



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 664

**MAPEAMENTO GEOQUÍMICO DE BAIXA DENSIDADE POR
SEDIMENTOS DE CORRENTE EM RORAIMA: DEFINIÇÃO
DE VALORES DE REFERÊNCIA (BACKGROUND/BASELINE
GEOQUÍMICO) E ABORDAGENS POR ÍNDICES
AMBIENTAIS E ANÁLISE MULTIVARIADA**

Dissertação apresentada por:

ANDRÉS FERNANDO GALINDO BARÓN

Orientador: Prof. Dr. VINICIUS TAVARES KUTTER (UFPA)

Coorientador: Prof. Dr. EDUARDO DUARTE MARQUES (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)**

G156m Galindo Barón, Andrés Fernando

Mapeamento geoquímico de baixa densidade por sedimentos de corrente em Roraima: definição de valores de referência (background/baseline geoquímico) e abordagens por índices ambientais e análise multivariada / Andrés Fernando Galindo Barón. — 2025.

xxi, 149 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 Ciências Ambientais, Belém, 2025.

1. Baseline/background geoquímico. 2. Bacia Amazônica. 3. Associações geoquímicas. 4. Uso e cobertura do solo. 5. Índices ambientais.. I. Título.

CDD 551.909811



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

**MAPEAMENTO GEOQUÍMICO DE BAIXA DENSIDADE
POR SEDIMENTOS DE CORRENTE EM RORAIMA:
DEFINIÇÃO DE VALORES DE REFERÊNCIA
(BACKGROUND/BASELINE GEOQUÍMICO) E
ABORDAGENS POR ÍNDICES AMBIENTAIS E ANÁLISE
MULTIVARIADA**

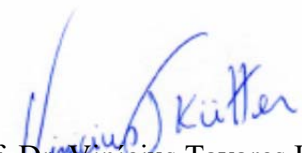
Dissertação apresentada por

ANDRÉS FERNANDO GALINDO BARÓN

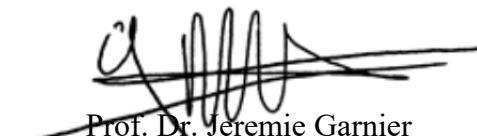
**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOLOGIA e Linha de Pesquisa Geologia Marinha e Costeira**

Data de Aprovação: 17 / 01 / 2025

Banca Examinadora:


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

Documento assinado digitalmente
 **GABRIEL SOARES DE ALMEIDA**
Data: 17/01/2025 16:16:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>
Prof. Dr. Gabriel Soares de Almeida
(Membro - ITV)


Prof. Dr. Jeremie Garnier
(Membro - UnB)

*Este trabalho é dedicado aos meus
pais e irmãos, meus primeiros
e eternos amigos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar próximo de mim em cada pessoa que me ajudou nesta vida. Tenho uma dívida eterna com meus pais, Blanca e Epiménio, por me darem a possibilidade de ser uma pessoa melhor a cada dia. Não foram poucos os desafios que enfrentei, mas, graças à minha família, cada um deles foi mais fácil de superar. Espero poder contribuir com o mundo e com suas vidas, assim como vocês fizeram por mim.

Também quero expressar minha gratidão a todas as pessoas do Instituto de Geociências e, em especial, ao Programa de Pós-graduação (PPGG), pelos excelentes seres humanos que encontrei e que sempre me ofereceram sua ajuda. A Cleida, Joice, Débora e Glenda, que desde o início estiveram prontas para me apoiar.

À professora Aline, pelos conselhos que me ajudaram não apenas na parte técnica, mas também durante todo este processo. Aos professores Vinicius Kutter e Eduardo Marques, por me derem a oportunidade de aprender e crescer em um ambiente tão acolhedor, cheio de paciência e companheirismo. Mais do que meus orientadores, sempre os senti como amigos. Trabalhar com vocês foi uma experiência que levarei com muito carinho no coração. Na minha vida, haverá um antes e depois de vocês. Também muito obrigado Gabriel Soares de Almeida pelas dicas e recomendações que aportou neste trabalho.

Este estudo não poderia ter sido realizado sem a contribuição do Serviço Geológico do Brasil (SGB) e a importante colaboração de pesquisadores como Aurélio Freitas e José Marmos.

Agradeço a cada um dos pesquisadores que, direta ou indiretamente, constroem ciência para entender melhor nosso mundo. Teria sido impossível chegar a esses resultados sem suas contribuições. Sinto-me muito feliz por ter conhecido tantas pessoas que são referência neste campo e espero, no futuro, continuar encontrando seres humanos tão incríveis, que dedicam seu tempo a construir um mundo melhor para todos. Espero ter a sabedoria que cada um de vocês demonstrou ao enfrentar os desafios que a vida lhes propôs. Vocês sempre serão minha inspiração para me tornar a melhor versão de mim.

Sempre me senti em casa graças às pessoas maravilhosas que conheci no Brasil. Sempre lembrarei com carinho de como foi encontrar rostos amigos nos corredores da universidade. Obrigado pelo apoio, Sebastián, Sergio, Julio, Laura e Carolina, pela acolhida, Wendy e Kike, pela fraternidade, Laura, Julián, Brenda, Andrea, Catalina e Alejandra.

Agradeço também às pessoas dentro e fora da universidade que me permitiram viver o sonho de conhecer outras realidades, me oferecendo uma nova perspectiva positiva do mundo e quebrando meus paradigmas. De verdade, obrigado por estarem comigo nos meus dias de glória e nas minhas batalhas: Ana, Vitoria, Lorena, Emanuel, Marcial, Jackson, Robi, Rebeca, Alan, Maria e todos os amigos que esta experiência me permitiu conhecer.

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES). Código de financiamento 001.

*“O tempo é como um rio
que arrasta rapidamente
tudo o que nasce”
Marco Aurelio
Sapere Aude*

RESUMO

Os sedimentos de corrente fornecem informações importantes sobre a distribuição de elementos químicos nas bacias hidrográficas, seja como resultado do intemperismo químico das rochas ou pela influência de atividades humanas. No Estado de Roraima, a crescente preocupação com os impactos da mineração e da agricultura impulsionam a necessidade de definir um baseline geoquímico. O baseline permite diferenciar as concentrações de elementos de origem natural daquelas influenciadas por atividades antropogênicas. Esta análise é essencial para avaliar com precisão os impactos ambientais e monitorar futuras alterações na geoquímica regional, em conformidade com os elementos estipulados na resolução Conama 454/2012 (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn). Com esse objetivo, foi utilizada a base de dados do projeto "Levantamento Geoquímico de Baixa Densidade no Estado de Roraima", com amostras coletadas entre 2009 e 2013. As coletas foram realizadas de maneira sincrônica durante o mesmo período de precipitação, evitando assim erros decorrentes da sazonalidade. A área de estudo abrange 106.369,051 km², distribuída em 429 microbacias. Os sedimentos ativos de corrente foram coletados pelo SGB de acordo com o manual técnico da Área de Geoquímica v.5.0. Nos locais de coleta, foram registradas as coordenadas, e o material foi peneirado para obter a fração silte e argila. A amostragem foi realizada de forma composta em uma faixa de aproximadamente 100 m ao longo da drenagem a montante do acesso. O protocolo dos métodos analíticos incluiu a secagem das amostras a 60°C, peneiramento com malha <80 mesh e enviadas ao laboratório da SGS GEOSOL LTDA para análises químicas. Em laboratório, foram submetidas a digestão com água régia (HNO₃ + 3HCl) e em seguida analisados 53 elementos químicos (Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, F, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Pd, Pt, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn e Zr) via ICP-OES e ICP-MS. A análise exploratória dos dados utilizou estatística descritiva, gráficos e tabelas de contingência para permitir a escolha de técnicas não paramétricas de estatística uni, bi e multivariada. Além disso, foram empregados métodos modernos para a determinação de valores de Baseline geoquímico, como mMAD, TIF e percentis (98, 95, 90, 75). As anomalias encontradas nos mapas unielementares, baseados nos limites do Baseline, são explicadas pelas associações multielementares determinadas pela análise fatorial confirmatória. Esta revelou seis associações principais que explicam a distribuição dos elementos químicos e sua relação com diversos processos geológicos. O Fator 1 (20,60% Variância do sistema) agrupa elementos como Ba, Cs, Rb, Sr e Zn, relacionados com rochas ígneas diferenciadas,

graníticas, pegmatíticas e processos hidrotermais vinculados ao domínio Surumu. O Fator 2 (15,76%) destaca elementos de terras raras e actínídeos (Ce, La, Th, U, Y), concentrados em minerais acessórios como monazita e apatita, associados ao magmatismo do Cinturão Ígneo Orocaima. O Fator 3 (13,90%) identifica uma associação entre Mn, Nb, Ti e Fe com magmatismo toleítico na Suíte Avanavero e depósitos aluviais. O Fator 4 (11,68%) engloba elementos típicos de rochas máficas e ultramáficas, como Co, Cr, Cu, Ni e V, presentes em basaltos e gabros Mesoproterozóico. O Fator 5 (7,51%) relaciona elementos como Al, Ga, Pb e Zn com processos de intemperismo e formação de minerais secundários em ambientes saprolíticos e aluviais. O Fator 6 (6,01%) associa Sc, Sn e Nb com intrusões graníticas e depósitos de placer vinculados ao magmatismo e tectônica das SLIP Uatumã e o cinturão ígneo Orocaima. A avaliação da qualidade ambiental utilizando índices geoquímicos e ambientais mostrou que o Estado apresenta enriquecimento significativo, maioritariamente ligado à geologia. A interpretação dos resultados destaca a interação entre a geologia regional e os processos tectono-magmáticos na distribuição dos elementos analisados. Da mesma forma, foram detectadas zonas anômalas com potencial para investigações direcionadas, especialmente em áreas impactadas por atividades humanas e modificações no uso do solo.

Palavras-chave: *baseline/background* geoquímico; bacia Amazônica; associações geoquímicas; uso e cobertura do solo; índices ambientais.

ABSTRACT

Stream sediments provide essential information on the distribution of chemical elements in river basins, whether because of rock weathering or the influence of human activities. In the State of Roraima, growing concerns about the impacts of mining and agriculture drive the need to define a geochemical baseline. This baseline allows distinguishing natural element concentrations from those influenced by anthropogenic activities. Such an analysis is crucial for accurately assessing environmental impacts and monitoring future changes in regional geochemistry, in accordance with the elements stipulated in CONAMA Resolution 454/2012 (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn). For this purpose, data from the "Low-Density Geochemical Survey in the State of Roraima" project were used, with samples collected between 2009 and 2013. Sampling was carried out synchronously during the same precipitation period to avoid errors due to seasonality. The study area covers 106,369.051 km², distributed across 429 micro-basins. Active stream sediments were collected by the SGB following the technical manual of the Geochemistry Area v.5.0. At each sampling site, coordinates were recorded, and the material was sieved to obtain the silt and clay fraction. The samples were collected in a composite manner over an approximately 100-meter stretch along the drainage upstream of the access point. The analytical methods protocol included drying the samples at 60°C, sieving them through a <80-mesh screen, and sending them to the SGS GEOSOL LTDA laboratory for chemical analysis. In the laboratory, the samples underwent digestion with aqua regia (HNO₃ + 3HCl) and were subsequently analyzed for 53 chemical elements (Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, F, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Pd, Pt, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn, and Zr) using ICP-OES and ICP-MS. Exploratory data analysis employed descriptive statistics, graphs, and contingency tables to support the selection of non-parametric univariate, bivariate, and multivariate statistical techniques. Additionally, modern methods were applied to determine geochemical baseline values, including mMAD, TIF, and percentiles (98, 95, 90, 75). Anomalies identified in the single-element maps, based on the geochemical baseline thresholds, are explained by multielement associations determined through confirmatory factor analysis. This analysis revealed six main associations that explain the distribution of chemical elements and their relationship with various geological processes. Factor 1 (20.60% of variance): Includes elements such as Ba, Cs, Rb, Sr, and Zn, associated with differentiated igneous rocks, granites, pegmatites, and hydrothermal processes linked to the Surumu domain. Factor 2 (15.76%) Highlights rare earth

elements and actinides (Ce, La, Th, U, Y), concentrated in accessory minerals such as monazite and apatite, associated with the magmatism of the Orocaima Igneous Belt. Factor 3 (13.90%) Identifies an association of Mn, Nb, Ti, and Fe with tholeiitic magmatism in the Avanavero Suite and alluvial deposits. Factor 4 (11.68%) Comprises elements typical of mafic and ultramafic rocks, such as Co, Cr, Cu, Ni, and V, present in Mesoproterozoic basalts and gabbros. Factor 5 (7.51%) Relates elements like Al, Ga, Pb, and Zn to weathering processes and the formation of secondary minerals in saprolitic and alluvial environments. Factor 6 (6.01%) Associates Sc, Sn, and Nb with granite intrusions and placer deposits related to the magmatism and tectonics of the Uatumã SLIP and the Orocaima Igneous Belt. The environmental quality assessment using geochemical and environmental indices indicated that the region exhibits significant enrichment, mainly related to geology. The interpretation of results highlights the interaction between regional geology and tectono-magmatic processes in the distribution of analyzed elements. Additionally, anomalous zones with potential for targeted investigations were identified, particularly in areas impacted by human activities and land-use changes.

