining relationships between variables? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**(4): E6.

Boulangé B. & Carvalho A. 1997. The bauxite of Porto Trombetas. In: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A. J., Lucas Y. (eds.). *Brazilian bauxites*. São Paulo, USP/FAPESP/ORSTOM, p. 55-73.

Brazil. Resolution No. 32, of October 15, 2003. Establishes the National Hydrographic Division. Brasília, DF. *Official Gazette of the Union (D.O.U.)*, Section 1, Dec. 17, 2003, p. 142.

Caritat P. de & Cooper M. 2016. A continental-scale geochemical atlas for resource exploration and environmental management: the National Geochemical Survey of Australia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **16** (1): 3-13. doi: 10.1144/GEOCHEM2014-322.

Costa M. L. 1991. Geological aspects of laterites in the Amazon. *Revista Brasileira de Geociências*, **21**(2): 146-160.

Costa M. L. 1997. Lateritization as a major process of ore deposit formation in the Amazon region. *Exploration Mining Geology*, **6**(1): 79-104.

- Costa J. B. S., Hasui Y., Bemerguy R. I., Soares Junior A. V., Villegas J. M. 2002. Tectonics and paleogeography of the Marajó region, Northern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 74: 519-531.
- Costa M. L. *et al.* 2004. Morphology and mineral chemistry of ironstone goethite at the sand-clay interface in sediments of the Barreiras Formation, Eastern Amazon. *Geochimica Brasiliensis*, 18(2): 121-133.
- Costa Marcondes Lima, Carmo Marciléia Silva, Behling Hermann. 2005. Mineralogy and geochemistry of lacustrine sediments with lateritic substrate in the Brazilian Amazon. *Brazilian Journal of Geology*, 35 (2): 165-176.
- Costa M. L., Cruz G. S., Almeida H. D. F., Pöllmann H. 2014. On the geology, mineralogy, and geochemistry of the bauxite-bearing regolith in the lower Amazon Basin: evidence of genetic relationships. *Journal of Geochemical Exploration*, 146 : 58-74.
- Costa M. L., Sousa D. J. L., Angélica R. S. 2009. The contribution of lateritization processes to the formation of the kaolin deposits from eastern Amazon. *Journal of South American Earth Sciences*, 27 (2): 219–234. doi: 10.1016/j.jsames.2008.11.008.
- Costa, M. L., Leite, A. S., Pöllmann, H. A laterite-hosted APS deposit in the Amazon region, Brazil: The physical-chemical regime and environment of formation. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 170, p. 107–124, 2016.
- Geological Survey of Brazil-CPRM. 2010. *Administration report 2009*. Rio de Janeiro, CPRM, 219 p.
- Cruz G. S. 2011. *Bauxite, nodular horizon, and clay cover in the Paragominas and Juruti region, Pará State*. Dissertation (Master's in Geosciences) – Federal University of Pará, Belém, 2011. 114 p.
- Cunha, João Augusto, Carmo Sousa, Débora, Córdoba, Valéria Centurion. Stratigraphic evolution of the Cretaceous deposits in the northern portion of the São Luís-Grajaú Basin (Northeastern Brazil). *Geologia USP. Série Científica*, v. 19, n. 2, p. 151-170, 2019.
- Dantas M. E. & Teixeira S. G. 2013. Origin of landscapes. In: João X. S. J., Teixeira S. G., Fonseca D. D. F. *Geodiversity of the State of Pará*. Belém, CPRM, p. 23-51.
- Darnley A. & Garrett R. G. (eds.). 1990. International Geochemical Mapping – IGCP Project 259. *Journal of Geochemical Exploration*, 39 (1/2): 1-253.
- Darnley, A. G., Björklund, A., Bölviken, B., Gustavsson, N., Koval, P. V., Plant, J. A., Steenfelt, A., Tauchid, M., Xuejing, X. 1996. *A Global Geochemical Database for Environmental and Resource Management*. Final report of IGCP Project 259. *Earth Sciences*, n. 19, UNESCO Publishing, Paris, 122 p.

Darnley, A. G. 1997. A global geochemical reference network: the foundation for geochemical baselines. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 60, p. 1–5. DOI: 10.1016/S0375-6742(97)00020-4.

Delazeri, Linda Mendes. Determinants of deforestation in the municipalities of the Arco Verde–Legal Amazon: an econometric approach. *Revista Economia Ensaios*, v. 30, n. 2, p. 11-34, 2016.

Demetriades, A., Birke, M., Albanese, S., Schoeters, I., Vivo, B. 2015. Continental, regional and local-scale geochemical mapping. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 154, p. 1–5. DOI: 10.1016/j.gexplo.2015.02.011.

Demetriades, A., Smith, D., Wang, X. General concepts of geochemical mapping at global, regional, and local scales for mineral exploration and environmental purposes. *Geochimica Brasiliensis*, v. 32, p. 136-179, 2018.

Di Gregorio, Antonio, Jansen, Louisa J. M. *Land Cover Classification System (LCCS): classification concepts and user manual*. FAO, Rome, 1998.

Dias, Gustavo Francesco de Morais. *Land use and land cover changes and the hydrological behavior of the Capim River basin*. 2018. 93 f. Master's Dissertation in Environmental Sciences – Federal University of Pará, Institute of Geosciences, Emílio Goeldi Paraense Museum, Brazilian Agricultural Research Corporation, Belém, 2018. Available at: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/10760>.

Dias, G. F., Lima, A. M., Santos, M., Bezerra, P. E. The relationship between landscape changes and river discharge in the Capim River basin, Pará, Brazil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais*, v. 14, n. 2, p. 255-270, Aug. 27, 2019.

Faure, G. *Principles and Applications of Geochemistry*. USA: Prentice Hall, 1998. 600 p.

Ferreira, A., Inácio, M. M., Morgado, P., Batista, M. J., Ferreira, L., Pereira, V., Pinto, M. S. 2001. Low-density geochemical mapping in Portugal. *Applied Geochemistry*, v. 16, p. 1323–1331.

Forstner U. Inorganic sediment chemistry and elemental speciation. In: *Sediments*. p. 61-105. CRC Press, 2020.

Galuszka, A. A review of geochemical background concepts and an example using data from Poland. *Environmental Geology*, v. 52, p. 861-870, 2007a.

Galuszka, 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, 2007b.

Galuszka, A., Migaszewski, Z. M. Geochemical background – an environmental perspective. *Minerals*, v. 42, n. 1, p. 7-17, 2012.

Gomes, D. J. C., Lima, A. M. M., Serrão, E. A. O., Rodrigues, H. J. B. Soil water erosion susceptibility: Capim River watershed (MA-PA). *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 43, e55, p. 1-20, 2021. Available at: <https://doi.org/10.5902/2179460X43123>.

Gomes, D. J. C., Lima, A. M. M., Silva Junior, J. A., Serrão, E. A. O. Impacts of land use changes and extreme climatic events on hydrological systems in Eastern Amazon – Capim River basin (PA-MA). *Revista Geográfica Acadêmica*, v. 12, n. 2, 2018.

Gomes, Emerson Batista. Mathematical modeling of soybean transportation from the Paragominas Pole – PA: A study of the logistical feasibility of the Guamá-Capim Waterway. Advisor: Rita de Cassia Monteiro de Moraes. 2023. 77 f. Bachelor's Thesis in Civil Engineering – Faculty of Civil Engineering, Institute of Technology, Federal University of Pará, Belém, 2023. Available at: <https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/handle/prefix/6252>. Accessed on: 01/09/2024.

Gorayeb, P. S. S. Serpentinic bodies of the Araguaia Belt in the regions of Araguacema, Pequizeiro, and Conceição do Araguaia (Goiás-Pará). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 19, p. 51-62, 1989.

Gorayeb, P. S. S., Moura, C. A. V., Barros, G. R. Pb-Pb zircon ages of the Porto Nacional high-grade metamorphic terrain, northern portion of the Goiás Massif, central Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, p. 215-224, 2000.

Gorayeb, P. S. S., Moura, C. A. V., Abreu, F. A. M. Geology of the Serra dos Martírios-Andorinhas State Park and surrounding area. In: Gorayeb, P. S. S. (Org.). *Parque Martírios-Andorinhas: Knowledge, History, and Preservation*. Belém: UDUFPA, 2008. p. 53-75.

Gorayeb, P. S. S., Moura, C. A. V. Investigation of magmatic events in the Tocantins Province - Northern Brazil using Sm-Nd TDM ages and Pb-evaporation zircon ages of granitic rocks. In: INGEIS/CIG, South American Symposium on Isotope Geology, 6., 2008. Book of Abstracts, 1 CD-Rom.

Gorayeb, P. S. S., Santos, W. P., Moura, C. A. V., Sousa, L. H. Petrology, geochemistry, and geochronology of the Presidente Kennedy and Barrolândia granites: Contextualization in the evolution of the Araguaia Belt. *Geologia USP. Série Científica*, v. 19, p. 89-116, 2019.

Gorayeb, P.S.S., Cordani, U.G., Silva Neto, J.J.A., Sato, K., Maurer, V.C. U-Pb Shrimp Zircon Ages of Ediacaran-Cambrian Granitic Bodies in Central Brazil: Implications For The Tectonic Evolution of The Araguaia Belt. *Journal of South America Earth Science*, Tribute to Márcio Martins Pimentel, 2020.

Grunsky, E. C. The interpretation of geochemical survey data. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 10, n. 1, p. 27-74, 2010.

Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, **14**(8): 975–1001. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).

Habib, K., Hansdóttir, S. T., Habib, H. Corrigendum: "Critical metals for electromobility: Global demand scenarios for passenger vehicles, 2015–2050". *Resources, Conservation and Recycling*, 160: 104932. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104932>, 2020.

Hasui, Y., Hennes, W. T., Iwanuch, W. Potassium-argon ages of the Precambrian in the Central-Northern region of Brazil. *Boletim do Instituto de Geociências - USP*, v. 6, p. 77-83, 1975.

Hasui, Y., Abreu, F. A. M., Rangel, J. M. R. Stratigraphy of the Paraguai-Araguaia Fold Belt in the Central-Northern region of Brazil. *Boletim do Instituto de Geociências - USP*, v. 8, p. 107-118, 1977.

Hawkes H. E. & Webb J. S. 1962. *Geochemistry in mineral exploration*. New York, Harper and Row, 415 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2003. *Integrated digital cartographic base of Brazil at a scale of 1:1,000,000 - Hydrological region Boundaries - National Hydrological Division*.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE. 2004. *Vegetation map of Brazil*. Rio de Janeiro, IBGE. 1 map, color, scale 1:5,000,000.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE. 2009. *Technical manual of geomorphology*. Rio de Janeiro.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE. 2012. *Technical manual of vegetation*. Rio de Janeiro,

Johnson, C.C., Demetriadés, A. Urban geochemical mapping: a review of case studies in this volume. In: Johnson, C.C., Demetriadés, A., Locutura, J., Ottesen, R.T. (Eds.). *Mapping the Chemical Environment of Urban Areas*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 2011. p. 17-36.

Kotschoubey, B., Truckenbrodt, W. Polygenetic evolution of bauxites from the Paragominas-Açailândia district (States of Pará and Maranhão). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 11, n. 3, p. 193-202, 1981.

Kotschoubey, B., Truckenbrodt, W., Hieronymus, B. 1996. Kaolin and semi-flint clay deposits in the northeastern state of Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, 26(2), p. 71–80.

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

Kotschoubey, B., Calaf, J.M.C., Lobato, A.C.C., Leite, A.S., Azevedo, C.H.D. 2005. Characterization and Genesis of Bauxite Deposits from the Paragominas Bauxite Province, Northeast of the Grajaú Basin, Northeast of Pará, West of Maranhão. In: Marini, O.J., Queiroz, E.T., Ramos, B.W. (eds.). *Characterization of Mineral Deposits in Mining Districts of the Amazon*. Brasília, CT-MINERAL/FINEP/ADIMB, p. 691-782.

Lapworth D. J. *et al.* 2012. Geochemical mapping using stream sediments in west-central Nigeria: implications for environmental studies and mineral exploration in West Africa. *Applied Geochemistry*, 27 (6): 1035-1052.

Lima A. M. M. 2005. Water resources information system as a support for the preparation of the master plan for the Capim River basin–PA. In: 12° Brazilian Symposium on Remote Sensing. *Proceedings*[...]. São José dos Campos, INPE, p. 3789-3796.

Lima Aline Maria Meiguins de & Ponte Marcos Ximenes. 2012. Landscape dynamics of the Capim river basin - PA. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S.l.], 5 (1): 127–142. DOI:

10.26848/rbgf.v5i1.232779. Available at: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/232779>. Accessed on: 18 Mar. 2024.

Lima Aline Maria Meiguins de *et al.* 2021. Hydro-agricultural areas of the Capim river watershed, Eastern Amazon, Brazil. *Geosaberes*, Fortaleza, **12**: 1 - 22, Jan. ISSN 2178-0463. Available at: <http://www.geosaberes.ufc.br/geosaberes/article/view/989>. Date accessed: 18 Mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.26895/geosaberes.v12i0.989>.

Lucas Y. 1997. The bauxite of Juruti. In: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas, Y. *Brazilian bauxites*. São Paulo, USP/FAPESP/ORSTOM. Chapter 3, p. 107-136.

Marques Eduardo Duarte *et al.* 2023. Geochemical mapping by stream sediments of the NW portion of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil: application of exploratory data analysis (EDA) and a proposal for the generation of new gold targets in the Pitangui gold district. *Journal of Geochemical Exploration*, **250**: e107232.

Matschullat, J., Ottenstein, R., Reimann, C. Geochemical background - can we calculate it? *Environmental Geology*, v. 39, p. 990-1000, 2000a.

Mortatti, J., Hissler, C., Probst, J.-L. Distribution of heavy metals in bottom sediments along the Tietê River basin. *Geologia USP, Série Científica*, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 3-11, Jul. 2010.

Nascimento, Marivaldo dos Santos, GÓES, Ana Maria. Petrography of sandstones and heavy minerals from Cretaceous deposits (Itapecuru Group), São Luís-Grajaú Basin, northern Brazil. *Brazilian Journal of Geosciences*, São Paulo, v. 37, n. 1, p. 2, Mar. 2007.

Nunes, Hildo Giuseppe Garcia Caldas. Hydrological modeling in the Capim River Basin – State of Pará. Advisor: Dr. Adriano Marlisom Leão de Sousa. 2013. Master's Thesis (Forest Sciences) - Federal Rural University of Amazon, Belém, 2013. Available at: <http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/1887>. Accessed on: Jan. 15, 2024.

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

Pantoja, H.M. Mineralogy, geochemistry, and heavy minerals of the lateritic-bauxite profile with coverage and its relationship with the Itapecuru Group: Pilot mining of Ciríaco (Rondon do Pará). MS Dissertation, Institute of Geosciences, Federal University of Pará, 73p, 2015.

Pinheiro, B.L.S., Moura, C.A.V., Gorayeb, P.S.S. Provenance of metasedimentary rocks from the Araguaia Belt based on Pb-Pb zircon datings and Sm-Nd model ages. *Brazilian Journal of Geosciences*, v. 41 (2), p. 304-318, 2011.

Prata, Tatiana Chagas, Lima, Aline Maria Meiguins de. Environmental vulnerability of the west coast of the Salgado Paraense Region (State of Pará, Northern Brazil). *Brazilian Journal of Environmental Management and Sustainability*, v. 8, n. 20, p. 1315-1332, 2021.

Queiroz, Alan Felipe dos Santos. Mineralogy and geochemistry of lateritic aluminosilicate phosphate deposits from the Bonito-Ourém region, State of Pará. Advisor: Marcondes Lima da

Costa. 2022. 51 f. Master's Thesis (Geoenvironmental Geochemistry and Petrology) - Graduate Program in Geology and Geochemistry. Institute of Geosciences, Federal University of Pará, Belém, 2022. Available at: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/14826>. Accessed on: Jun. 10, 2024.

Reimann C., Filzmoser P., Garrett R.G. 2002. Factor analysis applied to regional Geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, **17**: 185–206.

Reimann C. 2005. Geochemical mapping: technique or art? *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **5**: 359–370. DOI: 10.1144/1467-7873/03-051.

Reimann C. & Caritat P. 2005. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Science of the Total Environment*, **337**: 91–107. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.06.011.

Reimann C. & Caritat P. 2017. Establishing geochemical background variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil. *Science of the Total Environment*, **578**: 633–648. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.010

Reimann C. & Garrett R.G. 2005. Geochemical background - Concept and reality. *Science of the Total Environment*, **350**: 12–27. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.01.047

Reimann, Clemens. Experiences from 30 years of low-density geochemical mapping at the subcontinental to continental scale in Europe. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 22, n. 4, 2022. doi: <https://doi.org/10.1144/geochem2022-030>.

Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R.G., Dutter, R., 2008. Statistical data analysis explained. In: *Applied Environmental Statistics with R*. Wiley, Chichester, p. 362, 978-0-470-98581-6.

Reimann C., Flem B., Gasser D., Eggen O. A., Birke M. 2018b. Background values of gold, potentially toxic elements and emerging high-tech critical elements in surface water collected in a remote northern European environment. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **18**: 185–195. DOI: 10.1144/geochem2017-090.

Reimann C., Fabian K., Birke M., Filzmoser P., Demetriades, A., Négrel P., Oorts K., Matschullat J., Caritat P. de, Albanese S., Anderson M., Baritz R., Batista M. J., Bel-Ian A., Cicchella D., Vivo B., De Vos W., Dinelli E., Ďuriš M., Dusza-Dobek A., Eggen O. A., Eklund M., Ernsten V., Flight D. M. A., Forrester S., Fügedi U., Gilucis A., Gosar M., Gregorauskiene V., Groot W. de, Gulan A., Halamić J., Haslinger E., Hayoz P., Hoogewerff J., Hrvatovic H., Husnjak S., Jähne-Klingberg F., Janik L., Jordan G., Kaminari M., Kirby J., Klos V., Kwećko P., Kuti L., Ladenberger A., Lima A., Locutura J., Lucivjansky P., Mann A., Mackovych D., McLaughlin M., Malyuk B. I., Maquil R., Meuli R. G., Mol G., O'Connor P., Ottesen R. T., Pasniecna A., Petersell V., Pfeleiderer S., Poňavič M., Prazeres C., Radusinović S., Rauch U., Salpeteur I., Scanlon R., Schedl A., Scheib A., Schoeters I., Šeřčik P., Sellersjö E., Slaninka I., Soriano-Disla J. M., Šorša A., Svrkota R., Stafilov T., Tarvainen T., Tendavilov V., Valera P., Verougstraete V., Vidojević D., Zissimos A., Zomeni Z., Sadeghi M. 2018a. Gemas: establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil. *Applied Geochemistry*, **88**: 302–318. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.01.021.

Rose A. W., Hawkes H. E., Webb J. S. 1979. *Geochemistry in mineral exploration*. 2nd ed. London, Academic Press, 657p.

Rossetti D. F. 2001. Architecture of the São Luís-Grajaú Basin, Northeast Brazil. In: Rossetti D. F. & Góes A. M., Truckenbrodt W. (eds.). *The Cretaceous of the São Luís-Grajaú basin*. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi. p.31-46. (Friedrich Katzer Collection).

Rossetti Dilce F. 2006. Miocene sedimentary evolution in the states of Pará and Maranhão. *Geologia USP. Série Científica*, **6** (2): 7-18.

Rossetti D. F. 2004. Paleosurfaces from northeastern Amazonia as a key for reconstructing paleolandscapes and understanding weathering products. *Sedimentary Geology*, **169** (3-4): 151-174.

Rudnick R. L. *et al.* 2003. Composition of the continental crust. *The Crust*, **3** : 1-64.

Sahoo P. *et al.* 2020a. Regional-scale mapping for determining geochemical background values in soils of the Itacaiúnas River Basin, Brazil: The use of compositional data analysis (CoDA). *Geoderma*, **376**: 114504, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114504>.

Sahoo Prafulla Kumar *et al.* 2020b. 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*, **42** (1) : 255-282.

Salomão Gabriel Negreiros. 2018. *Geochemical mapping and background estimation in soils in the Carajás Mineral Province region – East of the Amazon Craton, Brazil*. Advisor: Rômulo Simões Angélica. Master's Dissertation Geology and Geoquímica, Institute of Geosciences, Federal University of Pará, Belém, 2018, 138p. Available at: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/9909>. Accessed on: February 1, 2023.

Salomão Gabriel Negreiros, Figueiredo Marco Aurélio, Dall'Agnol Roberto, Sahoo Prafulla K., Medeiros Filho Carlos A., Costa Marlene F. da, Angélica, Rômulo Simões. 2019. Geochemical background and its application in environmental studies. *Journal of Applied Earth Science*, **92**: 151-162, Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089598111830511X>. Accessed on: September 10, 2024.

Salomão, Gabriel Negreiros. Geochemical mapping of the Itacaiúnas River basin, Carajás Mineral Province: Geochemical signature of crustal blocks and implications for mineral resources and the environment. Advisor: Rômulo Simões Angélica, Co-advisor: Roberto Dall'Agnol. 2020. 233 p. PhD Thesis (Geology and Geoquímica) — Institute of Geosciences, Federal University of Pará, Belém, 2020. Available at: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/13499>. Accessed on: February 15, 2023.

Salomão, Gabriel *et al.* Geochemical mapping in stream sediments of the Carajás Mineral Province, part 2: Multi-element geochemical signatures using Compositional Data Analysis (CoDA). *Journal of South American Earth Sciences*, v. 110, p. 103361, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103361>.

Santos Júnior, A. E. A. and D. F. Rossetti, 2003. Paleoenvironment and stratigraphy of the Ipixuna Formation, Rio Capim area, eastern Cametá Sub-basin. *Revista Brasileira de Geociências* 33(3): 313-324.

Santos, P., Costa, M., Leite, A. The kaolin in the aluminum phosphate deposit of Sapucaia (Bonito-Pará). *Boletim do Museu de Geociências da Amazônia*, v. 6, p. 1–10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.31419/issn.2594-942x.v62019i2a5phcs>.

Schwertmann U. & Pfab G. 1994. Structural vanadium in synthetic goethite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58** (20): 4349-4352. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90338-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90338-7).

State Secretariat for Planning, Budget, and Finance of Pará- SEPLAD. *Presentation of the Rio Capim region*. Available at: [http://seplad.pa.gov.br/ppaonline/regiao/Apresentacao\\_Rio\\_Capim.pdf](http://seplad.pa.gov.br/ppaonline/regiao/Apresentacao_Rio_Capim.pdf). Accessed on: October 10, 2024.

Silva M.C., Costa F.R., Leandro W.M., Lima Junior A.F., Brito G.S., Silva L.R. 2015. Efficiency of using aluminum thermophosphate as a phosphorus source in bean production in incubated soil. *Revista Faculdade Montes Belos (FMB)*, 8 (5): 1-19.

Sousa L. M. *et al.* 2017. Land use and cover evaluation in Paragominas and Ulianópolis-PA, using data from the TerraClass project. *Revista Brasileira de Cartografia*, **69** (3): 421-431.

Truckenbrodt W., Kotschoubey B., Schellmann W. 1991. Composition and origin of the clay cover on north Brazilian laterites. *Geologische Rundschau*, **80**: 591-610.

Vaz P. T., Rezende N. G. A. M., Wanderley Filho J. R., Travassos W. A. 2007. Parnaíba basin. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, **15** (2): 253-263.

Vasquez Marcelo Lacerda & Rosa-Costa Lúcia Travassos da. (org.). 2008. *Geology and mineral resources of the State of Pará*. Belém, CPRM.

Viglio Eduardo Paim *et al.* 2023. National background of bottom sediments obtained in low-density geochemical surveys by SGB-CPRM-2003 to 2017.

Winter J. D. 2001. *An introduction to igneous and metamorphic petrology*. Newmarket, Ontario, Prentice-Hall Inc. p. 1503-1505. Available in Canada from Pearson Education Canada, 195 Harry Walker Parkway North, L3Y 7B4. ISBN 0-13-240342-0.

Yamasoe Márcia A. *et al.* 2000. Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of vegetation fires in the Amazon basin: water-soluble species and trace elements. *Atmospheric Environment*, **34** (10):1641-1653.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento geoquímico por sedimentos de corrente na Bacia Hidrográfica do Rio Capim (BHRC) permitiu não apenas a estimativa do *baseline* geoquímico e a identificação de associações geoquímicas, como também o cálculo de índices ambientais nas principais unidades litoestratigráficas. Esses resultados se configuram como uma ferramenta estratégica para a gestão territorial, especialmente no monitoramento desta bacia hidrográfica que carece de maiores estudos relacionados a distribuição dos elementos químicos, pois, mesmo sendo uma importante região no estado, ainda não possui Comitê de Bacias Hidrográficas. O estudo permitiu verificar a definição de *baseline* geoquímico contribuiu significativamente para a identificação de possíveis anomalias geoquímicas, sejam estas geológicas, biogênicas ou antrópicas. Este trabalho permitiu ainda ratificar o uso do método mMAD como um método mais robusto e conservador, um dos fatos mais importantes é que o uso desta metodologia especialmente em cenários onde a variabilidade dos dados é elevada e há a presença de *outliers*.

Neste estudo os resultados mostram duas tendências principais dos limiares superiores  $TIF > 98^{th} > mMAD$  ou  $TIF > mMAD > 98^{th}$ , corroborando com outros autores que encontraram esses mesmos resultados. Ele oferece uma visão mais precisa do *baseline* geoquímico, por ser menos suscetível a distorções e subjetividades, o que o torna mais confiável em muitos estudos de geoquímica ambiental. Associações geoquímicas como V-Ga-Cr-Al reforçam a influência geológica como principal fator controlador na dispersão dos elementos, dado que esses elementos geralmente ocorrem juntos em terrenos que passaram por intenso processo de intemperismo químico, como no caso da região que passou por dois eventos de intenso intemperismo e lateritização das rochas. Embora as maiores concentrações de Cr e Hg possam ser atribuídos a associação com os óxi-hidróxidos de Ferro, não se pode descartar completamente a possibilidade de contribuições antrópicas pontuais, uma vez que a ação humana nesta bacia hidrográfica ocorre em diferentes tipos de mudanças do uso e cobertura da terra, colaborando com a diminuição das áreas florestadas principalmente por atividades econômicas voltadas para a mineração, pecuária e agricultura.

Além disso, a aplicação dos índices ambientais apresenta algumas limitações, pois o uso dos índices pode colaborar para resultados que tenham perda de detalhes importantes, por conta da tendência de mascarar informações sobre elementos químicos que possuem alto potencial de contaminação. Afinal, como os índices dependem da escolha dos valores de referência, a escolha que pode ser subjetiva, pode comprometer a precisão e veracidade dos resultados, como foi observado nos cálculos para a bacia como um todo em comparação com o uso do valor de

referência pelas unidades litoestratigráficas, no qual resultou em menos microbacias contaminadas. Outra questão é que a análise fica simplificada, tratando todos os elementos de maneira igual, sem levar em conta suas diferentes toxicidades e impactos, e esse é um ponto importante principalmente para o IREP, pois como esse índice leva em consideração fatores de resposta tóxicas que variam de 2 a 30, a inclusão ou exclusão de um metal no cálculo influenciará no resultado. Ademais, os índices como FE e FC, não levam em consideração a especiação química dos elementos ou a mobilidade dos elementos nos sedimentos de corrente. Isso implica que elementos com alta concentração podem não representar riscos significativos se forem inertes ou difíceis de mobilizar, enquanto outros em concentrações menores podem ser extremamente perigosos se forem facilmente biodisponíveis, que é outro ponto a se destacar, pois uma área pode ser indicada como contaminada, pois os índices não indicam a biodisponibilidade daquele elemento. A aplicação dos índices é uma ferramenta interessante, porém deve ser avaliada de modo cauteloso pois pode superestimar ou subestimar áreas como contaminadas, além disso, o seu uso isolado pode não ser suficiente para ações mais eficazes de gestão, sendo indicado o uso conjunto com outras ferramentas. Essa falta de dados pode comprometer a compreensão abrangente das condições de contaminação e a eficácia das políticas de conservação

No item apêndice, encontra-se o material suplementar dessa pesquisa de mestrado (gráficos *box-plot*, mapas geoquímicos, histogramas, curvas de probabilidade e QQPlot).

## REFERÊNCIAS

- Abreu F.A.M. 1979. *Estratigrafia e evolução estrutural do segmento setentrional da Faixa de Dobramentos Paraguai-Araguaia*. MS Dissertation, Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas, Universidade Federal do Pará, Belém, 90p.
- Abreu Francisco de Assis Matos de. 1990. *Evolução geotectônica do pré-cambriano da região meio-norte do Brasil e sua correlação com a África Ocidental*. PhD Theses, Universidade Federal do Pará, Belém, 440p.
- Abreu Daiveson Serrão. 2019. *Mineralogia e geoquímica de perfis lateríticos imaturos em Abel Figueiredo - Rondon do Pará, Amazônia Oriental*. Orientador: Marcondes Lima da Costa. MS Dissertation, Programa de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 112 p. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11839>. Acesso em: 15/03/2024
- Almeida F. F. M. 1984. Província Tocantins - setor sudoeste. In: Almeida F. F. M. & Hasui Y. (ed.). *O pré-cambriano do Brasil*. São Paulo, Blücher, p. 265–280.
- Almeida M. D., Lacerda L. D., Bastos W. R., Herrmann J. C. 2005. Mercury loss from soils following conversion from forest to pasture in Rondônia, Western Amazon, Brazil. *Environmental Pollution*, **137**: 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.02.026>.
- Almeida Stephanie Regina Costa. 2018. *Caracterização do perfil laterítico dos depósitos da província bauxitífera de Paragominas em Rondon do Pará, bloco Sul do Projeto Alumina Rondon*. Orientador: Antônio Emídio de Araújo Santos Júnior. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Geologia, Marabá, 45 p.
- Alloway B. J. 1990. *Heavy metals in soils*. London, Blackie Academic e Professional.
- Amarante Rafael Tarantino. 2021. *Mapeamento geoquímico por sedimentos de corrente na borda do Cráton São Francisco e Cinturão Brasília, Minas Gerais: definição de background geoquímico e aplicação de análise estatística multivariada*. MS Dissertation, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 108 p. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/42625>. Acesso em: 20 set. 2022.
- Aprile F. M. & Bouvy M. 2008. Distribution and enrichment of heavy metals in sediments at the Tapacurá river basin, Northeastern Brazil. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, **12** : 1-8.
- Arcanjo S. H. S. & Moura C. A. V. 2000. Geocronologia das rochas do embasamento do setor meridional do Cinturão Araguaia na região de Paraíso do Tocantins (TO). *Revista Brasileira de Geociências*, **30** : 665-670.
- Barbiero A. & Vettorato D. 2008. When is the pearson coefficient not a suitable tool for examining relationships between variables? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**(4): e6.