Keywords: geochemical baseline; Amazon basin; geochemical associations; land use and land cover; environmental indices.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Mapa de localização do estado de Roraima (RR) no norte do Brasil, fazendo fronteira ao norte com a Venezuela e a Leste com a Guiana, ao sudeste com o estado do Pará e ao sudoeste com o estado do Amazonas. As siglas apresentadas no mapa: UCS – Usos e coberturas de solo, UCs - Unidades de Conservação, TIs - Terras Indígenas: AN-Anta, ANL-Aningal, AR-Araça, AS-Ananás, AU-Ouro, BJ-Bom Jesus, BL-Barata/Livramento, BO-Boqueirão, CA-Cajueiro, CN-Canauanim, JA-Jacamim, JT-Jabuti, MA- Mangueira, ML-Malacacheta, MP-Manoá/Pium, MS-Moskow, MU-Muriru, NA-Anaro, PI-Pium, PS- Ponta da Serra, RA-Raimundão, RDS-Raposa do Sol, SI-Santa Inez, SM-São Marcos, SM-Serra da Moça, SU-Sucuba, TB-Tabalascada, TM-Trombetas/Mapuera, TR-Truaru, WA-Waimiri-Atroari, WW- Wai Wai, YN-Yanomami. Fonte: modificado de Mapbiomas (2024), IBGE (2024). 4
- Figura 2 - Zonas climáticas no estado de Roraima segundo Köppen e IBGE. Fonte: Modificado de Wankler (2022), INMET (2017), ANA (2017) e IBGE (2011)..... 6
- Figura 3 - Distribuição da precipitação média mensal em Roraima a partir dos dados 1998 - 2018. Fonte:(Barni *et al.* 2020b). 7
- Figura 4 - Valores médios mensais e anuais de Temperaturas do ar e de Precipitações para Boa Vista, RR, nos períodos de 1961-1990 e de 1991-2020. Fonte: Modificado de (Araujo *et al.* 2024). 7
- Figura 5 - As bacias que drenam para o Caribe estão em laranja, as que contribuem para o Amazonas transcontinental em amarelo, as que fluem para o Atlântico Norte em verde e as que deságuam no Atlântico Sul (La Plata) em azul. O modelo à direita mostra a evolução da paisagem, com setas vermelhas indicando o fluxo predominante de água e sedimentos. As conexões em cinza são incertas devido à falta de dados, enquanto a bacia em branco é completamente marinha. Os nomes “Amazônia Oc.”, “Llanos”, “Amazonas” e “Essequibo” agrupam várias bacias sedimentares. O mapa base inclui linhas costeiras e topografia moderna para orientação..... 9
- Figura 6 - A. Contexto tectônico de Roraima e entorno da placa Sul-Americana. B. Reconstrução esquemática do Oeste de Gondwana e corredor tectônico Transbrasiliano-Kandi (TB-Kandi). C. Crátons Sul-Americanos. Fonte: Modificado de Cordani *et al.* (2016) 11
- Figura 7 - Encarte tectônico do escudo das Guianas. Fonte: (Mendes *et al.* 2023) 17

- Figura 8 - Mapa geológico do estado de Roraima e seus domínios tectonoestratigráficos: Domínio de Surumu (DSU), Domínio Guiana Central (DGC), Domínio Parima (DPA), Domínio Uatumã-Anauá (DUA) e Domínio das Coberturas Aluvionares (DCA). Siglas: Cz - Cenozoico, Mz - Mesozoico, Pz - Paleozoico e Cmp - Complexo. Fonte: modificado de Almeida *et al.* (2007, 2008), Freitas e Marmos (2017), Reis *et al.* (2006)..... 20
- Figura 9 - Solos do Estado de Roraima. Fonte: Modificado de (Vale Júnior 2016) 22
- Figura 10 - Mapa hipsométrico do estado de Roraima com as áreas correspondentes aos terrenos proterozoicos (A) e unidades geomorfológicas do estado (B), incluindo: DBV - Depressão Boa Vista, DiT - Depressão Interplanáltica do Trombetas, DrBN - Depressão Rio Branco-Rio Negro, PmU - Patamar do Médio Uraricoera, PnR - Patamar do Norte de Roraima, PsR - Patamar do Sul de Roraima, PdT - Patamares Dissecados do Tacutu, PrBN - Pediplano Rio Branco-Rio Negro, PdsR - Planaltos Dissecados Sul de Roraima, PltR - Planaltos Tabulares de Roraima, PTf - Planícies e Terraços Fluviais, Rr - Relevos Residuais, RrA - Relevos Residuais Anauá, RrM - Relevos Residuais Mucajaí, Serra do Tepequém, Sr - Serranias Residuais e Sit - Serras do Interflúvio. Fontes: Modificado de Tavares Júnior (2020)..... 24
- Figura 11 - A. Mapa dos limites da bacia do rio Amazonas e rio Negro. B. Bacias hidrográficas de nível 3 que deságuam no rio Negro. C. Bacias hidrográficas do estado de Roraima. 1: Água Boa do Univini, 2: Ajarani, 3: Alalaú, 4: Amajari, 5: Anauá, 6: Baraúna, 7: Branco I, 8: Branco II, 9: Cachorro, 10: Catrimani, 11: Cauamé, 12: Contingo, 13: Itapará, 14: Jatapú, 15: Jauaperi, 16: Jufari, 17: Maú, 18: Mucajaí, 19: Parima, 20: Parimé, 21: Quitauaú, 22: Surumu, 23: Tacutu, 24: Uraricaá, 25: Urariquera, 26: Xeriuni. D. Microbacias delimitadas e localização dos pontos de coleta de sedimentos. Fonte: Modificado ANA (2022), Freitas & Marmos (2017), IBGE (2023) 27
- Figura 12 - Distribuição geográfica da vegetação remanescente e perdida (vegetação não florestal [VNF] e formações florestais) no bioma Amazônia brasileira (2000-2022). Autores: modificado de (Messias *et al.* 2024)..... 29
- Figura 13 - Mapas de uso e cobertura do estado de Roraima para os anos de 1985, 2013 e 2023. Gráfico de área para as classes de uso e cobertura do solo (1985-2023), com linhas de tendência para uso antrópico e natural. Fonte: Modificado de Mapbiomas (2024) Versão 9..... 30
- Figura 14 - Zonas de interesse. (a) Imagem hiperespectral original do GF-5, (b) Resultados

da previsão por GWR, (c) Resultados da exploração geoquímica. Fonte: Zheng <i>et al.</i> (2023)	32
Figura 15 - Modelo conceitual simplificado de dispersão de elementos geoquímicos em solos e sedimentos de rios. A. Difusão a partir de um sistema de pórfido de cobre para o solo por meteorização, influenciada por fatores como lixiviação, erosão, gradiente de concentrações e topografia. B. Difusão em sedimentos de rios por um sistema de drenagem, afetada pela variabilidade litológica, irregularidades locais e diluição devido aos afluentes. O modelo desconsidera diversos fatores locais, como a dispersão biológica e a adsorção, o que gera incertezas no mapeamento geoquímico de sedimentos de rios. Fonte: (Xuejing 2008, Xie <i>et al.</i> 2008, Wang & Zuo 2024)	36
Figura 16 - Comparação dos valores do mapeamento de alta e baixa densidade amostral de parâmetros e elementos selecionados na água de córrego (diagramas de frequência cumulativa). Fonte: (Birke <i>et al.</i> 2015)	38
Figura 17 - Tabela periódica de elementos destacando os EPT de acordo com suas funções fisiológicas e toxicidade. Fonte: Modificado de (Nieder & Benbi 2024)	42
Figura 18 - Mapa de uso e cobertura do solo do Estado de Roraima. Fonte: modificado de Mapbiomas (2024)	47
Figura 19 - Mapa geológico com limites dos domínios tectonoestratigráficos. Fonte: Modificado de (Mendes <i>et al.</i> 2023, Reis <i>et al.</i> 2006, Reis <i>et al.</i> 2006)	49
Figura 20 - Diagramas de violino da área (km ²) das microbacias hidrográficas em relação aos domínios tectonoestratigráficos. Fonte: Autor	61
Figura 21 - Boxplots e intervalos dos métodos mMAD e TIF	67
Figura 22 - Boxplots das concentrações dos elementos Al, As, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Hf, Hg, La, Mn, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, Y, Zn e Zr para o estado de Roraima e seus domínios tectonoestratigráficos, comparados com o teor médio crustal (UCC) segundo Rudnick & Gao 2014 e os níveis N1 e N2 da Resolução CONAMA 454/12. Siglas: RR: Roraima, DUA: Domínio Uatumã-Anauá, DSU: Domínio Surumu, DGC: Domínio Guiana Central, DCA: Domínio Coberturas Aluvionares. Fonte: Autor	72
Figura 23 - Porcentagem de valores anômalos acima do limite superior dos métodos (TIF e mMAD) e mediana das anomalias dos elementos em Roraima	73
Figura 24 - Mapas unielementares de Cr, Cu, Nb, Ni, Pb, Th, U e Zn. Siglas: DUA: Domínio Uatumã-Anauá, DSU: Domínio Surumu, DGC: Domínio Guiana Central, DCA:	

Domínio Coberturas Aluvionares. Limite Superior do Baseline/Background (UBL), e Limite Inferior do Baseline/Background (LBL)	74
Figura 25 - Matriz de correlação de Spearman para dados log transformados na parte inferior esquerda e dados CLR transformados na parte superior direita. Fonte: Autor	75
Figura 26 - Dendrograma dos elementos com dados transformados em CLR (Centered Log-Ratio).....	77
Figura 27 - Mapa de distribuição dos fator scores para o fator 1 (Ba-Cs-Rb-Sr-Zn). À esquerda, as bacias hidrográficas, à direita, as amostras.....	80
Figura 28 - Mapa de distribuição dos fator scores para o fator 2 (Ce-La-Th-U-Y). À esquerda, as bacias hidrográficas, à direita, as amostras	82
Figura 29 - Mapa de distribuição dos fator scores para o fator 3 (Mn-Nb-Ti-Fe). À esquerda, as bacias hidrográficas, à direita, as amostras	83
Figura 30 - Mapa de distribuição dos fator scores para o fator 4 (Co-Cr-Cu-Fe-Ni-V). À esquerda, as bacias hidrográficas, à direita, as amostras.....	85
Figura 31 - Mapas de distribuição dos fator scores para o fator 5 (Al-Ga-Pb-V-Zn). À esquerda, as bacias hidrográficas, à direita, as amostras.....	87
Figura 32 - Mapas de distribuição dos fator scores para o fator 6 (Sc-Sn-Nb). À esquerda, as bacias hidrográficas, à direita, as amostras	88
Figura 33 - Mapas do Fator de Enriquecimento para As, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE). Fonte: Autor	92
Figura 34 - Mapas do Fator de Enriquecimento para Cd, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE). Fonte: Autor	93
Figura 35 - Mapas do Fator de Enriquecimento para Cr, normalizados utilizando Al, Fe+Mn	

e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE).
 Fonte: Autor. 94

Figura 36 - Mapas do Fator de Enriquecimento para Hg, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE).
 Fonte: Autor. 95

Figura 37 - Mapas do Fator de Enriquecimento para Ni, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE).
 Fonte: Autor. 96

Figura 38 - Mapas do Fator de Enriquecimento para Cu, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE).
 Fonte: Autor. 97

Figura 39 - Mapas do Fator de Enriquecimento para Pb, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE).

Fonte: Autor	98
Figura 40 - Mapas do Fator de Enriquecimento para Zn, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE). Fonte: Autor	99
Figura 41 - Mapas do fator de contaminação para As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn. Fonte: Autor.....	100
Figura 42 - Mapas do fator de contaminação para As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn em função dos domínios tectonoestratigráficos. Fonte: Autor.....	101
Figura 43 - Mapas de índices multielementares (Cr, Cu, Ni, Pb e Zn). Siglas: Grau de Contaminação Modificado (GCM), Índice de Poluição (IP), Índice de Risco Ecológico Potencial (IREP) e Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Fonte: Autor.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do mapeamento geoquímico em função da densidade de amostragem	37
Tabela 2 - Concentrações (mg kg ⁻¹) de EPT (intervalos) em rochas ígneas e sedimentares e solos não contaminados	41
Tabela 3 - Concentrações (mg kg ⁻¹) de EPT da Resolução CONAMA 454/12 para água doce e salgada, para os níveis 1 e 2	43
Tabela 4 - Classes do fator de contaminação e fator de enriquecimento	57
Tabela 5 - Classes do Fator de Contaminação e Fator de Contaminação Modificado	58
Tabela 6 - Classes do Índice de Risco Ecológico Potencial	59
Tabela 7 - Porcentagem das bacias hidrográficas de Roraima cobertas pelas microbacias e número de amostras em cada uma	61
Tabela 8 - Sumário estatístico dos elementos analisados, incluindo LLD (Limite Inferior de Detecção), AALD (%) (Percentual de Amostras Abaixo do Limite de Detecção), Média (DB: Dados Brutos, Log: Dados Logarítmicos), SD (Desvio Padrão), MAD (Desvio Absoluto Mediano), Skew (Coeficiente de Assimetria), Rku (Curtose), valores mínimos (Min), mediana e máximos (Max), além do teste de normalidade Shapiro-Wilk	62
Tabela 9 - Percentil 75th, 90th, 95th e 98th e limiares dos métodos Tukey's Inner Fences (TIF), mediana $\pm 2^*$ Desvio Absoluto da Mediana (mMAD) para o Estado de Roraima e Domínios Tectonoestratigráficos. Siglas: RR: Roraima, DCA: Domínio das Coberturas Aluvionares, DGC: Domínio Guiana Central, DSU: Domínio Surumu e DUA: Domínio Uatumã-Anauá. Limite Inferior do Baseline (LIB) e Limite Superior do Baseline (LSB)	64
Tabela 10 - Loadings, percentual de variância e comunalidades da AF aplicada aos dados geoquímicos (dados transformados por CLR)	78

SUMÁRIO

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
EPÍGRAFE	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT	x
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xviii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3 ÁREA DE ESTUDO	4
3.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS	4
3.2 CLIMA E PRECIPITAÇÃO.....	5
3.3 GEOLOGIA	8
3.3.1 Cinturões do Eo-Orosiriano	10
3.3.2 Cinturão Orocaima	12
3.3.3 Grupo Parima.....	13
3.3.4 Grandes províncias	13
3.3.5 Grande Província Ígnea (LIP):	13
3.3.6 Bacia do tipo rift-sag Roraima	14
3.3.7 SLIP Uatumã.....	14
3.3.8 Magmatismo Mesoproterozóico (Suítes Tipo-A).....	15
3.3.9 Cinturão de Retrabalramento Crustal K'Mudku	15
3.3.10 Cobertura Fanerozoica	16
3.4 DOMÍNIOS TECTONOESTRATIGRÁFICOS DE RORAIMA.....	17
3.4.1 Domínio de Surumu (DSU)	18
3.4.2 Domínio Guayana Central (DGC).....	18
3.4.3 Domínio Parima (DPA).....	18
3.4.4 Domínio Uatumã-Anauá (DUA)	19
3.4.5 Domínio das Coberturas Aluvionares (DCA).....	19
3.5 SOLOS	20
3.6 GEOMORFOLOGIA.....	22
3.7 HIDROGRAFIA	24
3.8 VEGETAÇÃO	27
3.9 USO E COBERTURA DO SOLO.....	28

4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
4.1	ANOMALIAS GEOQUÍMICAS.....	31
4.2	GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS	33
4.3	MAPEAMENTO GEOQUÍMICO COM SEDIMENTOS DE CORRENTE.....	34
4.4	MAPEAMENTO GEOQUÍMICO DE BAIXA DENSIDADE	36
4.5	BACKGROUND E BASELINE GEOQUÍMICO	39
4.6	ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS.....	41
5	ARTIGO: MAPEAMENTO GEOQUÍMICO E BASELINE DE METAIS EM SEDIMENTOS DE CORRENTE NOS RIOS DE RORAIMA, AMAZÔNIA, BRASIL.....	44
5.1	INTRODUÇÃO	44
5.2	AREA DE ESTUDO	46
5.3	GEOLOGIA DA ÁREA	48
5.4	METODOLOGIA	50
5.4.1	Delimitação de Bacias Hidrográficas	50
5.4.2	Coleta, preparação e análise química das amostras	50
5.4.3	Análise estatística univariada	51
5.4.4	Avaliação Do Background Geoquímico	52
5.4.5	Análise Estatística Bi e Multivariada	54
5.4.6	Fator de Enriquecimento (EF)	55
5.4.7	Fator de Contaminação (CF)	56
5.4.8	Grau de Contaminação (Cd) e Grau de Contaminação Modificado (mCD).....	57
5.4.9	Índice de Carga de Poluição (PLI)	58
5.4.10	Índice de Risco Ecológico Potencial (IREP).....	59
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.5.1	Distribuição de amostragem nas bacias hidrográficas de Roraima	59
5.5.2	Análise estatística dos elementos PTE nos sedimentos de Roraima.....	62
5.5.3	Avaliação de limiar geoquímico: aplicações do mMAD e TIF em elementos PTE	63
5.5.4	Influência da granulometria na geoquímica de sedimentos finos.....	68
5.5.5	Anomalias geoquímicas e heterogeneidade entre domínios tectonoestratigráficos de Roraima.....	69
5.5.6	Correlação e agrupamento de elementos	73
5.5.7	Fator 1 (Ba - Cs - Rb - Sr - Zn)	79
5.5.8	Fator 2 (Ce - La - Th - U - Y)	81
5.5.9	Fator 3 (Mn - Nb - Ti - Fe)	83
5.5.10	Fator 4 (Co - Cr - Cu - Fe - Ni - V).....	84
5.5.11	Fator 5 (Al - Ga - Pb - V - Zn)	85