- Bilinski S. F. & Sakan S. 2021. Geochemistry of Water and Sediment. *Water*, 13: e693, Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/5/693>. Acesso em: 10 set. 2024.
- Boulangé B. & Carvalho A. 1997. The bauxite of Porto Trombetas. In: Carvalho A. Boulangé B., Melfi A.J., Lucas Y. (eds.). *Brazilian bauxites*. São Paulo, USP/FAPESP/ORSTOM, p. 55-73.
- BRASIL. *Resolução n° 32, de 15 de outubro de 2003*. Institui a Divisão Hidrográfica Nacional. Brasília, DF, D.O.U., Seção 1, 17 dez. 2003, p. 142.
- Caritat P. de & Cooper M. 2016. A continental-scale geochemical atlas for resource exploration and environmental management: the National Geochemical Survey of Australia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **16** (1): 3-13. doi: 10.1144/GEOCHEM2014-322.
- Carreño Luis Manrique J. 2022. Geochemistry applied to the exploration of mineral deposits. In: Saleh Hosam M. & Hassan Amal I. (ed.). *Geoquímica e recursos minerais*. [S.l.], IntechOpen. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/81376>. Acesso em: 10 set. 2024. doi: 10.5772/intechopen.103941.
- Caralinda Inês Filipa Silva. 2022. *Análise de risco para a saúde humana devido à contaminação de solos com metais pesados - caso de estudo*. PhD Theses, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, Universidade de Lisboa, x, 12p.
- Conselho Estadual de Recursos Hídricos-CERH. 2008. *Resolução n° 04, de setembro de 2008*. Disponível em: <http://www.sema.gov.br/imagens/RESOL%20N%C3%82%C2%BA%32004.pdf>. Semas – PA, 2008. Acesso em: 30 jan. 2024.
- Coringa, J. do E. S. *et al.* 2016. Distribuição geoquímica e biodisponibilidade de metais traço em sedimentos no Rio Bento Gomes, Poconé - MT, Brasil. *Acta Amazonica*, **46** (2): 161–174, abr.
- Costa M.L. 1997. Lateritization as a major process of ore deposit formation in the Amazon region. *Exploration Mining Geology*, **6** (1): 79-104.
- Costa J. B. S., Hasui Y., Bemerguy R. I., Soares Junior A. V., Villegas J. M. 2002. Tectonic and paleogeography of the Marajó region, Northern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **74**: 519-531.
- Costa M. L. *et al.* 2004. Morfologia e química mineral da Goethita de Pedra de Ferro de interface areia-argila em sedimentos da Formação Barreiras, Amazônia Oriental. *Geochimica Brasiliensis*, **18** (2): 121-133
- Costa Marcondes Lima, Carmo Mariléia Silva do, Behling Hermann. 2005. Mineralogia e geoquímica de sedimentos lacustres com substrato laterítico na Amazônia brasileira. *Brazilian Journal of Geology*, **35** (2): 165-176.
- Costa M.L., Cruz G.S., Almeida H.D.F., Pöllmann H. 2014. On the geology, mineralogy and geochemistry of the bauxite-bearing regolith in the lower Amazon basin: evidence of genetic relationships. *J. Geochem. Explor.* **146**: 58–74.

Costa M. L., Sousa D. J. L., Angélica R. S. 2009. The contribution of lateritization processes to the formation of the kaolin deposits from eastern Amazon. *Journal of South American Earth Sciences*, **27**(2): 219–234. doi:10.1016/j.jsames.2008.11.008.

Costa M.L., Cruz G.S., Almeida H.D.F., Poellmann H. 2014. On the geology, mineralogy and geochemistry of the bauxite-bearing regolith in the lower Amazon Basin: evidence of genetic relationships. *Journal of Geochemical Exploration*, **146**:58-74.

Costa M.L., Leite A. S., Pöllmann H. 2016. A laterite-hosted APS deposit in the Amazon region, Brazil: The physical-chemical regime and environment of formation. *Journal of Geochemical Exploration*, **170**: 107–124.

Cunha Dorília Ferreira da. 2015. *Fácies e associação de fácies dos depósitos sedimentares da Formação Ipixuna, nos arredores da cidade de Ipixuna do Pará, Sub-Bacia de Cametá, norte do Brasil*. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Marabá, 2015. 39p. Disponível em: <http://repositorio.unifesspa.edu.br/handle/123456789/354>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

Cunha João Augusto, Sousa Debora Carmo, Córdoba Valéria Centurion. 2019. Evolução estratigráfica dos depósitos cretáceos da porção norte da Bacia de São Luís-Grajaú (NE do Brasil). *Geologia USP. Série Científica*, **19** (2): 151-170.

Dantas M. E. & Teixeira S. G. 2013. Origem das paisagens. In: João X. S. J., Teixeira S. G., Fonseca D. D. F. *Geodiversidade do estado do Pará*. Belém, CPRM, p. 23-51.

Darnley A. & Garrett R.G. (eds.). 1990. International geochemical mapping – IGCP Project 259. *Journal of Geochemical Exploration*, **39**(1/2): 1-13. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90066-J](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90066-J).

Darnley A. G., Björklund A., Bölviken B., Gustavsson N., Koval P. V., Plant J. A., Steenfelt A., Tauchid M., Xuejing X. 1996. *A Global geochemical database: for environmental and resource management*. 2. ed. Paris, UNESCO Publishing, 122 p. (Recommendations for international geochemical mapping. Final report of IGCP Project 259). (Earth Sciences 19).

Darnley A. G. 1997. A global geochemical reference network: the foundation for Geochemical baselines. *Journal of Geochemical Exploration*, **60**: 1–5. DOI: 10.1016/S0375-6742(97)00020-4.

Delazeri Linda Mendes. 2016. Determinantes do desmatamento nos municípios do Arco Verde–Amazônia Legal: uma abordagem econométrica. *Revista Economia Ensaios*, **30** (2): 11-34.

Demetriádes A., Birke M., Albanese S., Schoeters I., Vivo B. 2015. Continental, regional and local scale geochemical mapping. *Journal of Geochemical Exploration*, **154**: 1–5. DOI: 10.1016/j.gexplo.2015.02.011

Demetriádes A., Smith D., Wang X. 2018. General concepts of geochemical mapping at global, regional, and local scales for mineral exploration and environmental purposes. *Geochimica brasiliensis*, **32**: 136-179,

Dias Gustavo Francesco de Moraes. 2018. *As mudanças no uso e cobertura da terra e o comportamento hidrológico da bacia do rio Capim*. MS Dissertation, Ciências Ambientais, Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Museu Paraense Emílio Goeldi, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Belém, 2018. 93p. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/10760>.

Di Gregorio Antonio, Jansen Louisa J.M. 1998. *Land cover classification system (LCCS): classification concepts and user manual*. Rome, FAO.

Esteves F. A. 1998. *Fundamentos de limnologia*. Rio de Janeiro, FINEP.

Fagundes H. O., Fleischmann A. S., Fan F. M., Paiva R. C. D., Buarque D. C., Siqueira V. A., Collischonn W., Borrelli P. 2023. Human-induced changes in South American river sediment fluxes from 1984 to 2019. *Water Resources Research*, **59**: e2023WR034519. <https://doi.org/10.1029/2023WR034519>.

Faure G. 1998. *Principles and applications of geochemistry*. EUA, Prentice Hall, 600 p.

Ferreira A., Inácio M. M., Morgado P., Batista M. J., Ferreira L., Pereira V., Pinto M. S. 2001. Low-density geochemical mapping in Portugal. *Applied Geochemistry* **16**: 1323–1331.

Forstner U. 2020. Inorganic sediment chemistry and elemental speciation. In: Baudo Renato. *Sediments*. [S.l.], CRC Press, cap. 3.

Francisco E.A.B. 2006. *Fosfatos aluminosos do grupo da crandallita como fonte alternativa de fósforo para a cultura do arroz*. PhD Theses, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 145 p.

Galuszka A. 2007a. A review of geochemical background concepts and an example using data from Poland. *Environmental Geology*, **52** : 861-870.

Gałuszka A. 2007b. Different approaches in using and understanding the term "geochemical background"-practical implications for environmental studies. *Polish Journal of Environmental Studies*, **16** (3): 389-395.

Gałuszka A. & Migaszewski Z. M. 2012. Geochemical background – an environmental perspective. *Minerals*, **42** (1): 7-17.

Gomes D. J. C., Lima A. M. M., Serrão E. A. O., Rodrigues H. J. B. 2021. Suscetibilidade à erosão hídrica do solo: bacia hidrográfica do rio Capim (MA-PA). *Ciência e Natura*, Santa Maria, **43**: e55[1-20]. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X43123>.

Gomes D. J. C., Lima A. M. M., Silva Junior J. A., Serrão E. A. O. 2018. Impactos das mudanças de uso da terra e dos eventos climáticos extremos em sistemas hidrológicos da Amazônia Oriental - Bacia do rio Capim (PA-MA). *Revista Geográfica Acadêmica*, **12** (2): 153-172.

Gomes Emerson Batista. 2023. *Modelagem matemática do transporte da soja do polo Paragominas – PA: um estudo da viabilidade logística da Hidrovia Guamá-Capim*. Orientadora: Rita de Cassia Monteiro de Moraes. Trabalho de Conclusão de Curso,

Bacharelado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2023. 77p. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/handle/prefix/6252>. Acesso em: 01/09/2024

Gorayeb P. S. S. 1989. Corpos serpentínicos da Faixa Araguaia na região de Araguacema, Pequizeiro e Conceição do Araguaia (Goiás-Pará). *Revista Brasileira de Geociências*, **19**: 51-62.

Gorayeb P. S. S., Moura C. A. V., Barros G. R. 2000. Pb-Pb zircon ages of the Porto Nacional high-grade metamorphic terrain, northern portion of the Goiás Massif, central-Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**: 215-224.

Gorayeb P. S. S., Moura C. A. V., Abreu F. A. M. 2008. Geologia do Parque Estadual da Serra dos Martírios-Andorinhas e região adjacente. In: Gorayeb P. S. S. (org.). *Parque Martírios-Andorinhas: conhecimento, história e preservação*. Belém, UDUFPA. p. 53-75.

Gorayeb P. S. S. & Moura C. A. V. 2008. Investigation of magmatic events in the Tocantins Province - Northern Brazil using Sm-Nd TDM ages and Pb-evaporation zircon ages of granitic rocks. In: INGEIS/CIG, 6º South American Symposium on Isotope Geology, *Book of Abstracts*, 1 CD-Rom.

Gorayeb, P. S. S., Santos, W. P., Moura, C. A. V., Sousa, L. H. Petrologia, geoquímica e geocronologia dos granitos Presidente Kennedy e Barrolândia: contextualização na evolução do Cinturão Araguaia. *Geologia USP. Série Científica*, v. 19, p. 89-116, 2019.

Gorayeb, P.S.S., Cordani, U.G., Silva Neto, J.J.A., Sato, K., Maurer, V.C. 2020. U-Pb Shrimp Zircon Ages of Ediacaran-Cambrian Granitic Bodies in Central Brazil: Implications For The Tectonic Evolution of The Araguaia Belt. *Journal of South America Earth Science*, Tribute to Márcio Martins Pimentel.

Grunsky, E. C. The interpretation of geochemical survey data. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 10, n. 1, p. 27-74, 2010.

Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. *Water Research*, **14**(8): 975–1001, DOI:[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).

Habib, K., Hansdóttir, S. T., Habib, H. 2020. Corrigendum: "Critical metals for electromobility: Global demand scenarios for passenger vehicles, 2015–2050". *Resources, Conservation and Recycling*, 160: 104932. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104932>.

Hasui, Y., Hennies, W. T., Iwanuch, W. Idades potássio-argônio do Pré-Cambriano da região Centro Norte do Brasil. *Boletim do Instituto de Geociências - USP*, v. 6, p. 77-83, 1975.

Hasui, Y., Abreu, F. A. M., Rangel, J. M. R. Estratigrafia da Faixa de Dobramentos Paraguai-Araguaia no centro-norte do Brasil. *Boletim do Instituto de Geociências - USP*, v. 8, p. 107-118, 1977.

Hawkes H. E. & Webb J. S. 1962. *Geochemistry in mineral exploration*. New York, Harper e Row, 415p.

- Ho H. H., Swennen R., Cappuyns V., Vassileiva E., Tran T. V. 2012. Necessity of normalization to aluminum to assess the contamination by heavy metals and arsenic in sediments near Haiphong Harbor, Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, **56**: 229-239.
- Hosseini-Dinani H., Mokhtari A. R., Shahrestani S., Vivo B. 2019. Sampling Density in Regional Exploration and Environmental Geochemical Studies: A Review. *Natural Resources Research*, **28**: 967–994. DOI: 10.1007/s11053-018-9431-2
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2003. *Base cartográfica integrada digital do Brasil ao Milionésimo - 1:1.000.000 - limite das regiões hidrográficas - Divisão Hidrográfica Nacional*.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2004. *Mapa de vegetação do Brasil*. Rio de Janeiro. 1 mapa, color., escala 1:5.000.000
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2009. *Manual técnico de geomorfologia*. Rio de Janeiro.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2012. *Manual técnico de vegetação*. Rio de Janeiro.
- Johnson C.C. & Demetriadés A. 2011. Urban geochemical mapping: a review of case studies in this volume. In: Johnson C.C., Demetriadés A., Locutura J., Ottesen R.T. (eds.). *Mapping the chemical environment of urban areas*. Chichester, John Wiley e Sons Ltd., p. 17-36.
- Kabata-Pendias A. & Pendias H. 2001. *Trace elements in soils and plants*. 3rd ed. Boca Raton, CRC Press, 403 p.
- Karbassi A., Bidhendi G., Pejman A., Bidhendi M. E. 2010. Environmental impacts of desalination on the ecology of Lake Urmia. *Journal of Great Lakes Research*, **36**: 419-424.
- Kotschoubey B. & Truckenbrodt W. 1981. Evolução poligenética das bauxitas do distrito de Paragominas-Açailândia (Estados do Pará e Maranhão). *Revista Brasileira de Geociências*, **11**(3): 193-202.
- Kotschoubey B., Truckenbrodt W., Hieronymus B. 1996. Depósitos de caulim e argila semi-flint no nordeste do Estado do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **26**(2):71–80.
- Kotschoubey B., Truckenbrodt W., Hieronymus B. 1997. Bauxite deposits of Paragominas. In: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas Y. (eds.) *Brazilian bauxites*. São Paulo, USP/FAPESP/ORSTOM, p. 75-106.
- Kotschoubey B., Calaf J.M.C., Lobato A.C.C., Leite A.S., Azevedo C.H.D. 2005. Caracterização e gênese dos depósitos de bauxita da Província Bauxitífera de Paragominas, Nordeste da Bacia do Grajaú, Nordeste do Pará, Oeste do Maranhão. In: Marini O.J., Queiroz E.T., Ramos B.W. (eds.). *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília, CT-MINERAL/FINEP/ADIMB, p. 691-782.
- Kuusisto-Hjort P. & Hjort J. 2013. Land use impacts on trace metal concentrations of suburban stream sediments in the Helsinki region, Finland. *Science of the Total Environment* **456–457**: 222–230.

Laha Fisnik, Gashi Fatbardh, Musliu Arber. 2024. Chemical assessment and spatial distribution of selected elements in aquatic sediments in the region of peja (kosovo). *Environment Protection Engineering*, **50** (1): DOI: 10.37190/epe240108.

Landim P. M. B., Mello C. S. B., Serra, A. C. S., Macedo A. B. 2007. Metodologia estatística multivariada em geoquímica. In: Licht O. A. B., Mello C. S. B., Silva C. R. (eds.). *Prospecção geoquímica: depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás*. Rio de Janeiro, SBGq/CPRM, Cap. 20, p. 619-660.

Lapworth, D. J. *et al.* 2012. Geochemical mapping using stream sediments in west-central Nigeria: implications for environmental studies and mineral exploration in West Africa. *Applied Geochemistry*, **27** (6): 1035-1052.

Larizzatti João Henrique, Marques Eduardo Duarte, Silveira Francisco Valdir. 2018. Geochemical mapping of Iron Quadrangle region by active stream sediments, State of Minas Gerais, Brazil. *Geochimica Brasiliensis*, **32** (2): 103-115.

Liang Y. C. *et al.* 2020. Amplified seasonal cycle in hydroclimate over the Amazon river basin and its plume region. *Nature Communications*, **11**: 4390. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18187-0>.

Licht O.A.B. 1998. *Prospecção geoquímica: princípios técnicas e métodos*. Rio de Janeiro, CPRM, 216 p.

Licht O. A. B. 2001. *Geoquímica multielementar na gestão ambiental. Identificação e caracterização de províncias geoquímicas naturais, alterações antrópicas das paisagens, áreas favoráveis à prospecção mineral e regiões de risco no Estado do Paraná, Brasil*. PhD Theses, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001, 209 p.

Licht Otavio Boni. 2020. Geochemical background - what a complex meaning has such a simple expression!. *Geochimica Brasiliensis*, [S. l.], **34** (2): 161–175, DOI: 10.21715/GB2358-2812.2020342161. Disponível em: <https://geobrasiliensis.org.br/geobrasiliensis/article/view/668>. Acesso em: 11 sep. 2024.

Lima Aline Maria Meiguins de & Ponte Marcos Ximenes. 2012. Dinâmica da paisagem da bacia do rio Capim-Pa (The Capim-Pa River Basin Landscape Dynamics). *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S. l.], **5** (1): 127–142, DOI: 10.26848/rbgf.v5i1.232779. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/232779>. Acesso em: 18 mar. 2024.

Lima Aline Maria Meiguins de *et al.* 2021. Hydro-agricultural areas of the capim river watershed, eastern amazon, brazil. *Geosaberes*, Fortaleza, **12**: 1 - 22, jan. ISSN 2178-0463. Available at: <http://www.geosaberes.ufc.br/geosaberes/article/view/989>. Date accessed: 18 mar. 2024. doi: <https://doi.org/10.26895/geosaberes.v12i0.989>.

Lipp Alex G., Caritat Patrice, Roberts Gareth G. 2023. Geochemical background—an environmental perspective. *Journal of Geochemical Exploration*, **248**: e 107174, maio. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674223000213>. Acesso em: 10 set. 2024.

- Lipp Alex G. *et al.* 2020. River sediment geochemistry as a conservative mixture of source regions: Observations and predictions from the Cairngorms, UK. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **125** (12): e2020JF005700.
- Loureiro D., Fernandez M. F., Araújo C., Lacerda L. D. 2012. Distribuição dos metais pesados em sedimentos da Lagoa Rodrigo de Freitas. *Oecologia Australis*, **16**: 353-364.
- Lucas Y. 1997. The bauxite of Juruti. *In*: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas Y. (eds.). *Brazilian bauxites*. São Paulo, USP/FAPESP/ORSTOM, p. 107-133.
- Marques Eduardo Duarte *et al.* 2023. Geochemical mapping by stream sediments of the NW portion of Quadrilátero Ferrífero, Brazil: application of the exploratory data analysis (EDA) and a proposal for generation of new gold targets in Pitangui gold district. *Journal of Geochemical Exploration*, **250**: e 107232.
- Matschullat J., Ottenstein R., Reimann C. 2000a. Geochemical background - can we calculate it? *Environmental Geology*, **39**: 990-1000.
- Mortatti J., Hissler C., Probst J.-L. 2010. Distribuição de metais pesados nos sedimentos de fundo ao longo da bacia do rio Tietê. *Geologia USP, Série Científica*, São Paulo, **10** (2): 3-11, jul.
- Nascimento Marivaldo dos Santos & Góes Ana Maria. 2007. Petrografia de arenitos e minerais pesados de depósitos cretáceos (Grupo Itapecuru), Bacia de São Luís-Grajaú, norte do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, **37**(1): DOI: 10.25249/0375-7536.20073715063
- Oliveira S.B., Costa M.L., Prazeres Filho H. 2016. The lateritic bauxite deposit of Rondon do Pará: a new giant deposit in the Amazon Region, Northern Brazil. *Economic Geology*, **111**: 1-14.
- Owens P. N., Walling D. E., Carton J., Meharg A. A., Wright J., Leeks G. J. L. 2001. Downstream changes in the transport and storage of sediment-associated contaminants (P, Cr and PCBs) in agricultural and industrialized drainage basins. *Science of The Total Environment*, **266** (1-3): 177-186.
- Pantoja H.M. 2015. *Mineralogia, geoquímica e minerais pesados do perfil lateritobauxítico com cobertura e sua relação com o Grupo Itapecuru: lavra piloto Ciríaco (Rondon do Pará)*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 73p.
- Pereira Thaís Nascimento. 2022. *Mercúrio e arsênio no rio Xingu em áreas sob a influência da Usina Hidrelétrica Belo Monte (Amazônia)*. Orientador: Profa. Dra. Tatiana da Silva Pereira Coorientador: Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Lima. PhD Theses, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Altamira, Altamira/Pa, 2022, 74p.
- Pinheiro B.L.S., Moura C.A.V., Gorayeb P.S.S. 2011. Proveniência das rochas metassedimentares do Faixa Araguaia com base em datações Pb-Pb em zircão e isótopos-modelo Sm-Nd. *Revista Brasileira de Geociências*, 41 (2): 304-318

Plant J., Smith D., Smith B., Williams L. 2001. Environmental geochemistry at the global scale. *Applied Geochemistry* **16**: 1291–1308.

Prata Tatiana Chagas & Lima Aline Maria Meiguins de. 2021. Vulnerabilidade ambiental da costa oeste da Região Salgado Paraense (Estado do Pará, Norte do Brasil). *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, **8** (20): 1315-1332.

Quaresma Leandro Silva *et al.* 2022. Source apportionment of chemical elements and their geochemical baseline values in surface water of the Parauapebas river basin, southeast Amazon, Brazil. *Minerals*, **12** (12): e1579.

Queiroz Alan Felipe dos Santos. 2022. *Mineralogia e geoquímica dos depósitos de fosfatos aluminosos lateríticos da região Bonito-Ourém, no Estado do Pará*. Orientador: Marcondes Lima da Costa. MS Dissertação, Geoquímica e Petrologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022. 51p. Disponível em:<http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/14826>. Acesso em: 10 de jun. 2024.

Reimann C., Filzmoser P., Garrett R.G. 2002. Factor analysis applied to regional Geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, **17**: 185–206.

Reimann C. 2005. Geochemical mapping: Technique or art? *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **5**: 359–370. DOI: 10.1144/1467-7873/03-051.

Reimann C. & Caritat P. 2005. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Science of the Total Environment*, **337**: 91–107. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.06.011.

Reimann C. & Caritat P. 2017. Establishing geochemical background variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil. *Science of the Total Environment*, **578**: 633–648. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.010

Reimann C. & Garrett R.G. 2005. Geochemical background - concept and reality. *Science of the Total Environment*, **350**: 12–27. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.01.047

Reimann Clemens. 2022. Experiences from 30 years of low-density geochemical mapping at the subcontinental to continental scale in Europe. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **22** (4). doi: <https://doi.org/10.1144/geochem2022-030>.

Reimann C., Filzmoser P., Garrett R.G., Dutter R. 2008. *Statistical data analysis explained: applied environmental statistics with R*. Chichester, Wiley, 362p. 978-0-470-98581-6.

Reimann C., Flem B., Gasser D., Eggen O. A., Birke M. 2018. Background values of gold, potentially toxic elements and emerging high-tech critical elements in surface water collected in a remote northern European environment. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **18**: 185–195. DOI: 10.1144/geochem2017-090

Rodrigues A.S de Lima & Nalini Jr. H.A. 2009. Valores de background geoquímico e suas implicações em estudos ambientais. *REM: Revista da Escola de Minas*, **62** (2): 155- 165.

Rose A.W., Hawkes H.E., Webb J.S. 1979. *Geochemistry in mineral exploration*. 2. ed. London, Academic Press, 657p.

Rossetti D. F. 2001. Arquitetura deposicional da Bacia de São Luís-Grajaú, Meio-Norte do Brasil. In: Rossetti D. F., Góes A. M., Truckenbrodt W. (eds.). *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi p. 31-46. (Coleção Friedrich Katzer).

Rossetti Dilce F. 2006. Evolução sedimentar miocênica nos estados do Pará e Maranhão. *Geologia USP. Série Científica*, **6** (2): 7-18.

Rossetti D.F. 2004. Paleosurfaces from northeastern Amazonia as a key for reconstructing paleolandscapes and understanding weathering products. *Sedimentary Geology*, **169** (3-4): 151-174.

Rudnick R.L. & Gao S. 2003. A composição da crosta continental. In: Holland H.D. & Turekian K.K. (ed.). *Tratado de geoquímica*. Oxford, Elsevier-Pergamon, v.3, 1-64.

Sahoo P. *et al.* 2020a. Regional-scale mapping for determining geochemical background values in soils of the Itacaiúnas river basin, Brazil: the use of compositional data analysis (CoDA). *Geoderma*, **376**: e114504. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114504>.

Sahoo Prafulla Kumar *et al.* 2020b. 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*, **42** (1): 255-282.

Sales G., Pereira J. L., Thalês M., Pocard-Chapuis R., Almeida A. 2019. Emprego dos focos de calor na avaliação das queimadas e em incêndios florestais em Paragominas, Pará, Brasil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais*, **14**(1): 55-77. <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v14i1.140>.

Salomão Gabriel Negreiros. 2018. *Mapeamento geoquímico e estimativa de background em solos na região da Província Mineral de Carajás – Leste do Cráton Amazônico, Brasil*. Orientador: Rômulo Simões Angélica. MS Dissertation, Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018. 138 p. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/9909>. Acesso em: 01 de fev 2023.

Salomão Gabriel Negreiros, Figueiredo Marco Aurélio, Dall'Agnol Roberto, Sahoo Prafulla K., Medeiros Filho Carlos A., Costa Marlene F. da, Angélica Rômulo Simões. 2019. Geochemical background and its application in environmental studies. *Journal of Applied Earth Science*, **92**:151-162. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089598111830511X>. Acesso em: 10 set. 2024.

Salomão Gabriel Negreiros. 2020. *Mapeamento geoquímico da bacia do rio Itacaiúnas, Província Mineral de Carajás: assinatura geoquímica dos blocos crustais e implicações para recursos minerais e meio ambiente*. Orientador: Rômulo Simões Angélica, Coorientador: Roberto Dall'Agnol. PhD Theses, Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020. 233 p. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/13499>. Acesso em: 15 fev. 2023.

Salomão Gabriel *et al.* 2021. Geochemical mapping in stream sediments of the Carajás Mineral Province, part 2: Multi-element geochemical signatures using Compositional Data Analysis (CoDA). *Journal of South American Earth Sciences*, **110**: e103361. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103361>.

Salomons W. & Forstner U. 1984. Sediments and the transport of metals. *In*: Förstner U. & Salomons W. (orgs.). *Metals in the hydrocycle*. Berlin, Springer. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-69325-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-69325-0_3). Acesso em: 15 fev. 2023.

Santos Júnior A. E. A. & Rossetti D. F. 2003. Paleoambiente e estratigrafia da Formação Ipixuna, área do Rio Capim, leste da Sub- Bacia de Cameté. *Revista Brasileira de Geociências* **33**(3): 313-324.

Santos P., Costa M., Leite A. 2019. O caulim no depósito de fosfatos de alumínio de Sapucaia (Bonito-Pará). *Boletim do Museu de Geociências da Amazônia*, **6**: 1–10. DOI: <https://doi.org/10.31419/issn.2594-942x.v62019i2a5phcs>.

Santos Filho F. M., Lino A. S., Malm O., Ignácio A. 2016. Mercúrio, cromo, cádmio e chumbo em *Pygocentrus nattereri* Kner, 1858 e *Prochilodus lineatus* (Valenciennes, 1836) de dois rios do Pantanal (MT), Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais [Online]*, **42**: 67-81.

Schwertmann U. & Pfab G. 1994. Structural vanadium in synthetic goethite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58** (20): 4349-4352. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90338-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90338-7).

Selinus O.S. & Esbensen K. 1995. Separating anthropogenic from natural anomalies in environmental geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, **55**: 55-66.

Secretaria de Estado de Planejamento, Orçamento e Finanças do Pará - SEPLAD. *Apresentação da região do rio Capim*. Disponível em: [http://seplad.pa.gov.br/ppaonline/regiao/Apresentacao\\_Rio\\_Capim.pdf](http://seplad.pa.gov.br/ppaonline/regiao/Apresentacao_Rio_Capim.pdf). Acesso em: 10 out. 2024.

Serviço Geológico do Brasil – SGB. 2023. *Programa Levantamento Geoquímico de Baixa Densidade e de Apoio aos Levantamentos da Geodiversidade*. Brasília, DF, SGB. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/produtos-geoquimica-ambiental>. Acesso em: 10 dezembro. 2024.

Serviço Geológico do Brasil-CPRM. 2010. *Relatório da administração 2009*. Rio de Janeiro, CPRM, 219 p.