5.5.12 Fator 6 (Sc - Sn - Nb).....	87
5.5.13 Índices geoquímicos para análise de contaminação em Roraima	89
5.6 CONCLUSÕES	103
REFERÊNCIAS	105
APÊNDICE A - HISTOGRAMAS, GRÁFICOS QQ E PROBABILIDADE ACUMULADA PARA DADOS TRANSFORMADOS EM LOG E CLR.....	140
APÊNDICE B - TENDÊNCIAS NOS LIMITES SUPERIORES DOS MÉTODOS DE DEFINIÇÃO DE BACKGROUND/BASELINE: MMAD, TIF, PERCENTIS 75TH, 90TH, 95TH E 98TH	190
APÊNDICE C - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO UNIELEMENTAR DE ACORDO COM O LIMITE DO MÉTODO MMAD, APRESENTADOS COM BASE NOS CRITÉRIOS DE AGRUPAMENTO DEFINIDOS PELA ANÁLISE DE CLUSTER	191

1 INTRODUÇÃO

O mapeamento geoquímico é um instrumento fundamental nas Ciências da Terra, utilizado para interpretar a distribuição espacial de elementos químicos em diversas matrizes ambientais (Caritat & Cooper 2016, Johnson *et al.* 2005, Yang *et al.* 2022). Originalmente criado com o propósito de localizar recursos minerais, nas últimas décadas tornou-se uma ferramenta essencial para a avaliação ambiental, permitindo identificar elementos potencialmente tóxicos (EPT) e oferecendo uma oportunidade de compreender os processos naturais e antropogênicos relacionados à sua distribuição (Reimann & Garrett 2005, Smith *et al.* 2018, Vicq *et al.* 2015). O mapeamento geoquímico também tem se beneficiado da integração de técnicas estatísticas avançadas e ferramentas de geoprocessamento. O grande volume de informações gerado por esses estudos é facilitado pela evolução dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e pelo uso de ferramentas de programação, reduzindo o tempo de processamento e aprimorando a capacidade de análise, o que facilita a interpretação dos resultados (Kamara 2020, Magdalena *et al.* 2023).

Os dados provenientes de matrizes como sedimentos de corrente se destacam por sua capacidade de determinar associações geoquímicas do ambiente, refletindo tanto os aportes geológicos naturais quanto os impactos das atividades humanas (Su *et al.* 2017). Isso transforma as bacias hidrográficas de onde se originam esses sedimentos em áreas de enriquecimento, influenciadas por processos erosivos de rochas ou por fontes antropogênicas na região. Os SIG, ao combinar informações espaciais de diversas fontes, simplificam a detecção de padrões e vínculos entre variáveis derivadas do processamento de dados, tornando-se cruciais para a gestão e preservação do meio ambiente (Huang *et al.* 2010, Kamara 2020, Magdalena *et al.* 2023).

O Estado de Roraima, localizado no Escudo das Guianas e no Cráton Amazônico, é um exemplo paradigmático de uma região com riqueza geológica e hídrica. A configuração geológica desta área é composta por rochas provenientes do período Riaciano, datadas de mais de 2103 Ma, onde predominam rochas ígneas e metamórficas (Fraga *et al.* 2009a, 2024). A região abriga uma diversidade significativa de recursos minerais, incluindo ouro, diamantes, cassiterita e bauxita, que têm desempenhado um papel central na economia regional (Fernandes *et al.* 2015).

A intensificação da exploração aurífera na década de 1980, impulsionada pela

demanda global e pela identificação de depósitos significativos, se consolidou como uma atividade de grande relevância, acompanhada pela exploração de diamantes e bauxita, que, embora menos desenvolvidas, destacam o potencial estratégico desses recursos (Caitano *et al.* 2021, Silva Junior *et al.* 2019). No entanto, a atividade mineradora em Roraima também gerou desafios ambientais e sociais significativos.

Outras atividades também contribuíram para problemas como a perda de cobertura vegetal (Messias *et al.* 2024), a disposição inadequada de resíduos em áreas urbanas (Blank Chaves *et al.* 2020) e a intensificação da mobilização de elementos químicos para corpos d'água, evidenciada por estudos sobre bioacumulação em peixes (Jacques *et al.* 2023, Mesquita *et al.* 2023). Os conflitos pelo uso do território, especialmente em áreas habitadas por comunidades indígenas, refletem as tensões inerentes à relação entre o desenvolvimento econômico e a sustentabilidade ambiental (Falcão 2022, Silva Junior *et al.* 2019). Essas dinâmicas destacam a necessidade de estabelecer estratégias de gestão que equilibrem a exploração de recursos com a proteção ambiental e os direitos das comunidades locais.

Respondendo a essas demandas, o Atlas Geoquímico do Estado de Roraima (Freitas & Marmos 2017) constitui um marco significativo, ao fornecer um diagnóstico inicial sobre a distribuição geoquímica de elementos químicos na região. Este trabalho permitiu compreender o ambiente de distribuição unielementar por meio de mapas de interpolação das três matrizes ambientais, abrindo caminho para análises futuras. Apesar da grande contribuição no conhecimento básico da distribuição de elementos, gerada neste Atlas, a região ainda carece de aprofundamento de conhecimento relacionado a geoquímica de metais.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo abordar três aspectos fundamentais: (1) definir intervalos de *baseline* geoquímicos que permitam diferenciar concentrações naturais de anomalias, com a aplicação de métodos como mMAD e TIF, (2) identificar padrões espaciais de associações elementares por meio de análise estatística multivariada, como a análise fatorial, e (3) calcular índices ambientais e modelos cartográficos de risco ecológico.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Definir o baseline geoquímico do Estado de Roraima, utilizando métodos de estatística robusta, com o objetivo de fornecer um modelo que permita interpretar as fontes e a distribuição de elementos potencialmente tóxicos As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- i. Empregar análises estatísticas exploratórias e aplicar métodos de cálculo do Background/Baseline como mMAD, TIF, Percentis.
- ii. Aplicar análise fatorial e métodos estatísticos de correlação para identificar associações geoquímicas entre os elementos químicos e a geologia do Estado de Roraima.
- iii. Calcular índices geoquímicos e ambientais para avaliar possíveis anomalias de elementos potencialmente tóxicos e o estado de contaminação nas bacias hidrográficas do estado de Roraima.
- iv. Integrar os resultados dos cálculos com modelos de bacias hidrográficas gerando mapas para analisar a distribuição dos elementos e investigar as prováveis fontes das anomalias uni e multielementares, diferenciando entre fontes naturais e antropogênicas.

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

O Estado de Roraima está localizado no norte do Brasil e possui uma geografia diversa, caracterizada por savanas de ondulações suaves e, em grande parte, relevos planos (Cruz *et al.* 2018). Roraima faz fronteira com dois países: a oeste, com a Guiana, e ao norte, com a Venezuela (Figura 1). Essa proximidade gera desafios geopolíticos e socioeconômicos, como tensões entre esses países, comércio transfronteiriço e migrações (Arruda-Barbosa *et al.* 2020).

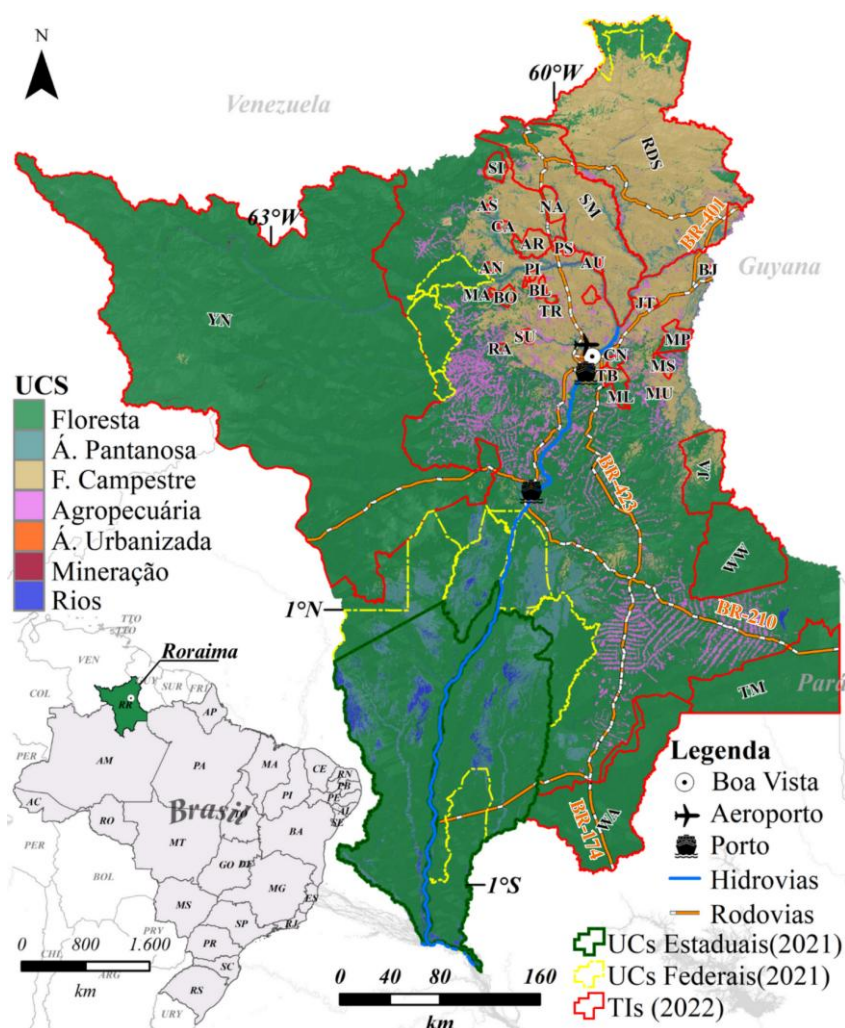


Figura 1 - Mapa de localização do estado de Roraima (RR) no norte do Brasil, fazendo fronteira ao norte com a Venezuela e a Leste com a Guiana, ao sudeste com o estado do Pará e ao sudoeste com o estado do Amazonas. As siglas apresentadas no mapa: UCS – Usos e coberturas de solo, UCs - Unidades de Conservação, TIs - Terras Indígenas: AN-Anta, ANL-Aningal, AR-Araça, AS-Ananás, AU-Ouro, BJ-Bom Jesus, BL- Barata/Livramento, BO-Boqueirão, CA-Cajueiro, CN-Canauanim, JA-Jacamim, JT-Jabuti, MA-Mangueira, ML-Malacacheta, MP-Manoá/Pium, MS-Moskow, MU-Muriru, NA-Anaro, PI-Pium, PS-Ponta da Serra, RA-Raimundão, RDS-Raposa do Sol, SI-Santa Inez, SM-São Marcos, SM-Serra da Moça, SU-Sucuba, TB-Tabalascada, TM-Trombetas/Mapuera, TR-Truaru, WA-Waimiri-Atroari, WW- Wai Wai, YN-Yanomami. Fonte: modificado de Mapbiomas (2024), IBGE (2024).

As vias terrestres e fluviais são as principais rotas de acesso a Roraima, sendo estratégicas para a integração do estado com outras regiões do Brasil e da América do Sul. A principal via terrestre é a BR-174, que conecta Boa Vista, a capital do estado, à capital do estado do Amazonas (Castro *et al.* 2018). No entanto, a BR-174 enfrenta desafios em sua conservação devido ao uso intensivo e às condições climáticas (Ferreira *et al.* 2019, Silva & Miranda 2023).

As hidrovias também desempenham um papel fundamental no transporte em Roraima e em toda a região amazônica. O principal curso d'água do estado é o Rio Branco, que conecta as populações ribeirinhas e possibilita o transporte devido à sua navegabilidade, especialmente do centro ao sul do Estado (Silva & Miranda 2023). Isso é essencial devido ao alto fluxo de bens, mercadorias e pessoas que necessitam de um meio de transporte eficiente (Arruda-Barbosa *et al.* 2020).

3.2 CLIMA E PRECIPITAÇÃO

Em Roraima, a média anual de precipitação pluviométrica é de aproximadamente 1500 mm, porém esse valor pode variar dependendo das diferentes regiões. A precipitação média anual tende a aumentar no sentido nordeste-sudoeste, onde, no Nordeste, a média anual é em torno de 1500 mm, enquanto no Noroeste pode atingir de 2000 a 2500 mm (Figura 2). Essa tendência de aumento das precipitações se estende pelo oeste do Estado, enquanto, na porção centro-leste, as precipitações médias anuais variam entre 1500 e 2000 mm (Barbosa & Fearnside 2005, Urquiza *et al.* 2018).

Os tipos climáticos do estado foram classificados de acordo com Köppen, apresentando uma estreita correlação espacial com os aspectos fisiográficos e vegetativos da área de estudo. Eles são: Af (clima equatorial de floresta), Am (clima de monção) e Aw (clima de savana) (Alvares *et al.* 2013). Essas variações nas vegetações são acompanhadas por diferentes tipos de precipitações (Figura 2). As áreas com maior precipitação coincidem com as regiões de floresta amazônica no Oeste, enquanto os ecossistemas de savana predominam nas partes norte e central (Barbosa & Fearnside 2005).

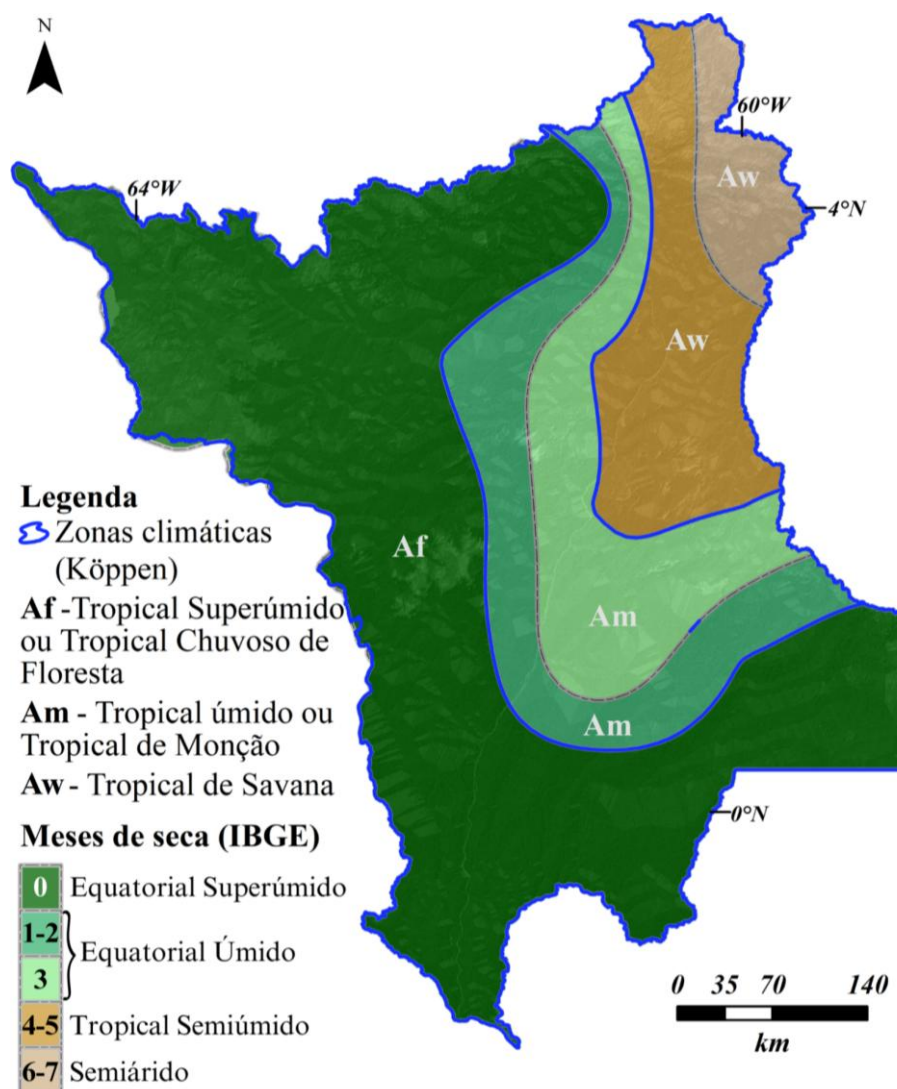


Figura 2 - Zonas climáticas no estado de Roraima segundo Köppen e IBGE. Fonte: Modificado de Wankler (2022), INMET (2017), ANA (2017) e IBGE (2011).

Segundo os dados modelados por Barni *et al.* (2020), foram modeladas as distribuições em escala mensal com dados do período de 1998-2018, utilizando os dados do WORDCLIM e da *The Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Um dos principais resultados dessa pesquisa foi a estimativa da concentração percentual das chuvas em função dos tipos climáticos, onde Af se concentra entre março e agosto (63,5%), com pico em maio, enquanto Am e Aw apresentam maior precipitação entre abril e setembro, com picos em junho, concentrando 73,3% e 82,3% das chuvas, respectivamente (Figura 3). No entanto, o estado não está imune a períodos de fenômenos extremos marcados por incêndios que atingiram áreas de até 11.000 km², como os ocorridos em abril de 2016, após dois anos consecutivos do fenômeno El Niño (Fonseca *et al.* 2017, Silva Junior *et al.* 2019).

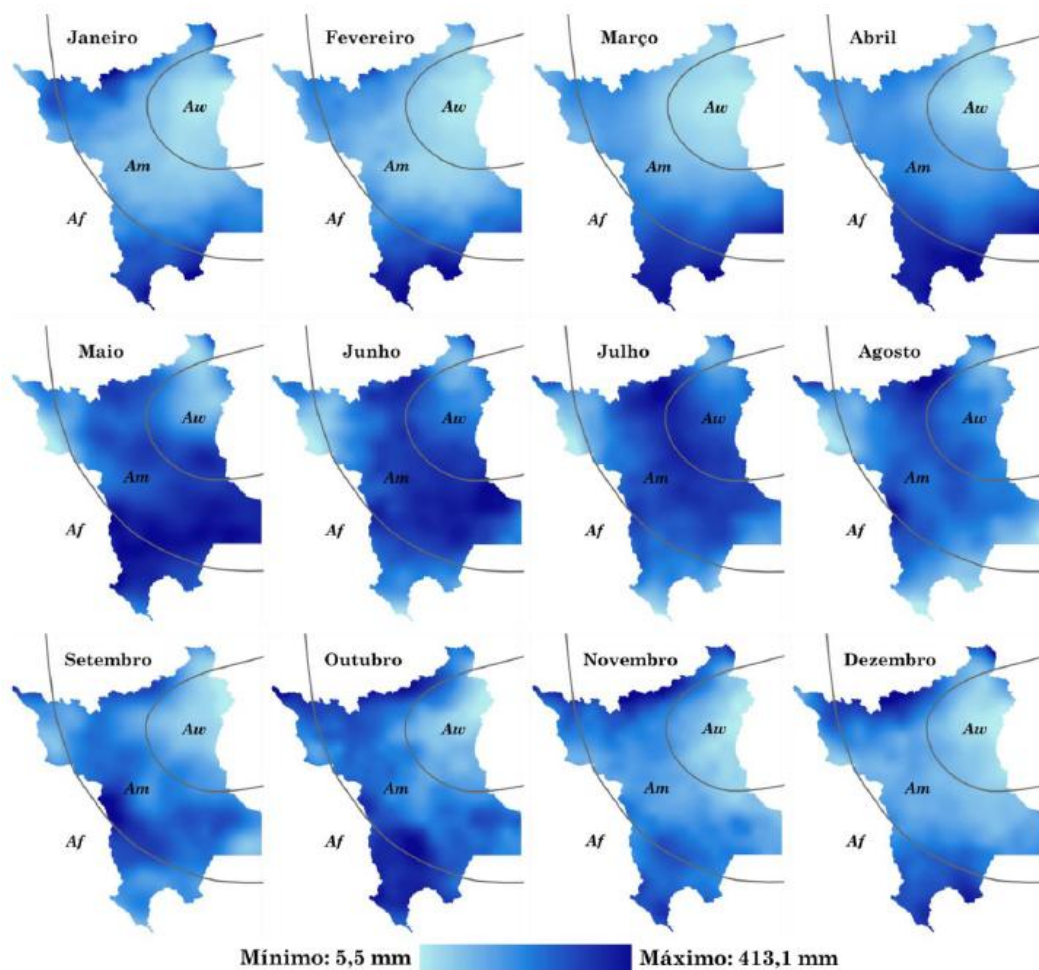


Figura 3 - Distribuição da precipitação média mensal em Roraima a partir dos dados 1998 - 2018. Fonte: (Barni *et al.* 2020b).

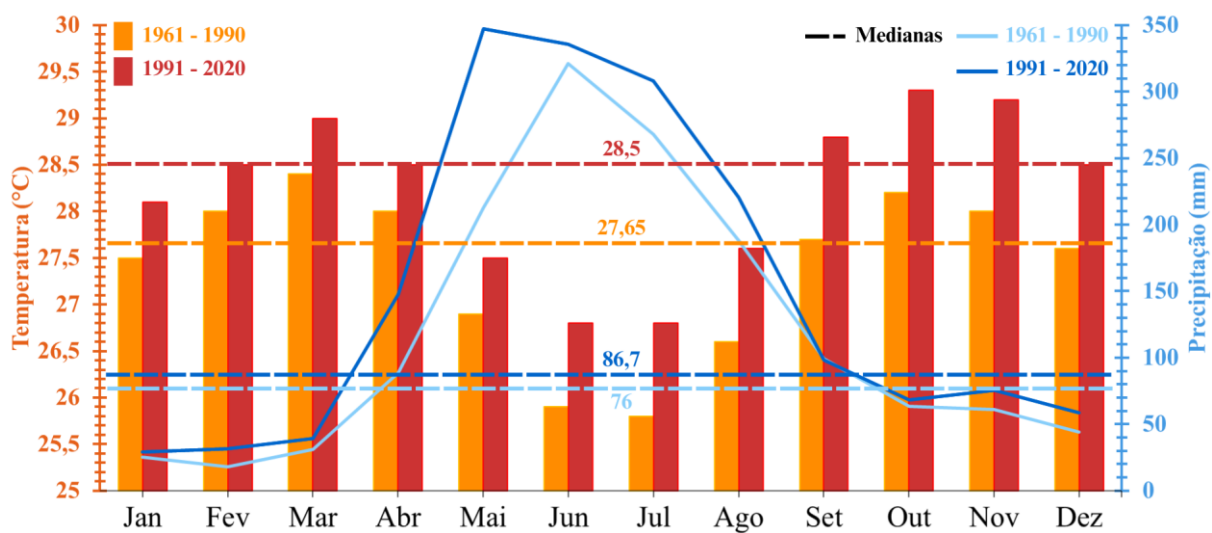


Figura 4 - Valores médios mensais e anuais de Temperaturas do ar e de Precipitações para Boa Vista, RR, nos períodos de 1961-1990 e de 1991-2020. Fonte: Modificado de (Araujo *et al.* 2024).

Esses eventos catastróficos superaram os incêndios históricos de 1997-1998 (Barbosa & Fearnside 1999). Esses fenômenos, apesar de parecerem isolados, levaram a uma redução nas precipitações nas últimas três décadas e a um aumento das temperaturas (Araujo *et al.* 2024). A posição da capital de Roraima em um clima equatorial úmido gera temperaturas médias mensais que variam entre 24 °C e 29,3 °C (Figura 4), sendo a mediana anual dos anos de 1991 a 2020 de 28,5 °C, em comparação com a mediana de 27,55 °C registrada em Roraima no período de 1961 a 1990 (Araujo *et al.* 2024).

3.3 GEOLOGIA

A área de estudo se insere na plataforma sul-americana, que constitui a base do continente homônimo. Essa plataforma é composta principalmente por rochas precoces, que são cercadas por formações rochosas um pouco mais recentes, como a orogenia andina a oeste e a plataforma patagônica ao sul (Alkmim 2015). Ao contrário dos Andes (Figura 5), que estão submetidos a um alto dinamismo tectônico, a plataforma goza de estabilidade, atribuída a suas origens cratônicas (Ciardelli *et al.* 2022). Eventos geodinâmicos influenciaram a Plataforma Sul-Americana (Figura 1 A), como vários processos de subducção, rifteamento e levantamento tectônico. As interações entre esta plataforma e a Placa de Nazca deram origem à Cordilheira dos Andes por meio de esforços tectônicos compressivos (Sobolev & Babeyko 2005).

O levantamento da Cordilheira dos Andes é especialmente importante, pois, graças a esse evento tectônico, ocorreram mudanças significativas na topografia, no clima e na hidrogeologia do continente (Rohrmann *et al.* 2016). Esses efeitos podem ser evidenciados na Bacia Amazônica, já que a subducção da Placa de Nazca levou à reorganização dos padrões de drenagem ao longo da plataforma (Flament *et al.* 2015). A relação entre os levantamentos tectônicos e a erosão foi responsável pela formação das redes de drenagem dos grandes rios que integram a Bacia Amazônica (Figura 5). Esse processo influenciou diretamente a distribuição dos sedimentos ao longo da plataforma (Poveda *et al.* 2014). No caso do rio Branco, em Roraima, a direção do fluxo da bacia mudou do Plioceno Inferior ao Pleistoceno. Inicialmente, o rio desaguava no Essequibo, mas posteriormente passou a desembocar no rio Amazonas, alterando assim sua direção de fluxo de Norte a Sul (Albert *et al.* 2018).

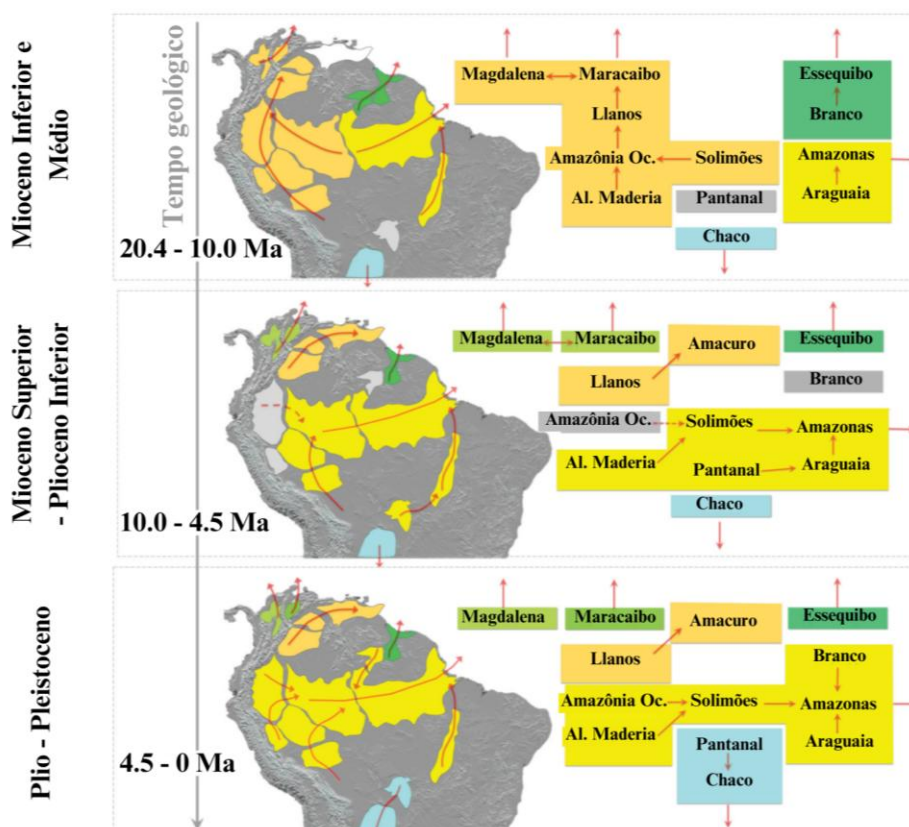


Figura 5 - As bacias que drenam para o Caribe estão em laranja, as que contribuem para o Amazonas transcontinental em amarelo, as que fluem para o Atlântico Norte em verde e as que deságuam no Atlântico Sul (La Plata) em azul. O modelo à direita mostra a evolução da paisagem, com setas vermelhas indicando o fluxo predominante de água e sedimentos. As conexões em cinza são incertas devido à falta de dados, enquanto a bacia em branco é completamente marinha. Os nomes “Amazônia Oc.”, “Llanos”, “Amazonas” e “Essequibo” agrupam várias bacias sedimentares. O mapa base inclui linhas costeiras e topografia moderna para orientação.

Um dos componentes representativos da placa sul-americana é o Cráton Amazônico (Figura 6 A). Ele é cercado por cinturões móveis (Figura 6 C), incluindo o evento Transamazônico ao norte, que moldou a região ao longo do tempo geológico (Kroonenberg & Roever 2009, Neves 2003). A composição do Cráton Amazônico é diversificada, incluindo formações de granito e greenstone belts, além de sequências vulcano-sedimentares formadas durante o Ciclo Transamazônico, quando ocorreu a colisão entre o Cráton Ocidental Africano e o Cráton Amazônico (Figura 6 B) (2,25-2,00 Ga) (Kioe-A-Sen *et al.* 2016, Kroonenberg *et al.* 2016a).

A formação de importantes depósitos de Au e Cu são atribuídas aos processos geodinâmicos associados ao evento Transamazônico (Figura 7) (Juliani *et al.* 2021, Tassinari *et al.* 2003). As rochas siderianas (2,50-2,30 Ga) e riacianas (2,30-2,05 Ga) são particularmente notáveis, pois representam períodos significativos de desenvolvimento

da crosta continental dentro do Cráton Amazônico (Macambira *et al.* 2022, Vieira *et al.* 2022).