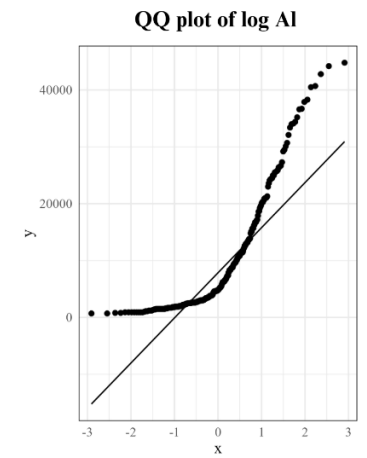
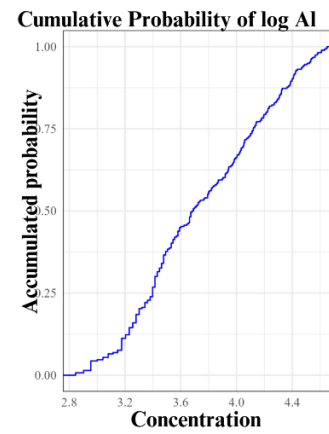
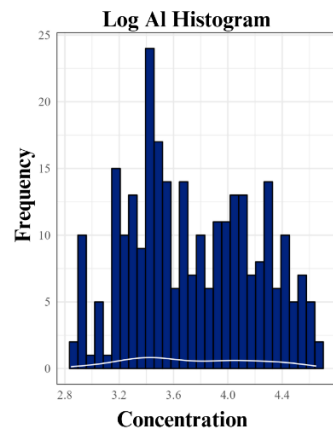
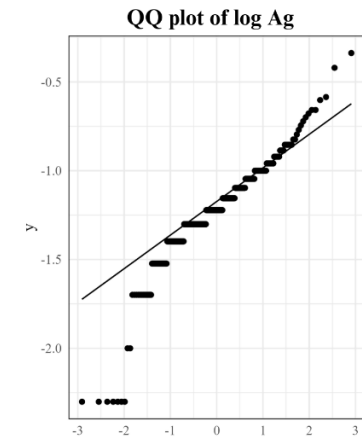
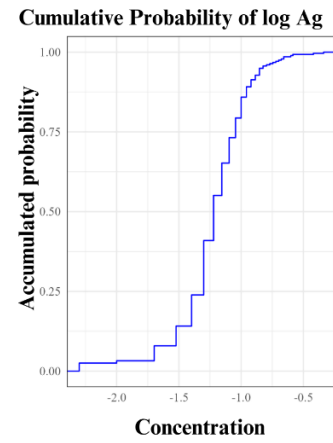
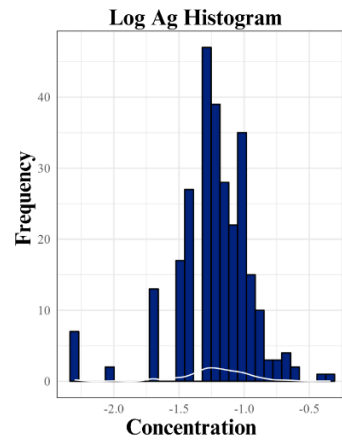
Serviço Geológico do Brasil - CPRM. 2020. *Serviço Geológico do Brasil - CPRM e os ODS, Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: levantamentos geoquímicos*. Rio de Janeiro.

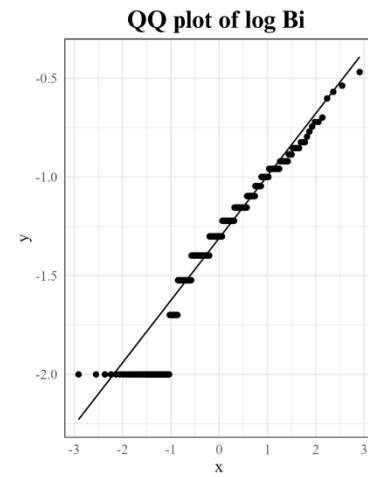
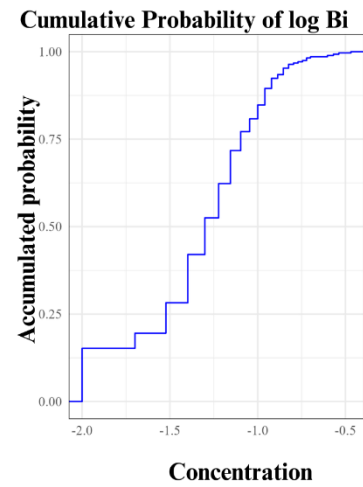
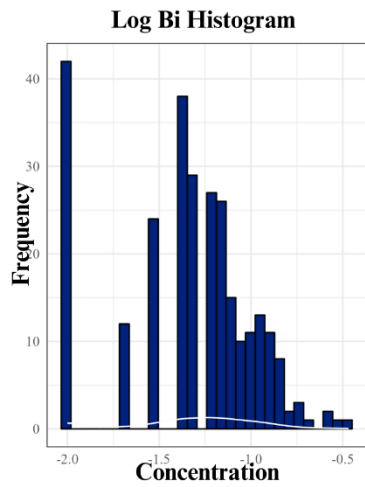
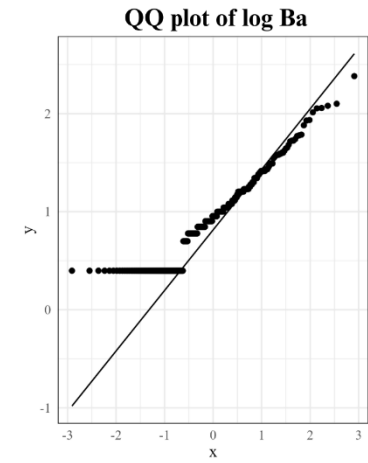
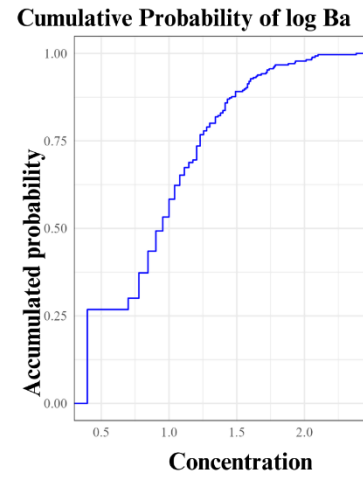
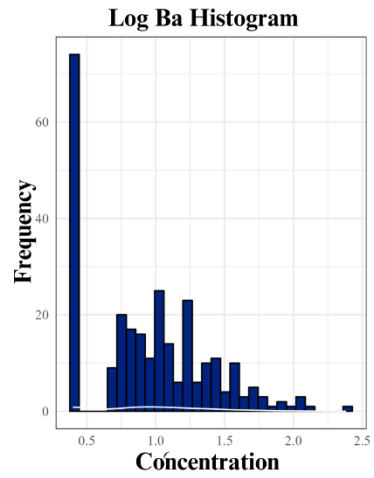
Shahrestani Shahed, Mokhtari Ahmad Reza, Izadi Mojtaba. 2024. Enhancing geochemical background estimation using rock weathering. *Ore Geology Reviews*, **169**: e 106063.

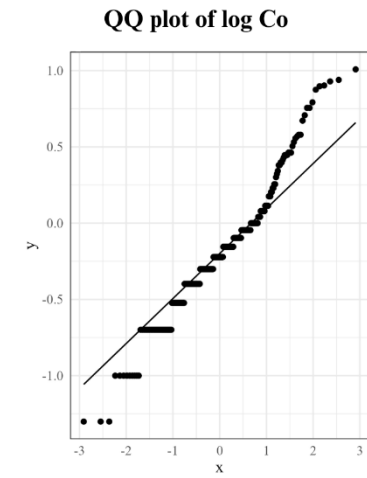
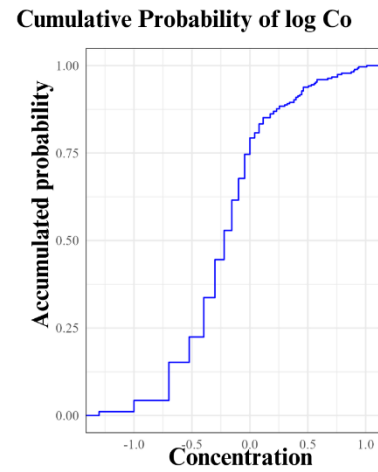
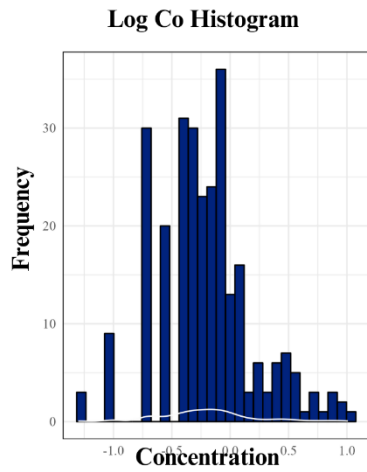
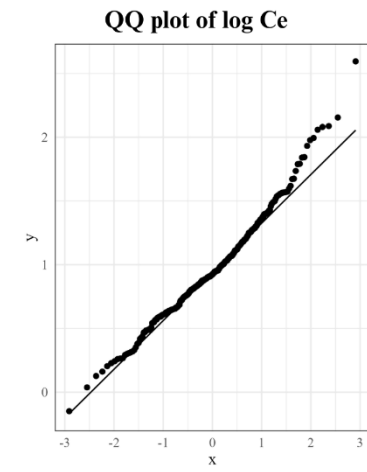
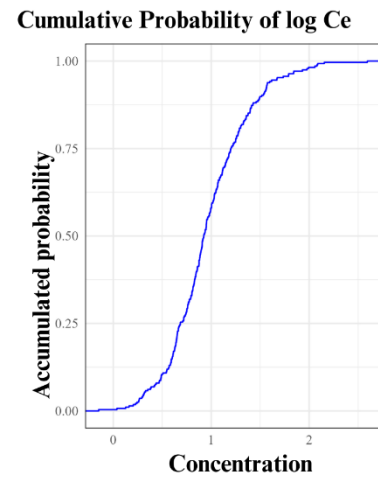
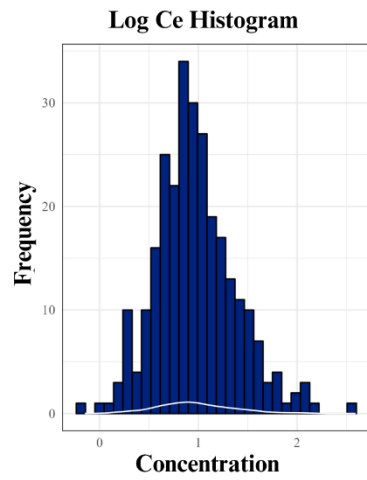
Silva M.C., Costa F.R., Leandro W.M., Lima Junior A.F., Brito G.S., Silva L.R. 2015. Eficiência de uso de termofosfato de alumínio como fonte de fósforo na produção de feijão, em solo incubado. *Revista Faculdade Montes Belos (FMB)*, **8** (5): 1-19.

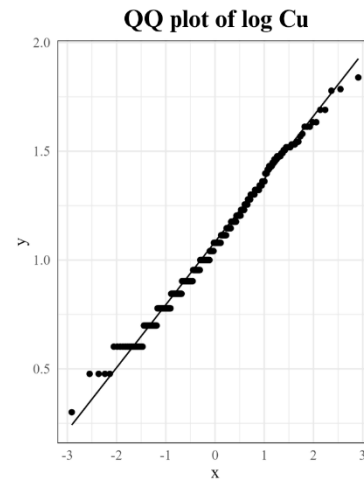
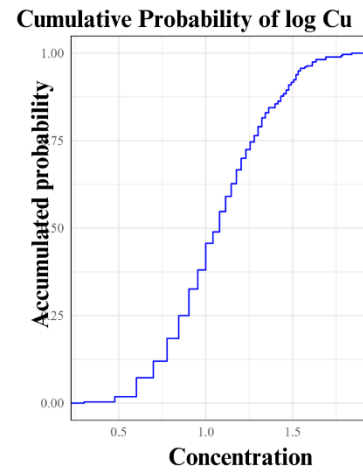
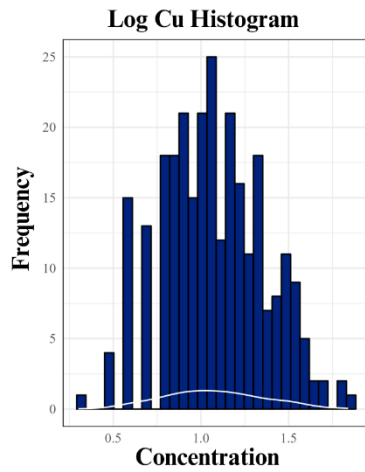
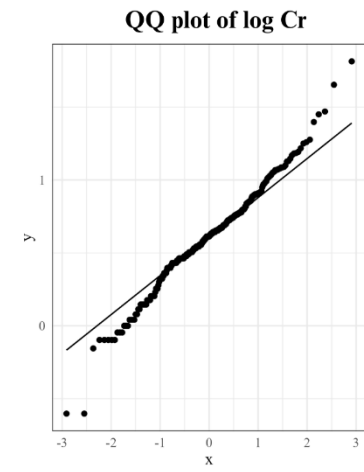
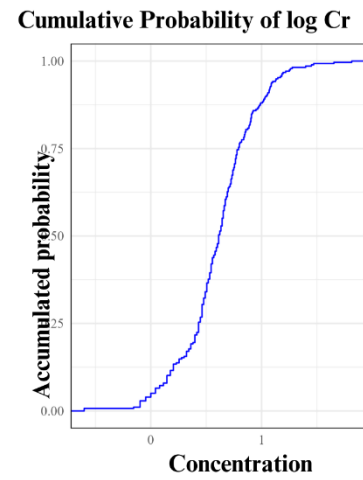
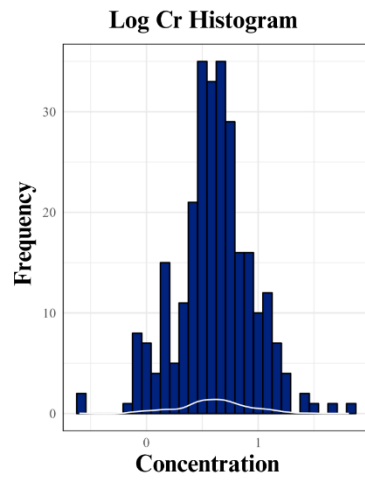
- Smith David B. *et al.* 2018. The history, progress, and future of global-scale geochemical mapping. *Geochimica Brasiliensis*, **32** (2): 115-135.
- Souza-Filho Pedro W. M. *et al.* 2022. Methodological approach and general guidelines to geochemical mapping and background-baseline analysis for environmental assessment: a case study in the Carajás Mineral Province, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, **52**(4). Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2317-488920220220018>.
- Tomlinson D.L, Wilson J.G., Harris C.R., Jeffrey D.W. 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresun.*, **33**: 566-575.
- Torma A. E. & Jiang H. 1991. Extraction processes for Gallium and Germanium. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, **7** (3-4): 235-258. DOI: 10.1080/08827509108952673.
- Trevizani T. H., Domit C., Santos M. C. de O., Figueira R. C. L. 2023. Bioaccumulation of heavy metals in estuaries in the Southwest Atlantic Ocean. *Environmental Science and Pollution Research*, **30** (10): 26703-26717. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23974-x>.
- Truckenbrodt W., Kotschoubey B., Schellmann W. 1991 Composition and origin of the clay cover on north Brazilian laterites. *Geologische Rundschau*, **80**: 591- 610.
- Vaz P. T., Rezende N. G. A. M., Wanderley Filho J. R., Travassos W. A. 2007. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, **15** (2): 253-263,
- Vasquez Marcelo Lacerd & Rosa-Costa Lúcia Travassos da. (org.). 2008. *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará*. Belém, CPRM.
- Viglio E. P. & Cunha F. G. da. 2018. *Atlas geoquímico da bacia do rio São Francisco*. Minas Gerais, Belo Horizonte, CPRM.
- Viglio Eduardo Paim *et al.* 2023. Background nacional de sedimento de fundo obtido nos levantamentos geoquímicos de baixa densidade do SGB-CPRM-2003 a 2017. *Informe Técnico-Científico de Prevenção de Desastres e Ordenamento Territorial*, **4**(1): 8-45, mar.
- Watari T., Nansai K., Nakajima K. 2021. Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, **164**: 105107. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105107>.
- Winter J. D. 2001. *An introduction to igneous and metamorphic petrology*. [S.l.], Prentice-Hall Inc., p. 1503-1505. Disponível no Canadá pela Pearson Education Canada, 195 Harry Walker Parkway North, Newmarket, Ontario L3Y 7B4. ISBN 0-13-240342-0.
- Yamasoe Márcia A. *et al.* 2000. Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of vegetation fires in the Amazon basin: water-soluble species and trace elements. *Atmospheric Environment*, **34** (10): 1641-1653.
- Xie X. & Yin B. 1993. Geochemical patterns from local to global. *Journal of Geochemical Exploration*, **47**: 109-129. DOI: 10.1016/0375-6742(93)90061-P.

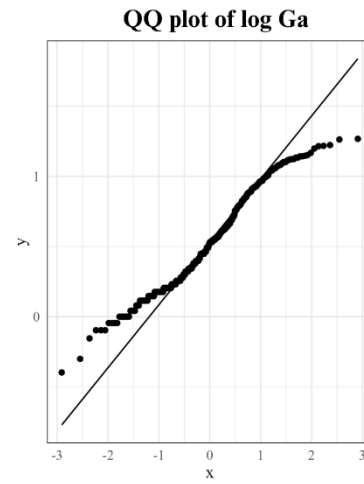
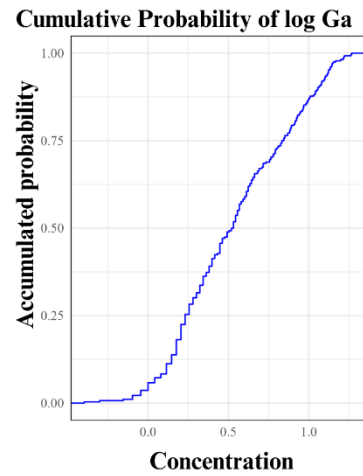
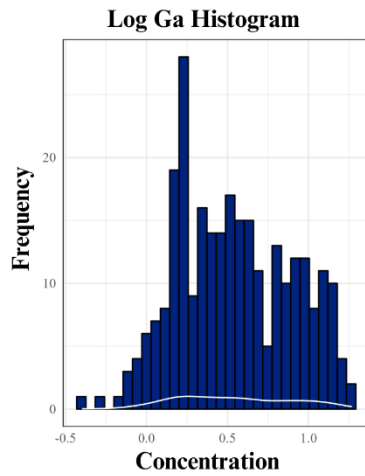
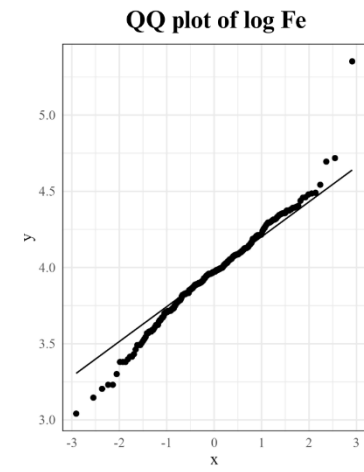
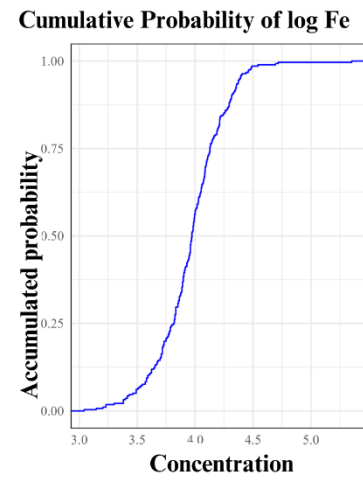
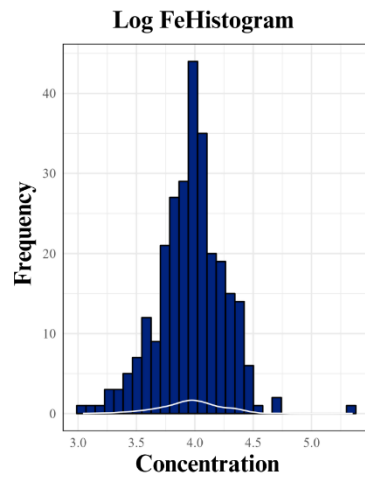
## APÊNDICE A – HISTOGRAMAS, CURVAS DE PROBALIDADE E QQPLOT

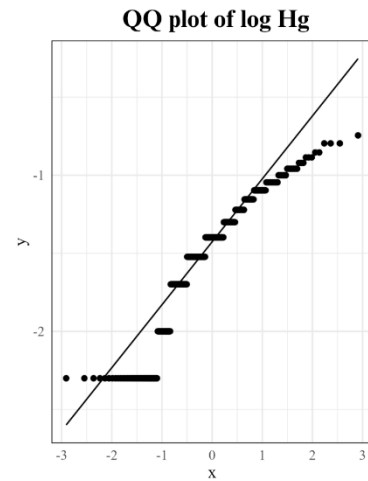
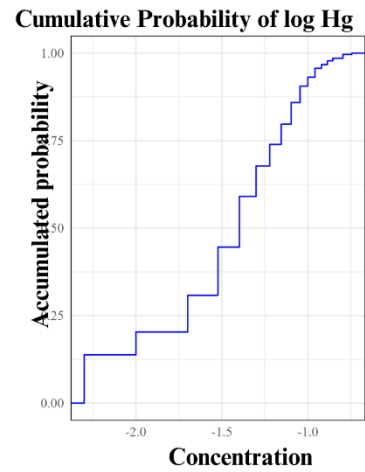
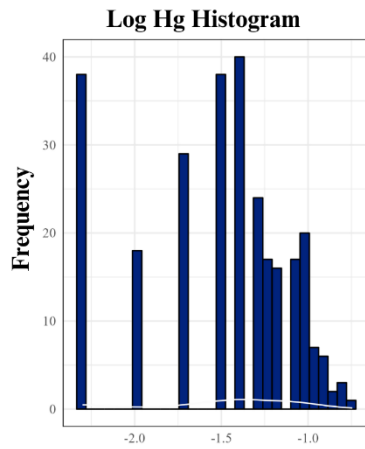
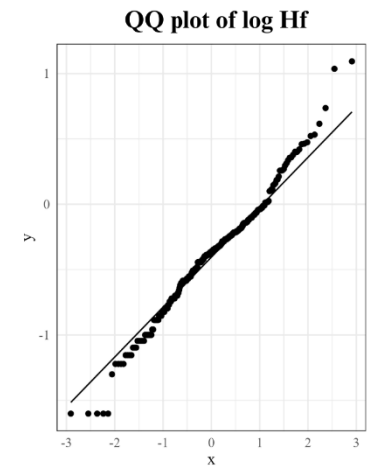
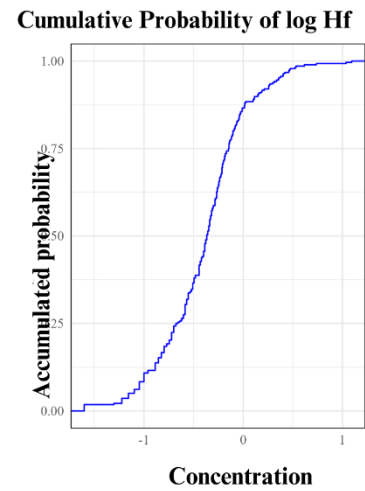
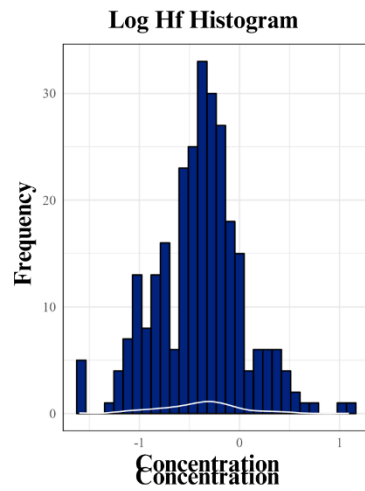


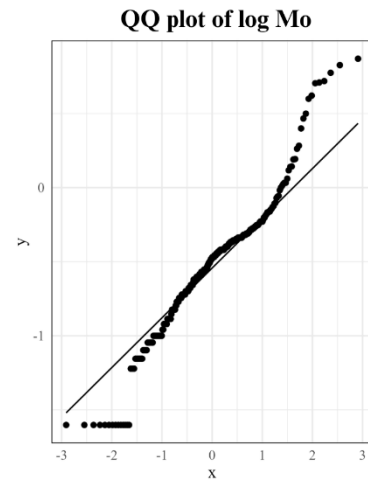
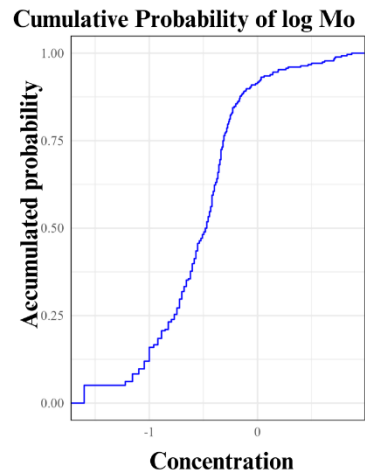
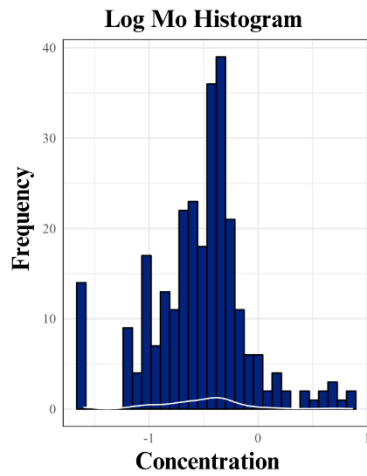
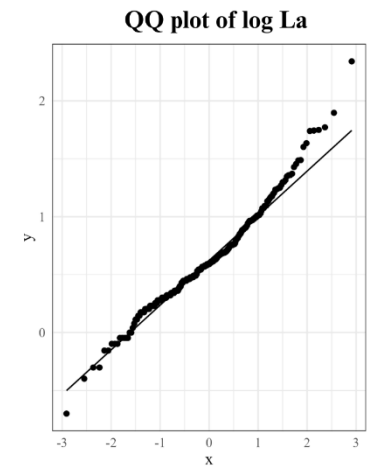
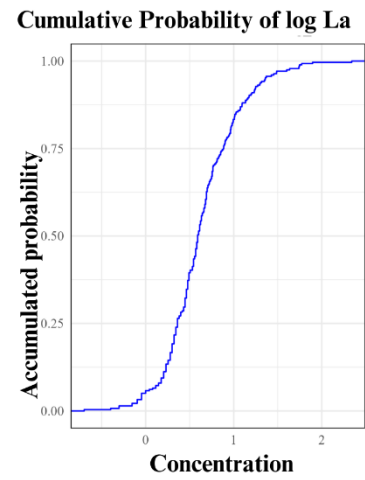
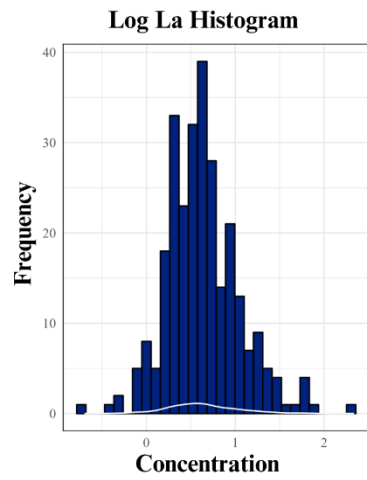


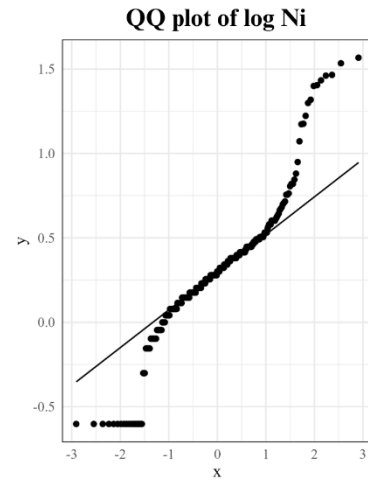
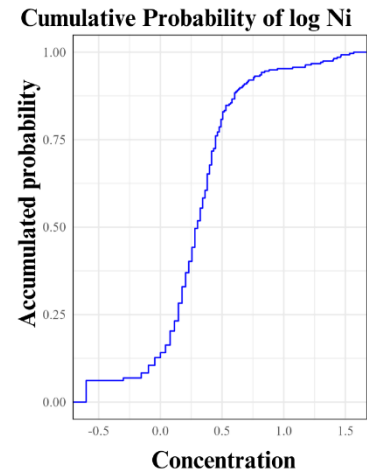
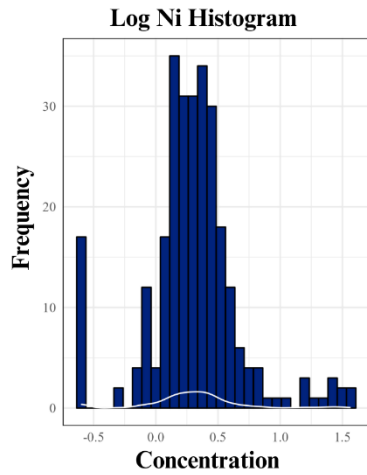
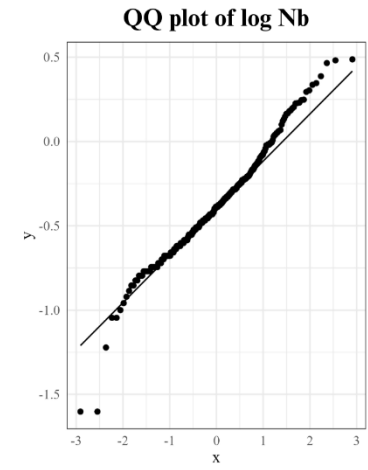
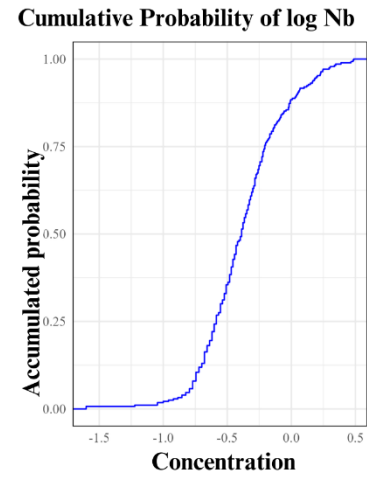
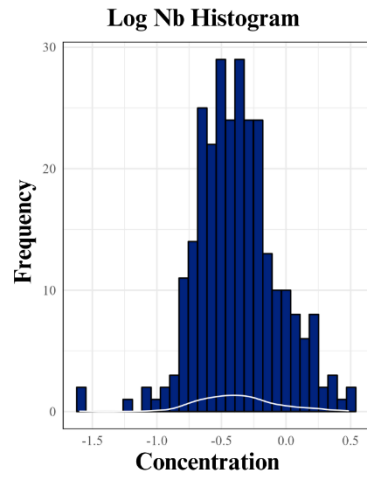