Dois escudos compõem um dos núcleos pré-cambrianos mais extensos da Terra. O Cráton Amazônico integra o Escudo das Guianas ao norte e o Escudo do Brasil Central ao sul da Bacia Amazônica (Ibañez-Mejia & Cordani 2019). Segundo Reis *et al.* (2000), entre 2,5 e 1,6 Ga, formaram-se as rochas mais antigas que compõem o Escudo das Guianas, sendo registadas na era Paleoproterozoica. Por outro lado, eventos importantes no centro do escudo das Guianas, como o magmatismo charnockítico, ocorreram há cerca de 1,94 a 1,93 Ga (Fraga *et al.* 2009a). A geologia do Estado de Roraima, composta principalmente por antigas rochas pré-cambrianas, foi moldada por vários processos tectônicos, incluindo orogenias, falhas e atividades vulcânicas, que contribuíram coletivamente para suas características geoquímicas únicas.

3.3.1 Cinturões do Eo-Orosiriano

Os cinturões do Eo-Orosiriano (Figura 7), dos quais fazem parte a Suíte Trairão e o Complexo Anauá, integram eventos de maior escala, influenciados pela amalgamação de fragmentos continentais antigos e atividades tectônicas posteriores. Este conjunto estrutural do Escudo Guianense, localizado no centro-norte, especialmente em Roraima, exhibe uma configuração fóssil de cinturão dobrado e corrido, indicativa de tectônica compressiva que ocorreu durante o Paleoproterozoico (Mendes *et al.* 2022). Segundo (Mendes *et al.* 2022) os lineamentos NE-SO e a foliação vertical expressam uma complexidade estrutural explicada por processos de reativação tectônica e metamorfismo.

Tanto a Suíte Trairão quanto o Complexo Anauá exibem características geoquímicas derivadas diferentes, refletindo a tectônica e o magmatismo. A Suíte Trairão é caracterizada por magmatismo granítico calcoalcalino a alcalino, com uma notável presença de granitos peraluminosos datados entre (2.10-2.02 Ga), indicando uma prolongada atividade magmática (Kroonenberg *et al.* 2016). Por outro lado, o Complexo Anauá é composto por variados grupos litológicos, que incluem rochas metavulcânicas e metasedimentares, as quais passaram por significativos eventos tectônicos e térmicos, gerando diversas facetas metamórficas (Almeida & Macambira 2007).

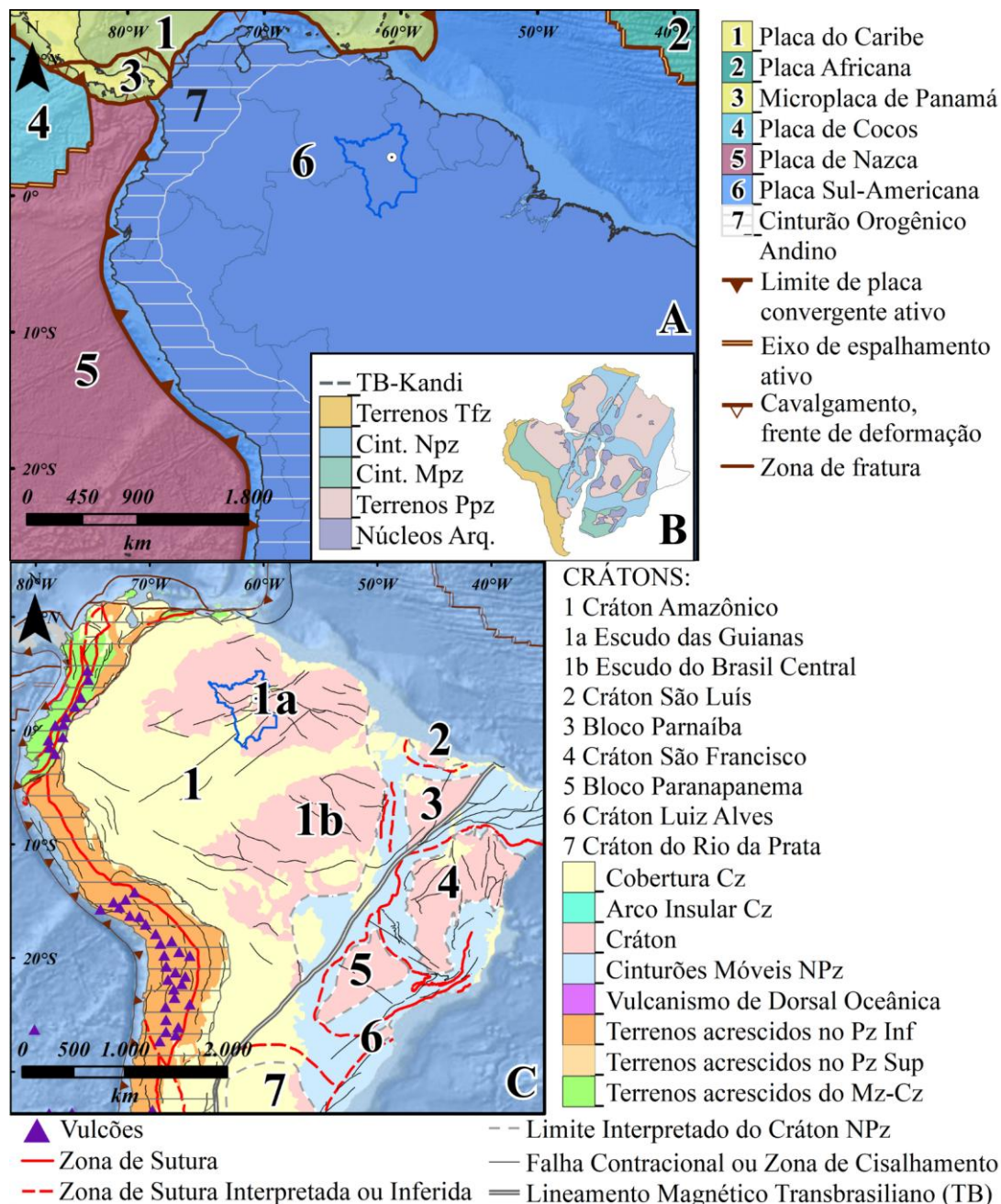


Figura 6 - A. Contexto tectônico de Roraima e entorno da placa Sul-Americana. B. Reconstrução esquemática do Oeste de Gondwana e corredor tectônico Transbrasiliano-Kandi (TB-Kandi). C. Crátons Sul-Americanos. Fonte: Modificado de Cordani *et al.* (2016).

Segundo Fraga *et al.* (2024), os cinturões do Orosiriano são derivados de diversos eventos e apresentam interpretações interessantes sobre sua gênese. Dentre eles, destacam-se o Cinturão Cauarane-Coereoni (Figura 7), datado de 2025 a 2000 Ma, que corresponde à fase colisional da Orogenia Akawai, o Cinturão Ígneo Oricama, datado de 1,99 a 1,96 Ga, caracterizado pelo magmatismo pós-colisional de alto nível cortical, e o Cinturão do Rio Urubu, com idades entre 1,96 e 1,92 Ga, onde se encontram granitoides profundamente empotrados.

O Cinturão Cauarane-Coereoni é composto majoritariamente por rochas metamórficas antigas, como gnaisses e granitos, que passaram por grandes transformações geológicas ao longo de bilhões de anos. O desenvolvimento geológico do Cinturão Cauarane-Coereoni pode ser segmentado em várias etapas fundamentais, especialmente durante a época Paleoproterozoica, que abrange o magmatismo do fundo oceânico, a formação de arcos vulcânicos e um metamorfismo de grande magnitude (Kroonenberg *et al.* 2016a). A evolução tectônica também levou à colisão de vários blocos da crosta, o que favoreceu o surgimento de rochas metamórficas de grande magnitude e a criação de facetas de granulito, observadas principalmente ao oeste do Suriname (Klaver *et al.* 2015).

Em relação à composição mineral, o cinturão Cauarane-Coereoni possui uma rica diversidade de rochas, incluindo gnaisses tonalíticos e granodioríticos, o que sinaliza a história magmática da região (Macambira *et al.* 2022). Além disso, apresentam-se altos graus de metamorfismo associados à presença de zircão, granada e biotita. Segundo Cordani *et al.* (2010), a composição mineralógica se distingue pela existência de elementos terras raras (ETR) e elementos de alta intensidade de campo (HFSE), os quais frequentemente estão relacionados às intrusões de granito e pegmatito presentes na região. Outras dinâmicas atribuídas aos fluidos associados à atividade tectônica tendem a facilitar o deslocamento de metais a partir das profundezas, possibilitando a presença de ouro e outros elementos (Cordani *et al.* 2010, Salier *et al.* 2005).

3.3.2 Cinturão Orocaima

Localizado ao norte de Roraima, na fronteira com a Venezuela, passou por ambientes magmáticos pós-colisionais ocorridos durante os períodos Mesoproterozóico Tardio até o Neoproterozóico Inicial (Mendes *et al.* 2022). O Cinturão está associado a rochas vulcânicas e granitoides. A formação geológica do Cinturão Ígneo de Orocaima (Figura 7) tem uma estreita relação com os processos tectônicos que moldaram o Escudo da Guiana, incluindo a amalgama de fragmentos continentais e os eventos subsequentes de rifting que favoreceram o crescimento das províncias ígneas. Eventos como a colisão entre os cratões Amazônico e Africano Ocidental geraram dobras e empurrões. O contexto tectônico criou condições propícias para a produção de magma por meio do derretimento parcial da crosta inferior, resultando nas diversas rochas vulcânicas e plutônicas que podem ser observadas atualmente (Mendes *et al.* 2022).

A composição das rochas ligada à atividade magmática do Cinturão Ígneo de Orocaima possui características máficas e félsicas, permitindo observar uma grande diversidade mineralógica com quantidades significativas de quartzo, feldspatos e minerais máficos como biotita e anfibólio, típicos das rochas vulcânicas e graníticas mencionadas anteriormente, formadas em um ambiente pós-colisional. Estas rochas possuem mineralogias enriquecidas em K, Rb e Th, enquanto por outro lado, apresentam esgotamento em elementos como Ba e Ti. A relação entre esses elementos pode ser interpretada como proveniente de magmas que passaram por uma diferenciação significativa e pelos materiais encontrados na crosta (Zhang *et al.* 2022). O hidrotermalismo também está relacionado às anomalias de ETR que ocorrem durante e após eventos magmáticos (Mendes *et al.* 2022).

3.3.3 Grupo Parima

Caracterizado principalmente por rochas sedimentares siliciclásticas. A presença de rochas vulcânicas e graníticas na região também indica um ambiente geológico em transformação que impactou a configuração da paisagem atual (Almeida & Macambira 2007). Situado na Província Geológica de Tapajós-Parima, é um componente relevante na geologia da zona amazônica, caracterizado pela interação de processos tectônicos e sedimentares que remontam ao Paleoproterozoico. As investigações mostram que a estrutura geológica do Grupo Parima se destaca por uma variedade de rochas ígneas (Figura 7), metamórficas e sedimentares, que se originaram em uma orogenia oceano-contidente ocorrida entre 2,10 - 1,87 Ga (Juliani *et al.* 2005). Essa orogenia faz parte de um evento maior denominado Ventuari-Tapajós, que é essencial para compreender a evolução tectônica da América do Sul durante a era Orosiriana (Chaves & Fonseca 2017).

3.3.4 Grandes províncias

No Norte e no Sul, encontram-se três grandes províncias cortadas pelas coberturas fanerozoicas que cruzam o estado na direção NE-SO: as Grandes Províncias Ígneas (LIP), bacias do tipo rift-sag, como a Bacia de Roraima, e as Grandes Províncias Ígneas Silícicas (SLIP) (Figura 7).

3.3.5 Grande Província Ígnea (LIP):

No Escudo das Guianas encontram-se as Grandes Províncias Ígneas (LIPs), que representam eventos associados à dinâmica magmática do manto, bem como aos ciclos continentais (Chaves & Fonseca 2017, Ernst 2007). O efeito das plumas mantélicas no

escudo gerou um ambiente ideal para um magmatismo máfico-ultramáfico (Reis *et al.* 2021).

Segundo a datação realizada por Reis *et al.* (2013) no Escudo das Guianas, mais precisamente em Roraima, a LIP de Avanavero é um exemplo significativo desse tipo de evento magmático, ocorrido há 1,79 Ga, no final do Paleoproterozoico. A região é marcada por extensos enxames de diques e derrames basálticos, associados a um magmatismo de altas temperaturas, vinculado a processos de fusão parcial do manto. As assinaturas geoquímicas desse processo também indicam que os magmas tiveram contribuições mantélicas com possíveis interações crustais. Como parte do evento, a formação de depósitos de Ni-Cu está associada ao sistema máfico-ultramáfico e a essa metalogênese (Reis *et al.* 2013).

Além disso, o magmatismo da LIP de Avanavero máfico-ultramáfico está relacionado a processos de rifteamento, que favoreceram o desenvolvimento térmico da litosfera e a fragmentação continental (Alkmim 2015).

3.3.6 Bacia do tipo rift-sag Roraima

Esta bacia está inserida no cráton amazônico e se destaca pela complexa interação de processos sedimentares e vulcânicos, revelando um ambiente em constante mudança durante sua formação (Alkmim 2015). O registro geológico de Roraima indica que ela se originou em um contexto de rifte, onde as forças de extensão resultaram na inundação da bacia e na acumulação de sedimentos, posteriormente atravessados por materiais vulcânicos dos LIPs adjacentes. A bacia de Roraima apresenta uma composição geoquímica diversificada, abrangendo rochas vulcânicas tanto máficas quanto silícicas, o que sugere um ambiente magmático de transição, influenciado por diferentes níveis de interação cortical (Alkmim 2015).

3.3.7 SLIP Uatumã

Esta província se distingue por um passado geológico marcado por intensa atividade vulcânica e plutônica, o que contribui para sua composição singular e relevância tectônica. O passado geológico do SLIP de Uatumã está intimamente relacionado aos processos de rifteamento continental e ao magmatismo subsequente (Figura 7). Considera-se que os granitos calco- alcalinos encontrados nessa província fizeram parte de arcos magmáticos em ambientes orogênicos, diferenciando-se, assim, dos tipos anorogênicos geralmente associados a episódios intraplaca (Fraga *et al.* 2024, Reis *et al.*

2022).

A atividade vulcânica do SLIP é representada pelo grupo Iricoumé, composto por rochas vulcânicas félsicas com propriedades geoquímicas semelhantes às dos granitos do tipo A2, além de apresentar uma alta razão Y/Nb (Ferron *et al.* 2010). Os magmas associados à província estão vinculados a rochas alcalinas potássicas. Fáceis do granito albita são fortemente mineralizadas com Sn e apresentam teores anômalos de Nb, Rb, Zr e ETR (Costi *et al.* 2000). O contato entre fluidos hidrotermais e as rochas vulcânicas pode ter impactado a redistribuição de elementos terras raras e outros minerais de importância econômica. A existência de granitos do tipo A e suas características de mineralização associadas ressaltam ainda mais a diversidade geoquímica da província, indicando um grande potencial de recursos minerais econômicos (Reis *et al.* 2021).

3.3.8 Magmatismo Mesoproterozóico (Suítes Tipo-A)

Esta suíte magmática se distingue por uma diversidade de estruturas geológicas, entre as quais se incluem granitoides e rochas vulcânicas, formadas durante um período de intensa atividade tectônica ocorrida há cerca de 1,54 a 1,45 Ga (Figura 7). As características geológicas dessa suíte abrangem a presença de granitoides rasos e rochas vulcânicas associadas, com destaque especial para o Cinturão Ígneo de Orocaima, datado entre 1,99 e 1,96 Ga. Segundo Souza & Nogueira (2009), esses tipos de estruturas indicam magmatismo tanto sin-colisional quanto pós-colisional, evidenciando uma transição de processos magmáticos calco-alcalinos para anorogênicos. A Suíte Tipo A é composta principalmente por granitos (Figura 7), com consideráveis contribuições de rochas máficas e intermediárias. Normalmente, os granitoides estão associados a rochas vulcânicas que exibem uma variedade de assinaturas geoquímicas, indicando sua formação em condições tectônicas mutáveis. Por exemplo, a suíte calco-alcalina Água Branca simboliza uma fase sin-colisional, enquanto o magmatismo anorogênico subsequente é caracterizado por granitos do tipo A, geralmente associados à tectônica extensional.

3.3.9 Cinturão de Retrabalhamento Crustal K'Mudku

O Cinturão K'Mudku simboliza uma fase de profunda reestruturação da crosta, caracterizada pela reativação de estruturas preexistentes e pela criação de novas características geológicas por meio de processos tectônicos (Figura 7). Este cinturão está associado à deformação transpressional, relacionada ao Evento K'Mudku, um importante

evento tectônico que impactou o nordeste do Estado de Roraima (Figura 7). Considera-se que esse evento tenha reativado as estruturas do embasamento, resultando na formação de dobras de arraste nas camadas supracrustais, conforme evidenciado por pesquisas recentes (Cordani *et al.* 2016, D'Agrella Filho *et al.* 2022, Santos *et al.* 2002, Souza *et al.* 2015). Essas evidências são observadas na presença de granitoides superficiais e rochas vulcânicas do Cinturão Ígneo de Oroaima, que estão intercaladas por sequências sedimentares da Formação Arai. Esses processos formativos no cinturão indicam sinais de maior atividade tectônica ocorrida durante o Mesoproterozóico. Além disso, a Reformulação/Retrabalhamento da crosta nesse período implicou transformações geológicas significativas, incluindo o reciclo de materiais crustas mais antigos e a introdução de novos componentes magmáticos (Augustsson *et al.* 2016).

3.3.10 Cobertura Fanerozoica

A cobertura Fanerozoica do Cráton Amazônico se destaca especialmente por suas bacias sedimentares (Figura 7), que evidenciam a intrincada interação entre a tectônica, a sedimentação e as variações climáticas. O registro sedimentar do Cráton Amazônico é caracterizado principalmente pelas bacias intracratônicas do Paleozoico e Mesozoico, como as bacias do Solimões e Amazonas, que segmentam o cráton em diferentes províncias geológicas, sendo o Escudo das Guianas ao norte e o Escudo de Guaporé ao sul, respectivamente (Finger *et al.* 2021, Pedreira & Bahia 2000). A interação entre os sedimentos Fanerozoicos e o embasamento cratônico é fundamental para compreender a conexão entre a cobertura Fanerozoica e o embasamento pré-cambriano subjacente, e assim entender a história geológica do Escudo das Guianas.

As rochas do embasamento, compostas principalmente por antigas estruturas graníticas e metamórficas, fornecem uma base sólida sobre a qual se assentaram as primeiras sequências sedimentares. Essa relação evidencia um passado geológico extenso, no qual o embasamento sofreu significativos processos tectônicos e erosivos, originando a configuração estratigráfica atual (Ibañez-Mejia 2019, Ibañez-Mejia & Cordani 2019).

Em Roraima, se destaca a sedimentação do Grupo Roraima, gerada pelo soerguimento e erosão do embasamento Pré-Cambriano. Este foi o maior fornecedor de material sedimentar durante o Fanerozoico (Fonseca *et al.* 2024, Mendes *et al.* 2022).

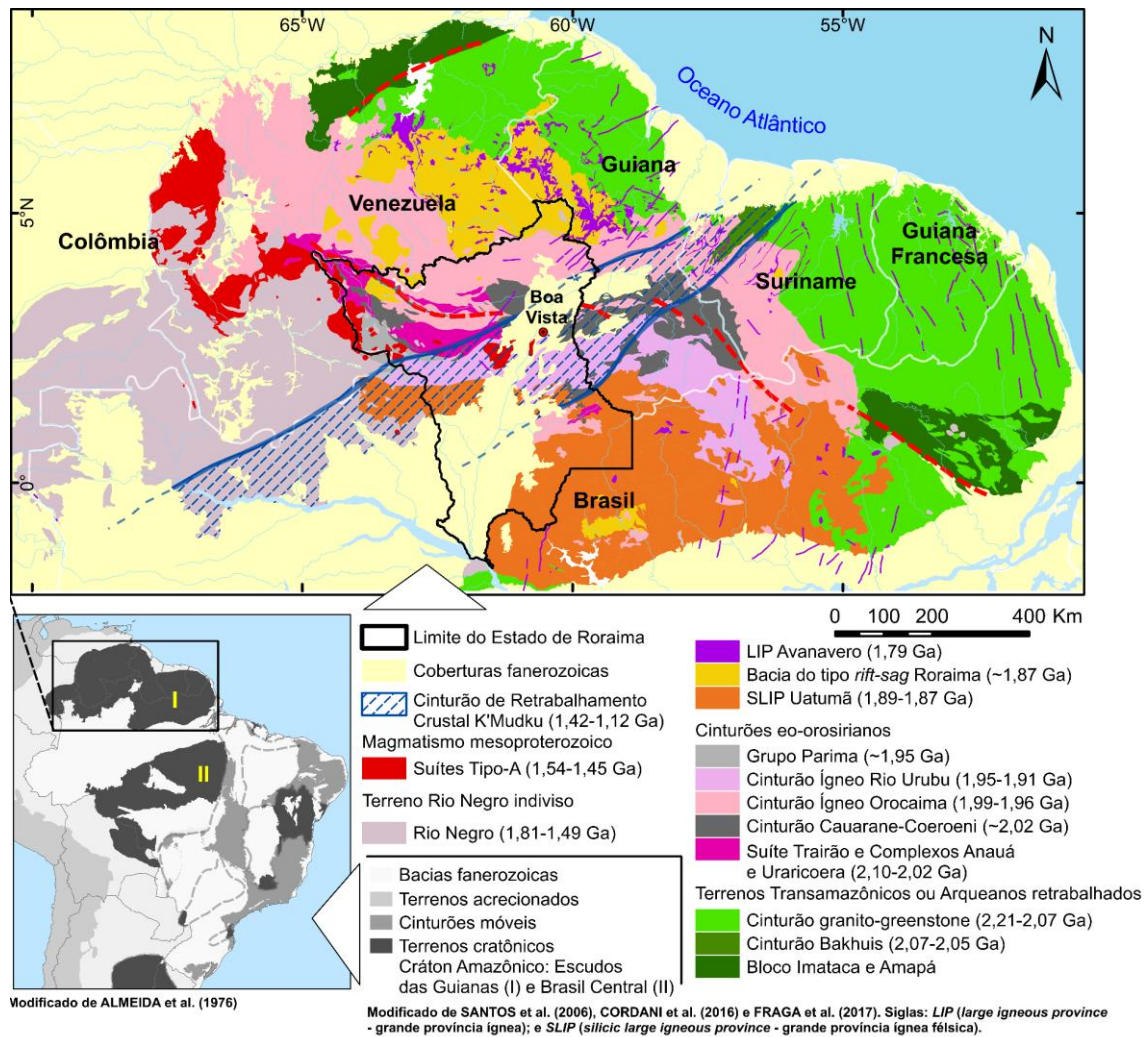


Figura 7 - Encarte tectônico do escudo das Guianas. Fonte: (Mendes *et al.* 2023).

3.4 DOMÍNIOS TECTONOESTRATIGRÁFICOS DE RORAIMA

As características litológicas, estruturais e tectônicas foram utilizadas por Reis *et al.* (2003) para delimitar quatro domínios litoestruturais, que são: Domínio Urariquera, Domínio Cinturão Central de Guiana, Domínio Parima e Domínio Anauá-Jatapú (Figura 8). Esse modelo foi modificado ao longo dos anos, graças aos novos mapeamentos que integram estudos litoestruturais e geocronológicos, conforme demonstrado por Reis *et al.* (2000, 2006). O Domínio Urariquera mudou seu nome para Domínio Surumu. No nordeste do Estado de Roraima, entre os domínios Guiana Central e Surumu, foi delimitada uma área ocupada pelas coberturas Fanerozoicas. Os domínios estabelecidos foram referenciados por (Almeida *et al.* 2008, Almeida & Macambira 2007, Freitas & Marmos 2017).

3.4.1 Domínio de Surumu (DSU)

Segundo Freitas & Marmos (2017), o Domínio Surumu é composto pelo Grupo Surumu, de idade Proterozoica formado por rochas vulcanicas e sedimentares como basaltos, andesitos, riolitos, arenitos e siltitos, Formação Cachoeira da Ilha de idade mesoproterozoica composta por rochas vulcanicas como riolitos, ignimbritos e dacitos e rochas plutonicas como granitos e suítes intrusivas Pedra Pintada, composta predominantemente por granitoides, incluindo granitos e granodioritos, Aricamã constituída por rochas como dioritos, tonalitos e granodioritos, Mixiguana composta por rochas graníticas, frequentemente alcalinas e Saracura, de predominância de rochas máficas a ultramáficas, como gabros e peridotitos, com granitos subordinados (Mendes *et al.* 2023). Além disso, o Supergrupo Roraima, com predominancia de arenitos quartzosos, siltitos e conglomerados e Formação Tepequém composta por arenitos conglomeráticos, siltitos e material vulcânico subordinado representam processos mais recentes de deposição sedimentar, enquanto o magmatismo máfico é representado pelo Diabásio Avanavero e Suíte Máfico-ultramáfica Uraricaá (Uhlein *et al.* 2015). Outras rochas presentes são os paragneisses do Grupo Cauarane (Fraga *et al.* 2009a).

3.4.2 Domínio Guayana Central (DGC)

Localizado no centro do Estado, apresenta tendências estruturais NE-SO, com predomínio de gnaisses em fácies anfibolito sobre rochas em fácies granulito (1,96-1,93 Ga). Uma associação típica do Mesoproterozóico de Anortosito-Mangerito-Granito (1,56-1,53 Ga) intrude nas unidades mais antigas (Fraga *et al.* 2009b). A Suíte Rio Urubu e Serra da Prata estão presentes nesse domínio. A reativação Mesozoica facilitou a formação de grabens, abrangendo o domínio e incluindo também a Formação Apoteri, sedimentos da Formação Serra do Tucano e intrusões de rochas alcalinas da Suíte Intrusiva Apiaú (140 Ma) as intrusões tendem a estar em torno das rochas de Vila Campos Novos (Freitas & Marmos 2017).

3.4.3 Domínio Parima (DPA)

Localizado no oeste de Roraima, compreende amplos terrenos de granito-greenstone do período Transamazônico tardio até o pós-Transamazônico e apresenta foliações predominantemente NO-SE a E-O. Plútons graníticos e rochas vulcânicas, semelhantes às do Domínio Surumu, são subordinados. Além disso, estão presentes batólitos e estoques de granito rapakivi (1,55 Ga) (Santos *et al.* 2004), bem como coberturas sedimentares. Neste domínio, se encontra uma ampla porção do Graben do

Tacutu, com a presença da Suíte Metamórfica Rio Urubu, composta principalmente por ortognaisses, paragnaisses, anfibolitos e, em menor proporção, granulitos e da Suíte Intrusiva Serra da Prata onde predominam granitos, granodioritos, tonalitos e monzogranitos, além de algumas rochas máficas associadas, como gabros (Mendes *et al.* 2023).

3.4.4 Domínio Uatumã-Anauá (DUA)

Este domínio está localizado no sudeste de Roraima e inclui um magmatismo extenso de granitos (2,03-1,81 Ga) e rochas supracrustais com foliações NO-SE (e NE-SO), deformadas sob condições de fácies xisto-verde até anfibolito. Segundo o Almeida & Macambira (2007), no intervalo de 1,97-1,96 Ga, estão presentes granitoides, gnaisses e migmatitos da Suíte Martins Pereira, bem como os metassedimentos do Grupo Uai-Uai. No intervalo de 1,90-1,81 Ga, ocorrem diversos corpos graníticos e metagraníticos de estágios evolutivos e idades distintas. Essas estruturas recebem as denominações de Suíte Intrusiva Água Branca, Suíte Metamórfica Jauaperi, Grupo Iricoumé, Suíte Igarapé Azul, Suíte Intrusiva Mapuera e Suíte Intrusiva Moderna. Além disso, esse território abriga rochas gnáissico-migmatíticas, agrupadas sob o nome de Complexo Anauá, com idade de 2,02 Ga (Almeida & Macambira 2007, Valério *et al.* 2021). As rochas da Formação Seringa são atribuídas ao Mesoproterozóico (1,2-0,9 Ga) (Santos *et al.* 2002).

3.4.5 Domínio das Coberturas Aluvionares (DCA)

Nomeada por autores como Fraga *et al.* (2024) como coberturas Fanerozoicas, o modelo de domínios classifica esta área como coberturas cenozoicas, que, por sua vez, na zona sul constitui o chamado "Pantanal Setentrional". Nesta área, a de menor altitude do Estado, encontram-se a Formação Içá e depósitos arenosos de áreas inundadas, bem como os sedimentos cenozoicos da região centro-nordeste do Estado, constituídos pelas Formações Boa Vista e Areias Brancas (Freitas & Marmos 2017). No Sul, também ocorre a presença de tufos vulcânicos. No centro-nordeste, se encontra se novamente uma área dominada pelo produto da erosão das formações que compõem os Grupos Surumu e Parima, ao norte do estado.