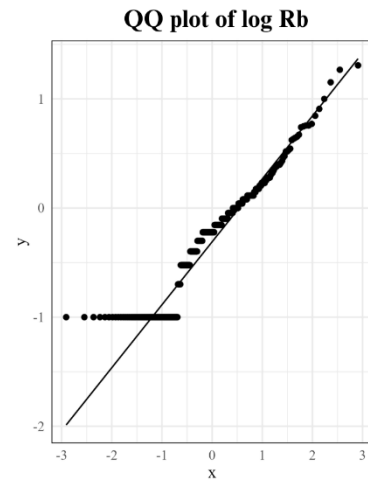
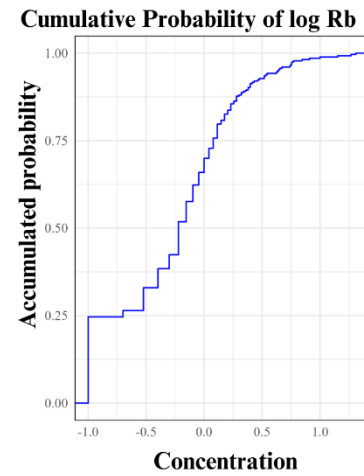
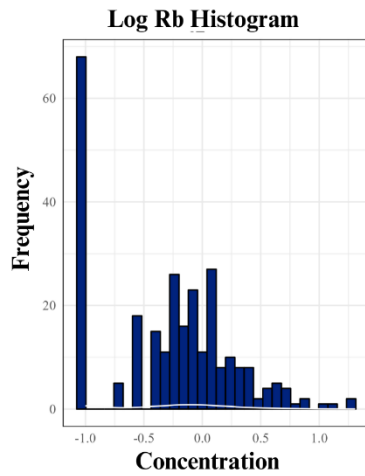
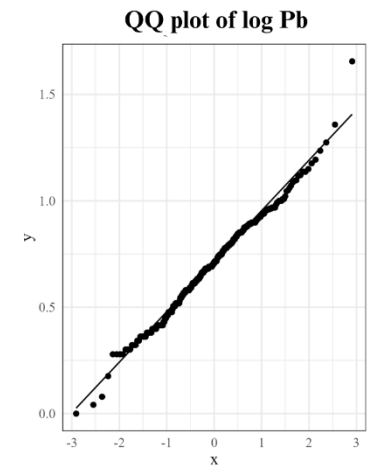
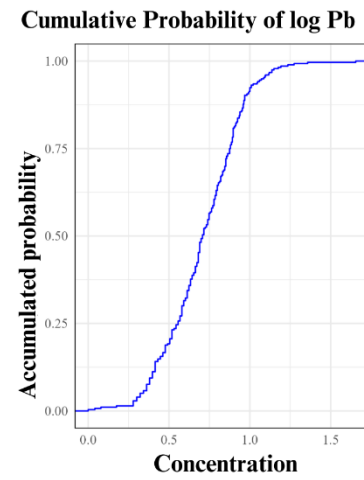
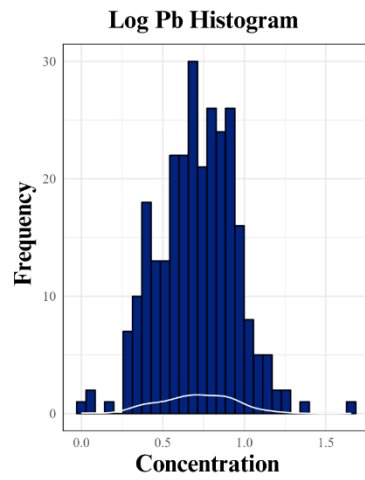


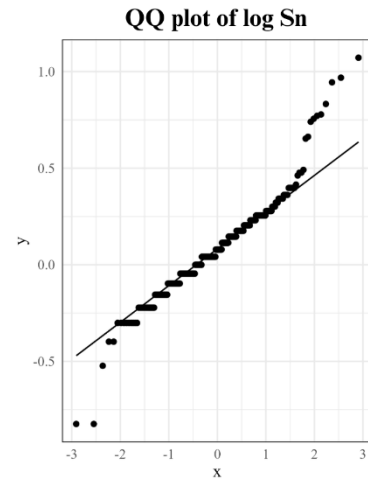
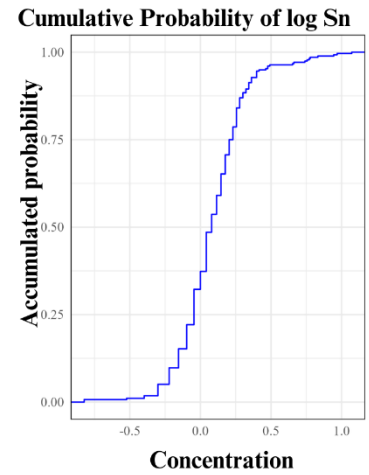
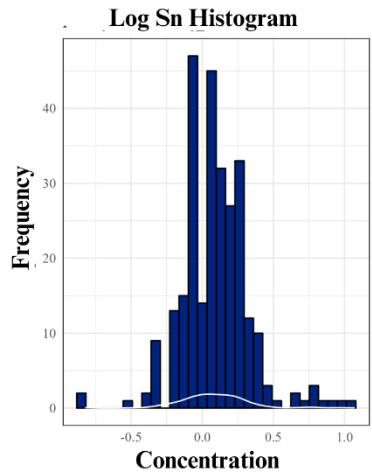
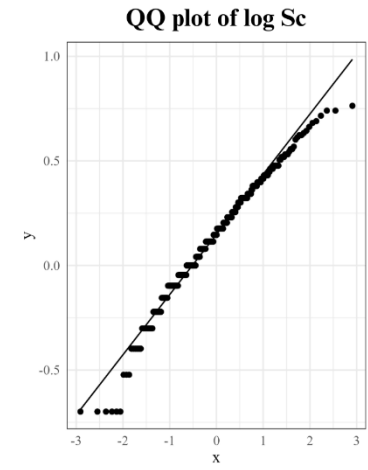
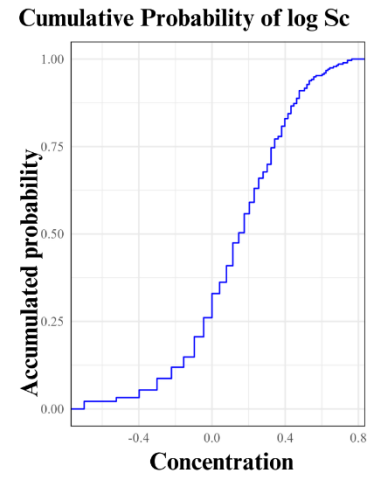
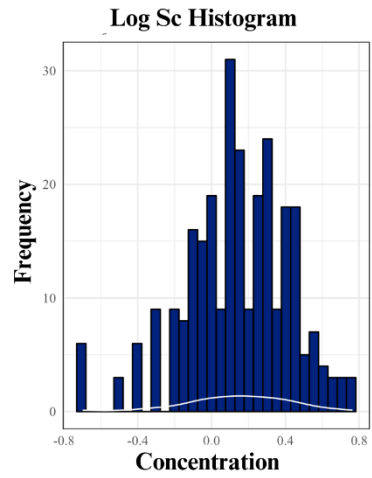


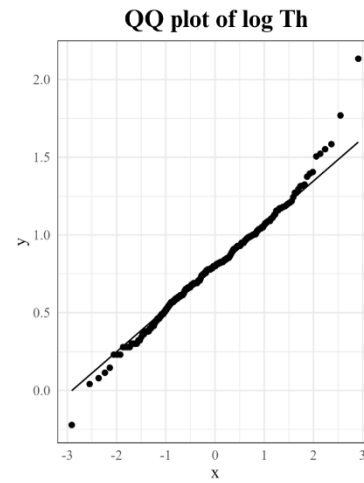
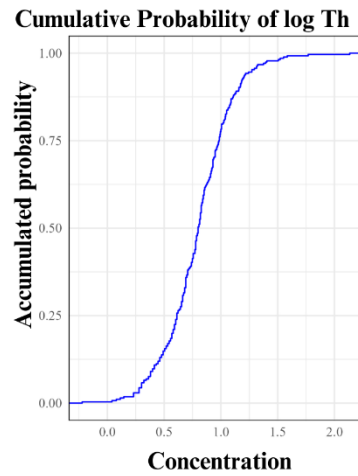
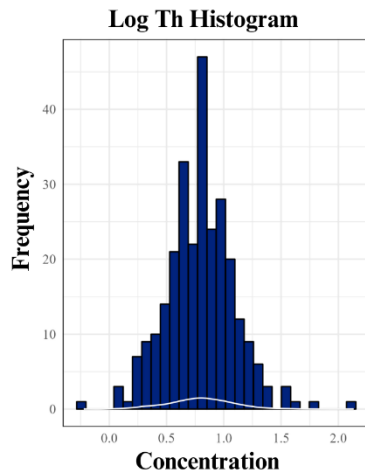
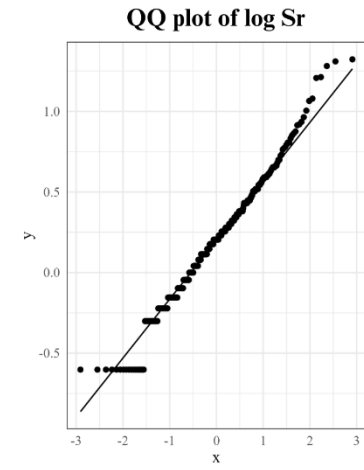
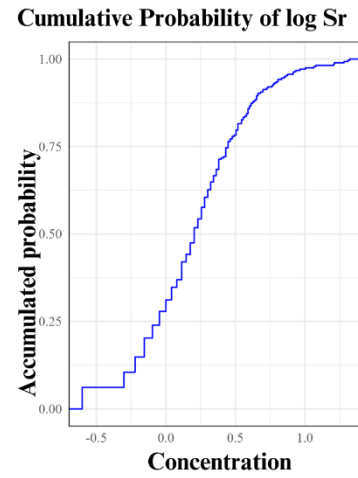
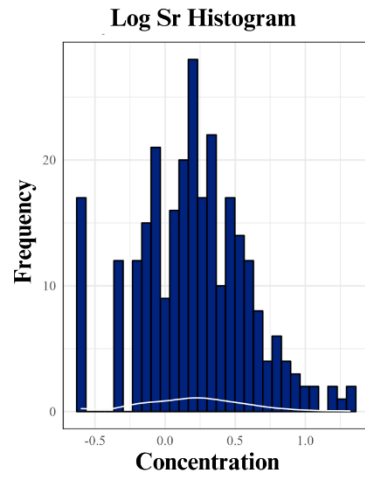


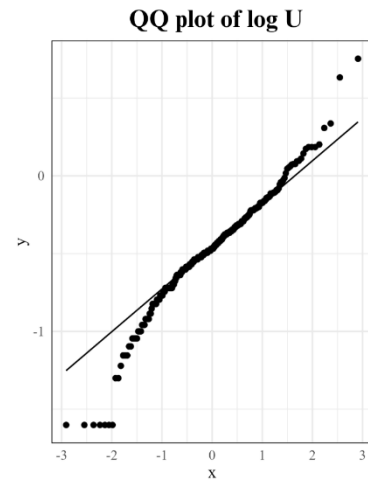
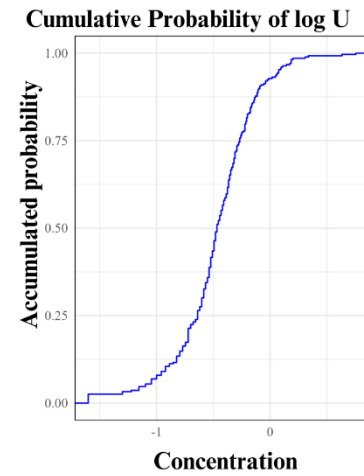
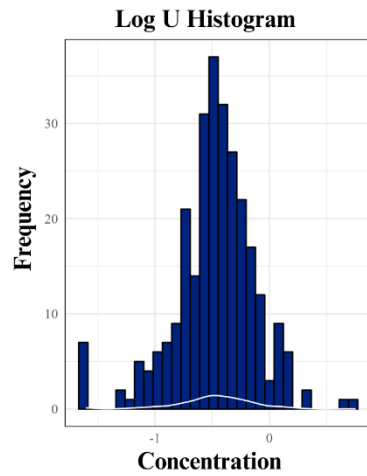
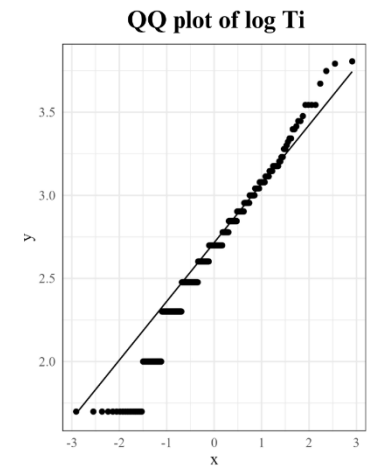
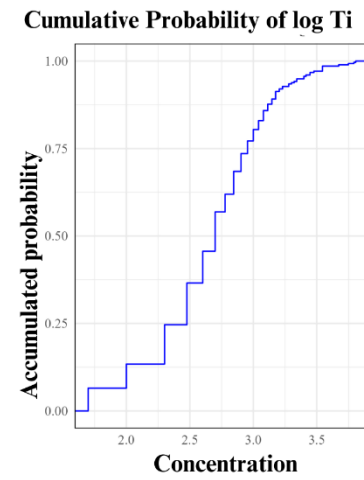
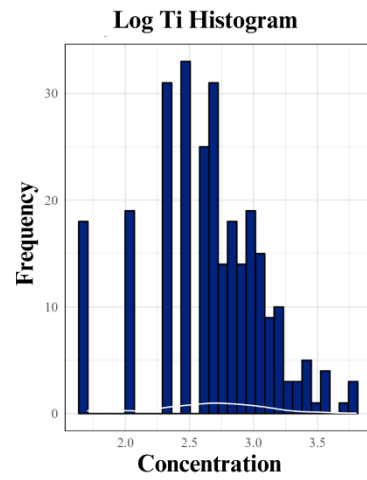