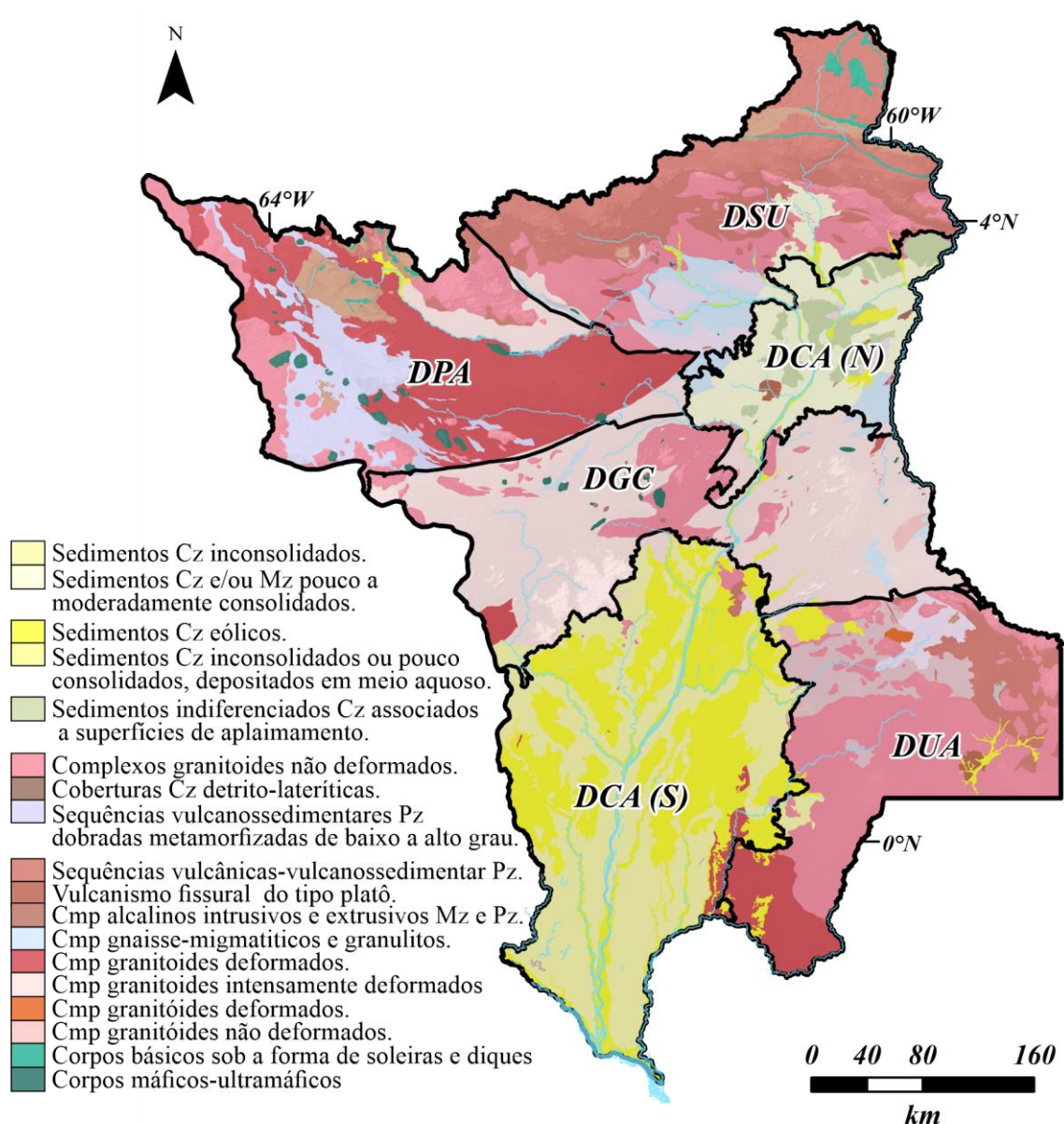


Figura 8 - Mapa geológico do estado de Roraima e seus domínios tectonoestratigráficos: Domínio de Surumu (DSU), Domínio Guiana Central (DGC), Domínio Parima (DPA), Domínio Uatumã-Anauá (DUA) e Domínio das Coberturas Aluvionares (DCA). Siglas: Cz - Cenozoico, Mz - Mesozoico, Pz - Paleozoico e Cmp - Complexo. Fonte: modificado de Almeida *et al.* (2007, 2008), Freitas & Marmos (2017), Reis *et al.* (2006).

3.5 SOLOS

Os solos do estado apresentam grande diversidade, resultado da interação entre a geologia, a vegetação e a variabilidade climática. Os ecossistemas locais, por sua vez, são influenciados pelos solos, assim como a agricultura.

Dentro dessa classificação, destacam-se os Latossolos, Argissolos, Gleissolos, Plintossolos, Neossolos Flúvicos e Neossolos Quartzarênicos. Os solos mencionados anteriormente costumam ser distróficos e ácidos, apresentando significativa variabilidade espacial (Benedetti *et al.* 2011, Melo *et al.* 2010). No entanto, os solos do tipo Latossolos (Amarelo e Vermelho-Amarelo) são os que cobrem a maior parte de Roraima (Figura 9), seguidos pelos Neossolos Litólicos (Vale Júnior *et al.* 2014).

A gênese dos solos está relacionada à geologia da região, caracterizada por sedimentos plioleistocênicos, rochas vulcânicas e diversos processos deposicionais. Fatores climáticos, como a precipitação associada às zonas ecológicas, favorecem a formação de solos profundos e bem arejados (Benedetti *et al.* 2011, Melo *et al.* 2010). As regiões sul e oeste do estado possuem a maior parte desses solos com essas características (Figura 9). Além disso, solos encontrados nas ilhas florestais de Roraima refletem esses processos geológicos e climáticos, complementados por estudos que relacionam a vegetação autóctone circundante (Feitosa *et al.* 2016, Mendonça *et al.* 2013).

Além da floresta, cerca de 28% do território de Roraima é coberto por savanas. Essas áreas, marcadas por colinas, paisagens planas e terras baixas, criam ecossistemas únicos, onde é possível observar uma transição gradual entre diferentes tipos de vegetação (Nascimento & Pacheco 2021). Em muitos casos, essas transições não ocorrem naturalmente e são consequência do desmatamento. As condições físico-químicas dos solos de savana apresentam variações de acordo com o tipo de manejo e as condições ambientais (Cruz *et al.* 2014, Lima *et al.* 2018).

Uma das consequências do uso intensivo do solo é o esgotamento de nutrientes, que já são naturalmente escassos. Uma solução para esse problema tem sido a presença de bancos de sementes nativas, estratégia que tem se mostrado eficaz na regeneração da flora local e, consequentemente, na recuperação dos solos. Esses projetos têm integrado comunidades indígenas e a sociedade civil do estado (Melo *et al.* 2010, Melo *et al.* 2021).

Um dos principais recursos de Roraima para mitigar os impactos da agricultura de forma sustentável é o crescimento de projetos de silvicultura sustentável. Essas iniciativas consideram a fertilidade dos solos, sua adequada adaptação e otimizam a produção agrícola (Silva *et al.* 2018).

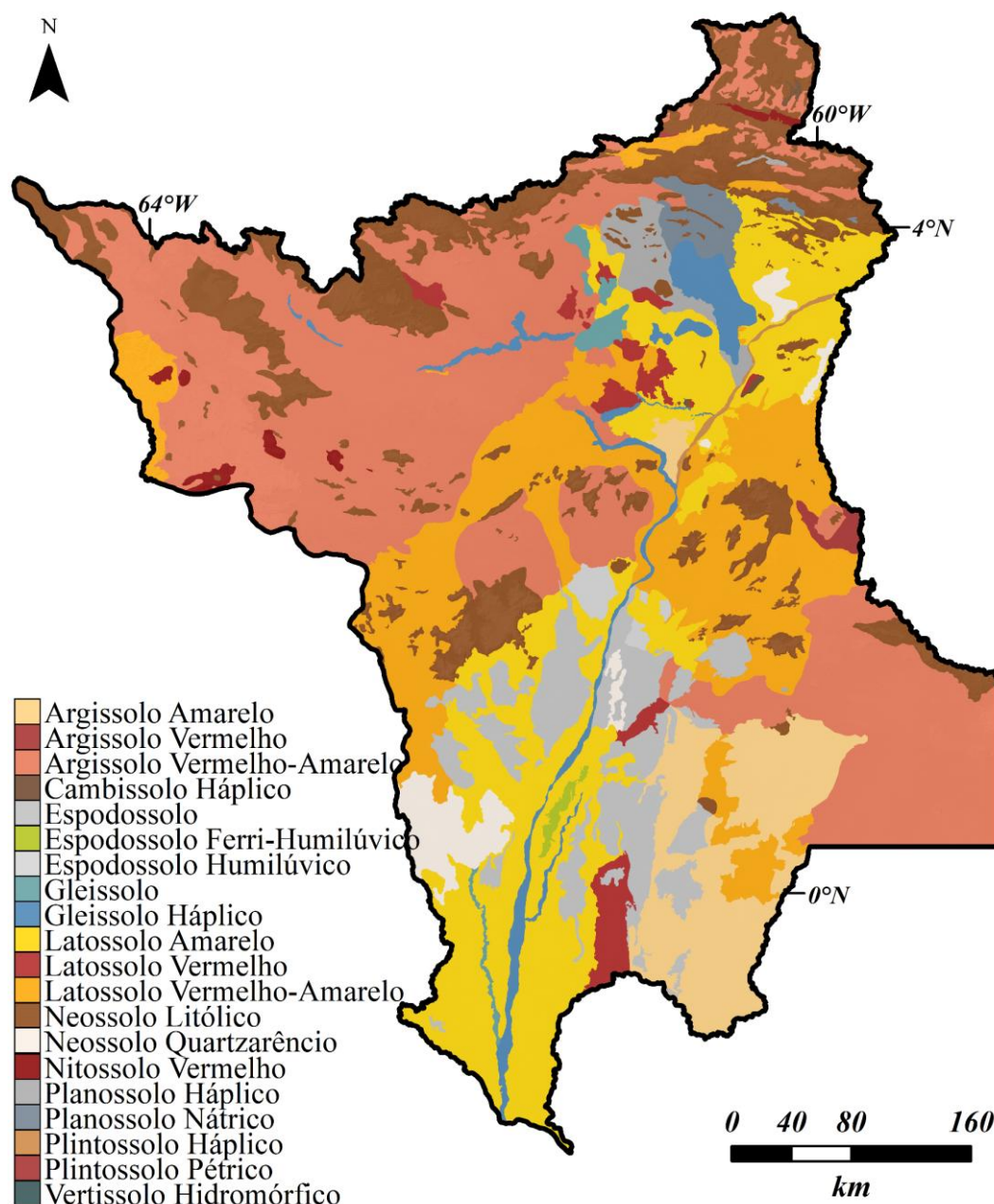


Figura 9 - Solos do Estado de Roraima. Fonte: Modificado de (Vale Júnior, 2016)

3.6 GEOMORFOLOGIA

A geomorfologia de Roraima se distingue por uma extensa diversidade de altitudes, que variam entre cerca de 80 a 2800 metros, gerando um abundante mosaico de irregularidades geográficas que abrange planaltos, colinas e vales (Falcão & Costa 2019). A fisiografia da paisagem da região é significativamente influenciada pelas flutuações climáticas. As variações de altitude influenciam não apenas os tipos de vegetação presentes, mas também a distribuição dos recursos hídricos e a biodiversidade em geral

(Fleischmann *et al.* 2020). Segundo Freitas & Marmos (2017), Roraima possui duas unidades morfoestruturais: terrenos proterozóicos do escudo das Guianas e o domínio dos terrenos Proterozóicos, este último coincidindo com as zonas das coberturas aluvionares, também delimitadas como um domínio tectonoestratigráfico (Figura 10).

As particularidades geomorfológicas de Roraima se intensificam devido à sua composição geológica, que inclui uma diversidade de litologias como gnaisses, granitos e rochas máficas. Essas estruturas geológicas contribuem para a singular diversidade pedológica observada na área, especialmente em ambientes de transição entre florestas e savanas. A existência de terrenos policíclicos, originados a partir dessas diferentes classes de rochas, ressalta a complexidade dos processos de formação dos solos na região (Vale Júnior *et al.* 2022). Além disso, os ecossistemas de savana em Roraima são moldados por condições geomorfológicas e hidrológicas específicas, que os diferenciam de outros tipos de savanas no Brasil (Duarte *et al.* 2018).

A hipsometria, técnica de medição e representação da elevação do terreno, desempenha um papel crucial na compreensão da dinâmica ecológica e hidrológica de Roraima. Essas condições determinam o potencial erosivo, e junto com a composição das rochas, definem as unidades geomorfológicas. Por sua vez, essas unidades podem ser aproveitadas conforme suas características, determinando seu uso. Segundo Beserra Neta & Tavares Júnior (2020), Roraima possui zonas de fragilidade litoestrutural em níveis altos, moderados e baixos, apresentados no mapa (Figura 10):

Norte do estado: A alta fragilidade erosiva nos relevos depende das escarpas das Coberturas Paleoproterozoicas e Cenozóicas, com inclinações acentuadas ($>45^\circ$) e sedimentos semi ou inconsolidados. Fragilidade moderada em relevos do Planalto do Interflúvio Amazonas-Orinoco, associados a rochas vulcânicas alteradas e cobertas por vegetação dispersa.

Noroeste do estado: Alta fragilidade em relevos tabulares das Coberturas Paleoproterozoicas, devido a inclinações e encostas abruptas. Fragilidade moderada em áreas dissecadas com altitudes entre 700 e 1.100 m e vegetação moderada.

Centro do estado: Baixa fragilidade nos Planaltos Residuais de Roraima, com rochas gnáissicas e granitoides cobertas por vegetação densa. Fragilidade moderada em ortognaisses básicos e áreas com vegetação mais dispersa.

Sul do estado: Fragilidade baixa a moderada em relevos planos e altitudes elevadas cobertas por florestas densas. Alta fragilidade em áreas com sedimentos arenosos inconsolidados na Depressão Rio Branco-Rio Negro (DrBN).

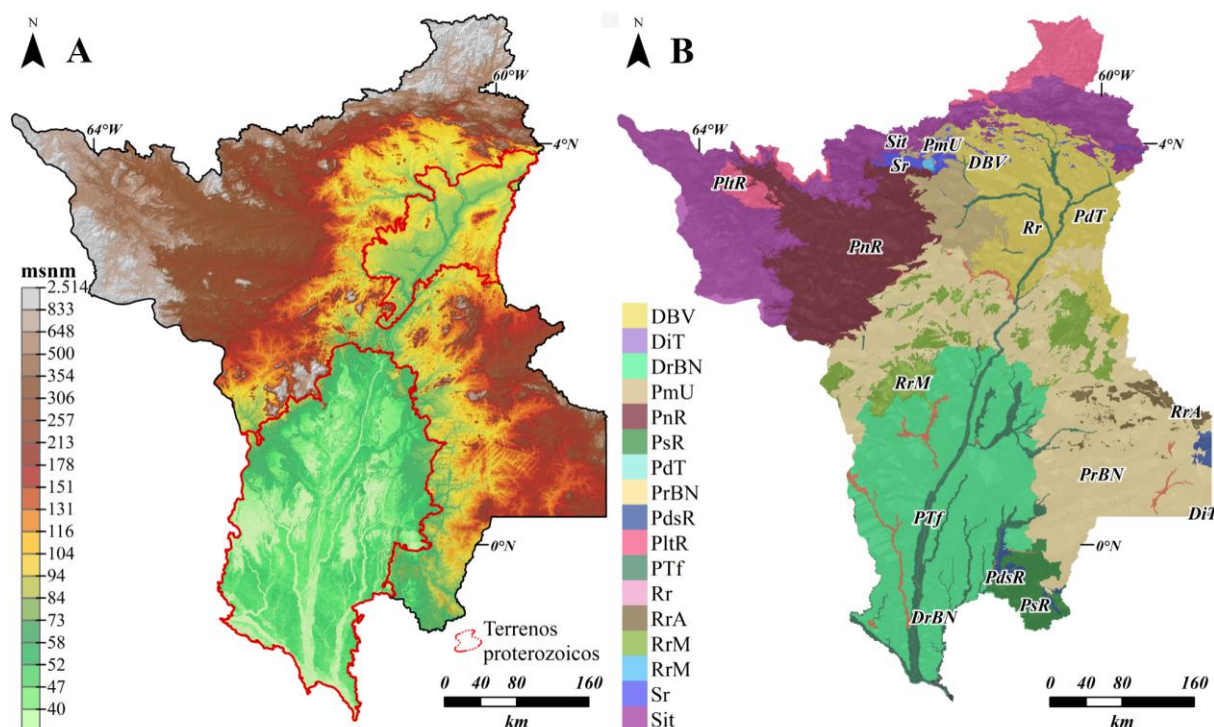


Figura 10 - Mapa hipsométrico do estado de Roraima com as áreas correspondentes aos terrenos proterozoicos (A) e unidades geomorfológicas do estado (B), incluindo: DBV - Depressão Boa Vista, DiT - Depressão Interplanáltica do Trombetas, DrBN - Depressão Rio Branco-Rio Negro, PmU - Patamar do Médio Uraricoera, PnR - Patamar do Norte de Roraima, PsR - Patamar do Sul de Roraima, PdT - Patamares Dissecados do Tacutu, PrBN - Pediplano Rio Branco-Rio Negro, PdsR - Planaltos Dissecados Sul de Roraima, PltR - Planaltos Tabulares de Roraima, PTf - Planícies e Terraços Fluviais, Rr - Relevos Residuais, RrA - Relevos Residuais Anauá, RrM - Relevos Residuais Mucajá, Serra do Tepequém, Sr - Serras Residuais e Sit - Serras do Interflúvio. Fontes: Modificado de Tavares Júnior (2020).