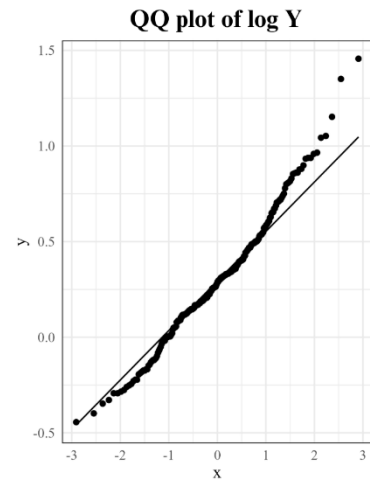
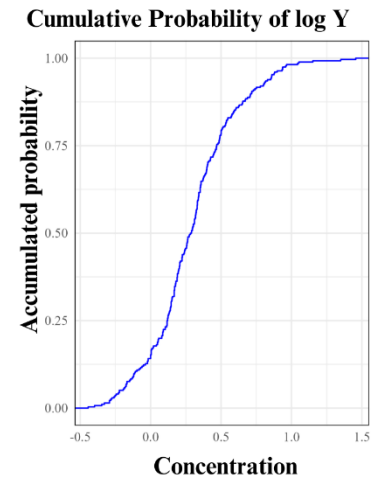
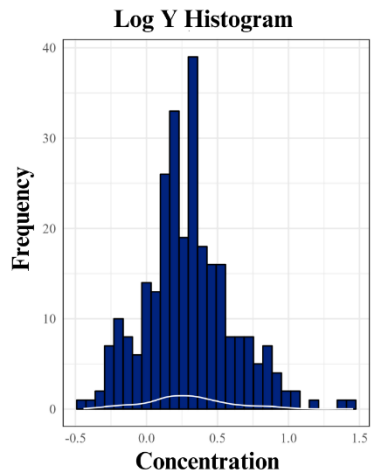
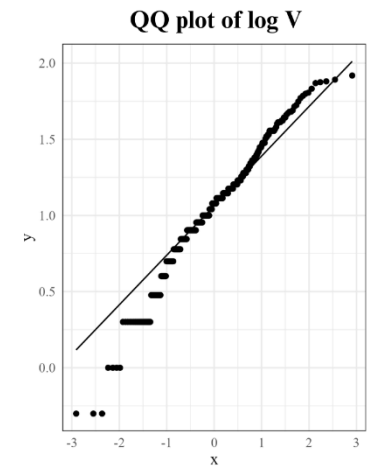
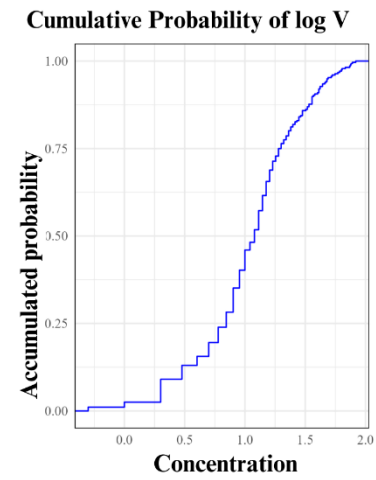
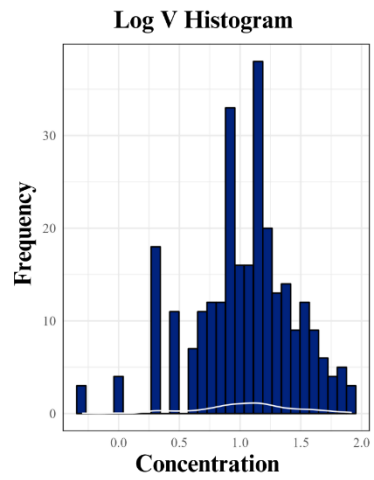


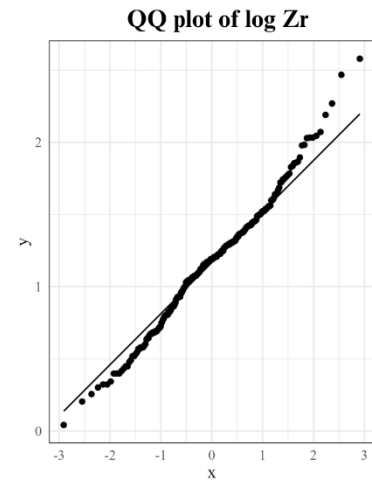
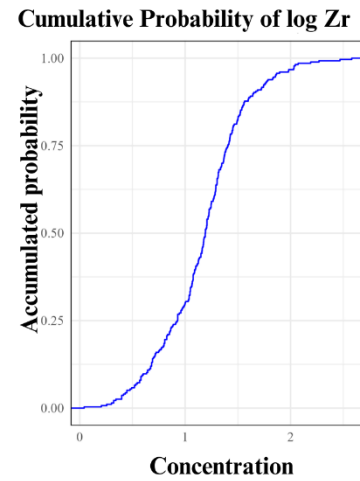
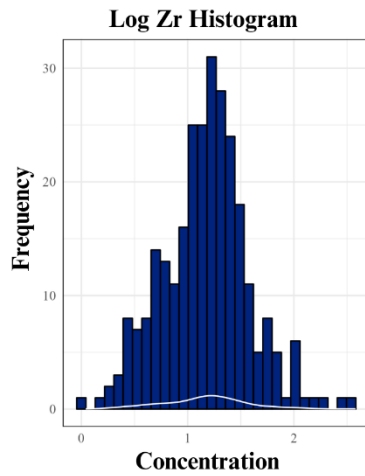
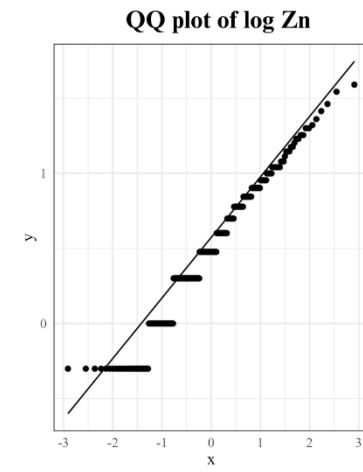
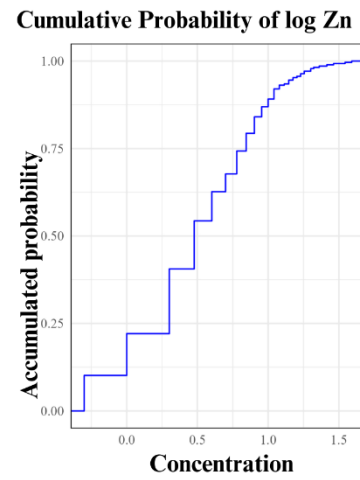
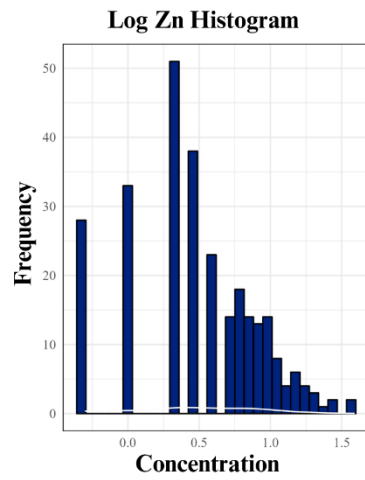




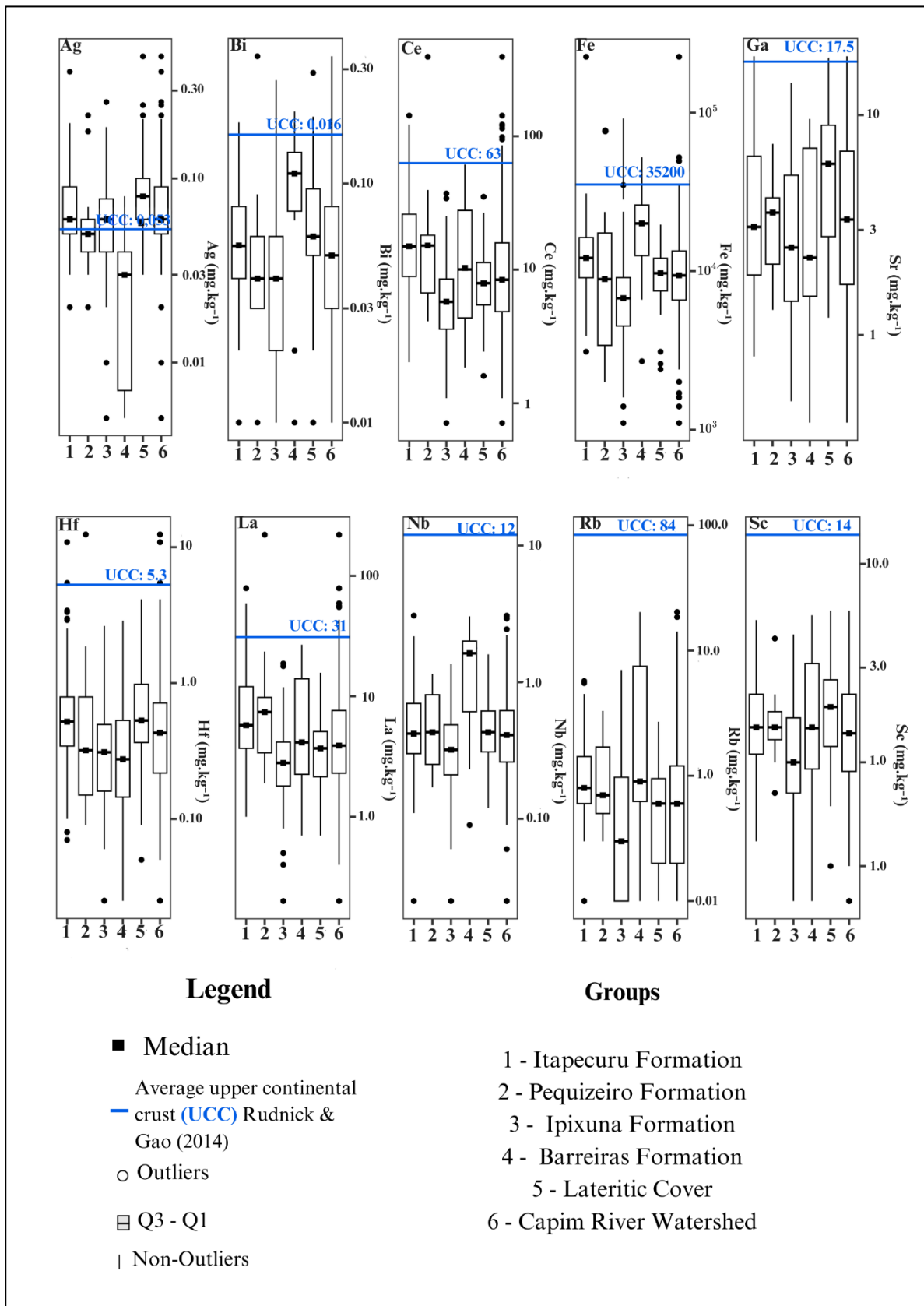


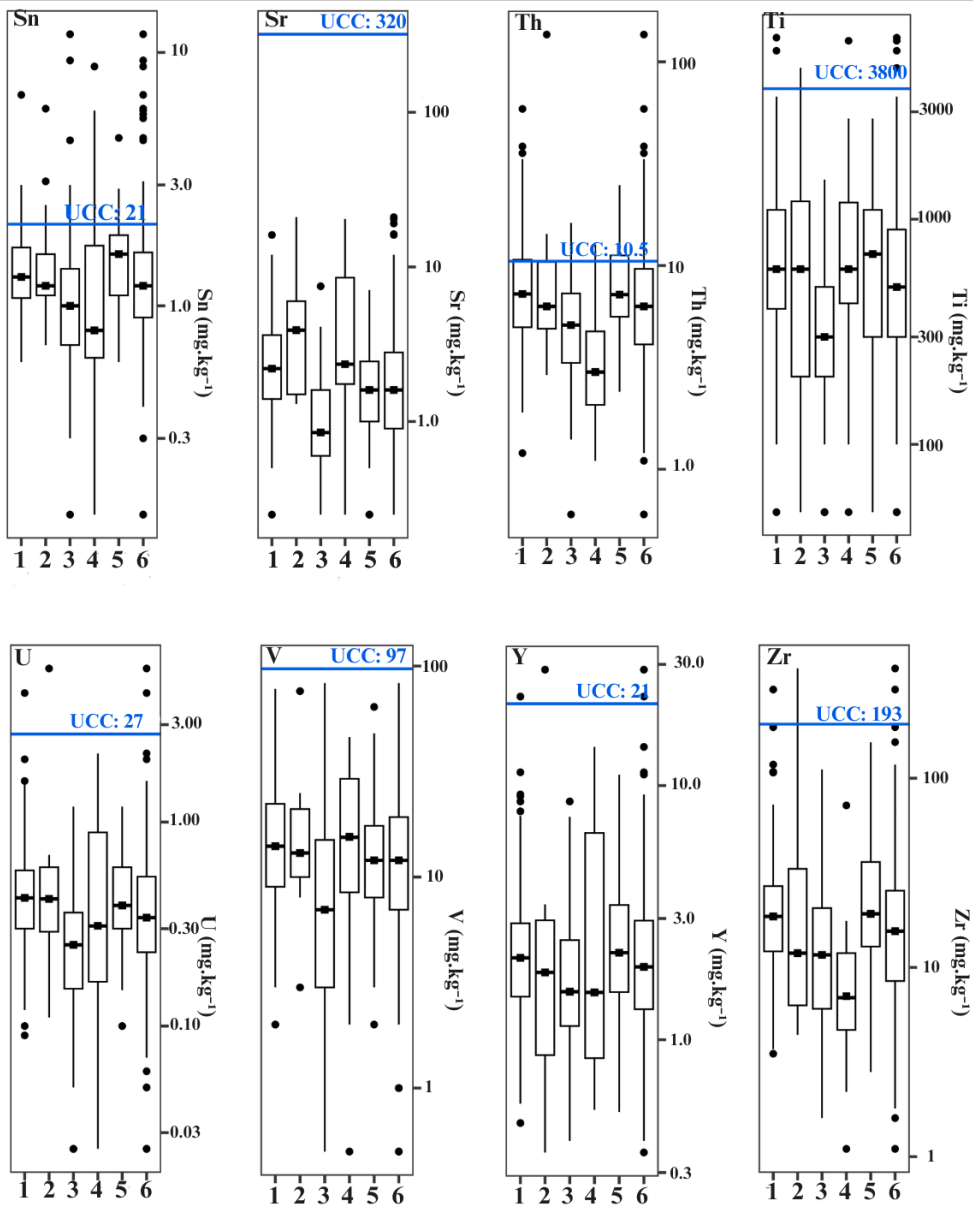






## APÊNDICE B – BOXPLOTS POR UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA E GERAL





### Legend

- Median
- Average upper continental crust (UCC) Rudnick & Gao (2014)
- Outliers
- ▢ Q3 - Q1
- | Non-Outliers

### Groups

- 1 - Itapecuru Formation
- 2 - Pequizeiro Formation
- 3 - Ipixuna Formation
- 4 - Barreiras Formation
- 5 - Lateritic Cover
- 6 - Capim River Watershed