3.7 HIDROGRAFIA

O território roraimense está inserido na bacia do rio Amazonas, abrangendo três sub-bacias da margem esquerda do rio Negro (Figura 11 A). No nível três da organização da bacia hidrográfica do rio Negro, os rios de Roraima estão distribuídos, no sentido foz-montante, nas sub-bacias dos rios Jauaperi, Branco, Xeriuini e Jufari (Lemos *et al.* 2017). Uma integralmente, a do rio Branco, e duas parcialmente, as dos rios Jufari e Jauaperi, e parte da sub-bacia do rio Jatapú tributário do rio Uatumã afluente da margem esquerda do rio Amazonas (Vale Júnior *et al.* 2014). Conforme Wankler & Sander (2022), a área abrangida pelo estado de Roraima corresponde a 225.805,34 km². Este estudo abrange parte das bacias dos rios Branco, Jufari e Jauaperi (Figura 11 B). A área da bacia do rio

Branco é de 196.974 km², sendo 91% da área dentro do Brasil, 7% na Guiana e 2% na Venezuela. Enquanto isso, a área do rio Jufari é de 10.325,724 km², do rio Jatapú de 68.439,256 km² e do rio Jauaperi 30.561,452 km². Estes três rios desaguam diretamente no rio Negro.

Este estudo aborda, a bacia hidrográfica do rio Branco, localizada no extremo norte da região amazônica do país, adjacente à Venezuela e à Guiana. O rio Branco se destaca por ser um relevante afluente da margem esquerda do rio Negro, o qual, ao se encontrar com o rio Solimões, contribui para a formação do rio Amazonas. O rio Branco é o principal curso d'água da Roraima, e suas nascentes estão localizadas dentro da Terra Indígena Yanomami, próxima à fronteira com a Venezuela, onde recebe o nome de rio Uraricoera (Ramos Filho *et al.* 2024). Apesar de compreender a maior parte do estado de Roraima, esta bacia drena ainda terrenos localizados na República Cooperativista da Guiana (Sander *et al.* 2014), como os rios Tacutu e Maú ou Ireng, que servem de fronteira internacional (Lemos *et al.* 2017).

Os rios que compõem a bacia do rio Branco começam no Norte com o rio Surumu, que tem sua origem no monte Roraima. Segue o rio Tacutu, que demarca a fronteira com a Guiana, fluindo de sul para norte. O rio Uraricoera tem sua origem nas encostas da serra de Uafaranda, localizada na fronteira com a Venezuela, na região oeste de Roraima e representa o maior afluente do rio Branco. A oeste se encontra o rio Mucajaí, enquanto para o sul, no lado leste, flui o rio Anauá. Por último, os rios Água Boa do Univini e rio Catrimani também fazem parte desta bacia. O rio Água Boa do Univini, localizado dentro da região do rio Branco, não teve sua área e extensão calculadas no estudo realizado por Wankler & Sander (2022). No entanto, devido à grande quantidade de amostras coletadas nesta bacia, foi determinada a superfície e extensão do rio e sua bacia. Com apoio na base de dados geográfica do projeto "*Geodiversidade meio ambiente planejamento territorial geologia ambiental Roraima*", desenvolvido por (Holanda *et al.* 2014) foi possível calcular uma extensão de 206.227 km e uma superfície de 7 072.381 km² utilizando o software ArcGIS 10.4.

Localizado na fronteira sudoeste de Roraima com o estado do Amazonas está o Rio Jufari (Figura 11). Os limites da bacia são, a Leste da bacia do Rio Xeruíni. Na margem direita do rio, no estado de Roraima, se encontra metade da bacia, exatamente no município de Caracarái, e a parte esquerda no município de Barcelos, no estado do Amazonas. A extensão do Rio Jufari é de 257,2 km e, no total, sua bacia cobre uma área

de 411.621 km². A bacia do Rio Jufari é composta por drenagens de menor hierarquia (Figura 11 C), como os igarapés Caicubi na parte leste, Pretinho e Preto. Outros corpos d'água que compõem a bacia são os lagos Tubana, Munduereu, Santa Fé, São Pedro, Canuaru, Tucuxi, Maraxi e Chagas, na margem oeste do rio, próximo à foz do Rio Jufari.

A bacia do Rio Jauaperi está localizada no sudeste do estado. Abrange quase completamente o município de Rorainópolis e parcialmente São João da Baliza, São Luiz e Caroebe. Faz fronteira com a bacia do Rio Branco ao noroeste e com a bacia do Rio Jatapú ao leste. A área da bacia do Rio Jauaperi é de 38.611,116 km² e possui uma extensão aproximada de 482 km. Os principais rios que compõem a bacia são o Rio Alalaú, ao sul do município de Rorainópolis, onde na sub-bacia deste rio encontram-se as Barragens 30-1 e 75-1. Ao Norte está o igarapé Cachimbo, seguido por uma série de lagoas como Bugre, Buraco, Tiro, Manoel da Silva e Central. A jusante está o Rio Macucuaú e, posteriormente, até a foz no Rio Negro, o Rio Jauaperi apresenta uma série de lagoas, sendo uma das mais proeminentes a Lagoa Grande, além de igarapés menores como o Atucará.

A bacia do Rio Jatapú está localizada no estado de Roraima, na região norte do Brasil. Geograficamente, situa-se ao norte da bacia hidrográfica do Rio Uatumã e ao sul da bacia do Rio Branco. A bacia do Rio Jatapú faz fronteira ao norte com a bacia do Rio Branco, a oeste com a bacia do Rio Jauaperi, e a Leste com a bacia do Rio Nhamundá, até desaguar no Rio Amazonas. A área total da bacia do Rio Jatapú é de aproximadamente 9.132,642 km², e a extensão do rio é de 185,8 km. Os principais rios que compõem a bacia do Rio Jatapú incluem o próprio Rio Jatapú, assim como seus afluentes. O principal afluente é o Rio Capucapu. Ao norte da bacia, em terras amazonenses, estão as Usinas Elétricas Balbina e Pitanga.

Cada uma das bacias delimitadas neste trabalho está presente nas subdivisões de otobacias de nível 4 utilizadas para o gerenciamento hídrico do Estado de Roraima, exceto pela bacia do Parima, identificada com o número 19 (Figura 11 C). Isso se deve à sua localização dentro da área central do território Yanomami. Na bacia do rio Branco, encontram-se 328 amostras em uma área de 37.882,803 km². Jatapú tem 5 amostras e uma área de 1.970,417 km². Jufari tem 27 amostras e uma área de 8.609,926 km². Jauaperi tem

69 amostras e uma área de 17.290,583 km².

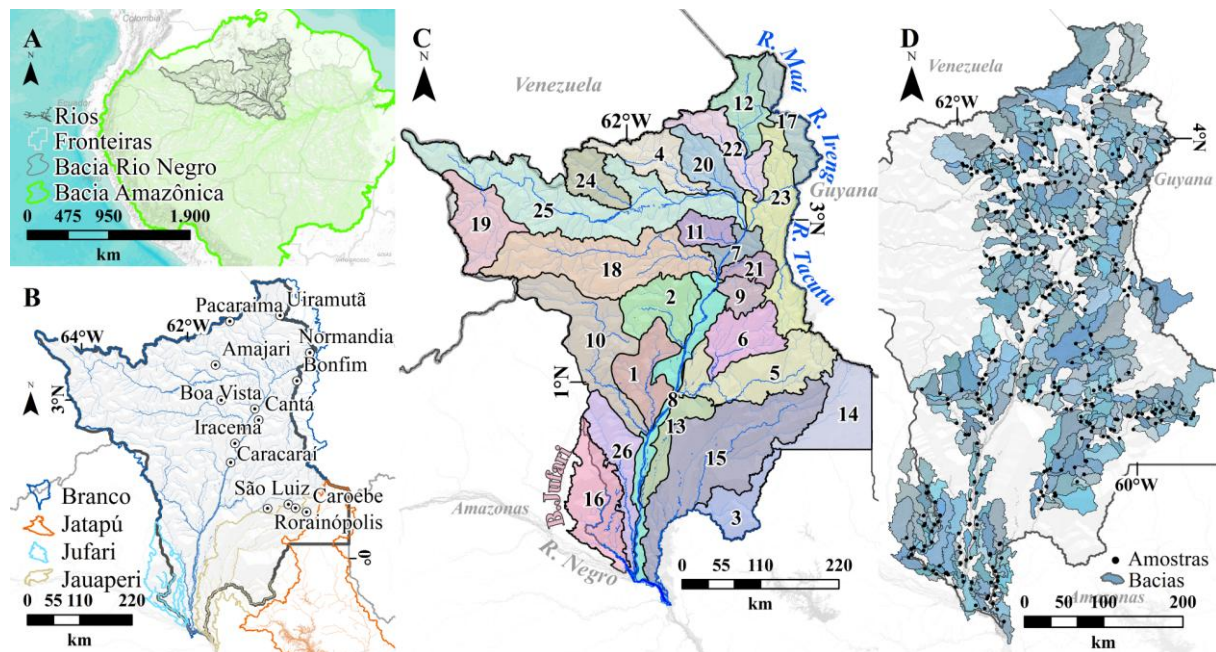


Figura 11 - A. Mapa dos limites da bacia do rio Amazonas e rio Negro. B. Bacias hidrográficas de nível 3 que deságuam no rio Negro. C. Bacias hidrográficas do estado de Roraima. 1: Água Boa do Univini, 2: Ajarani, 3: Alalaú, 4: Amajari, 5: Anauá, 6: Baraúna, 7: Branco I, 8: Branco II, 9: Cachorro, 10: Catrimani, 11: Cauamé, 12: Contingo, 13: Itapará, 14: Jatapú, 15: Jauaperi, 16: Jufari, 17: Maú, 18: Mucajaí, 19: Parima, 20: Parimé, 21: Quitauaú, 22: Surumu, 23: Tacutu, 24: Uraricaá, 25: Urariquera, 26: Xeriuini. D. Microbacias delimitadas e localização dos pontos de coleta de sedimentos. Fonte: Modificado ANA, (2022), Freitas & Marmos, (2017), IBGE (2023)

3.8 VEGETAÇÃO

Uma das maiores riquezas de Roraima é sua diversidade paisagística, embelezada por sua vegetação. Os ecossistemas predominantes no estado são a floresta amazônica e a savana, esta última também conhecida como "Lavrado". A combinação entre a floresta tropical e as extensas regiões de savana resulta em alta umidade, enquanto a floresta, por outro lado, possui uma densa cobertura arbórea (Carvalho *et al.* 2016, Carvalho *et al.* 2020). Ambos os ecossistemas formam um habitat para uma grande diversidade de espécies de flora e fauna (Carvalho & Carvalho 2012).

Esses ecossistemas se desenvolvem sobre solos altamente intemperizados, que desempenham um papel importante como sumidouro de carbono, mas estão ameaçados pelos incêndios florestais e pelo avanço do desmatamento (Araújo *et al.* 2019, Flores *et al.* 2017). Apesar de seus solos arenosos e com deficiência de nutrientes, as savanas ou o Lavrado, que cobrem uma área de 41.000 km², estão entre as áreas mais impactadas pelo

uso agropecuário (Meneses *et al.* 2015, Oliveira *et al.* 2017). As condições edáficas da savana estão subordinadas às condições hidrológicas, permitindo que, em áreas específicas, proliferem espécies resistentes à seca, como gramíneas, arbustos e moitas. Algumas dessas espécies, adaptadas a condições áridas, incluem a amburana-de-cheiro, o umbuzeiro e a aroeira. Essas espécies foram identificadas em 2007, juntamente com outras 300 espécies na Amazônia, das quais 32 novos registros foram atribuídos exclusivamente ao estado de Roraima (Barbosa *et al.* 2007).

Os solos da floresta em Roraima apresentam um alto grau de intemperismo e elevada acidez. Esse aspecto é relevante, pois, enquanto os solos das savanas são frequentemente utilizados como referência para entender as dinâmicas dos nutrientes (Sanaiotti *et al.* 2002), os solos de ecossistemas florestais densos apresentam alta retenção de metais considerados tóxicos (Araújo *et al.* 2017, Silva *et al.* 2022). Por essa razão, as atividades antrópicas não apenas contribuem para a liberação de carbono e a degradação do solo, mas também para a mobilização de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) (Barbosa & Fearnside 2005, Condé *et al.* 2019). Os impactos do desmatamento e dos incêndios florestais podem levar a condições irreversíveis na hidrologia local e regional (Ciemer *et al.* 2021, Xu *et al.* 2022).

A composição e a saúde da vegetação refletem as condições do solo, indicando possíveis deficiências de nutrientes ou problemas de contaminação histórica. O monitoramento da vegetação oferece alternativas para acompanhar a saúde dos ecossistemas e representa uma estratégia potencial de remediação (Buzatti *et al.* 2018, Oliveira *et al.* 2017b).

3.9 USO E COBERTURA DO SOLO

Para realizar análises multitemporais do uso e cobertura do solo, foram utilizados os produtos do projeto MAPBIOMAS versão 9.0 (Souza *et al.* 2020). A coleta e a análise de dados multitemporais são recursos imprescindíveis para as políticas de gestão do território (Pinto-Hidalgo & Silva-Centeno 2022). As imagens utilizadas para a geração de mapas de uso e cobertura do solo permitem delimitar áreas florestais, reconhecendo a diversidade de vegetação dentro dos biomas. Além disso, possibilitam a diferenciação de coberturas ligadas às atividades humanas, como áreas agrícolas, urbanas, zonas de mineração e corpos d'água (Figura 12).

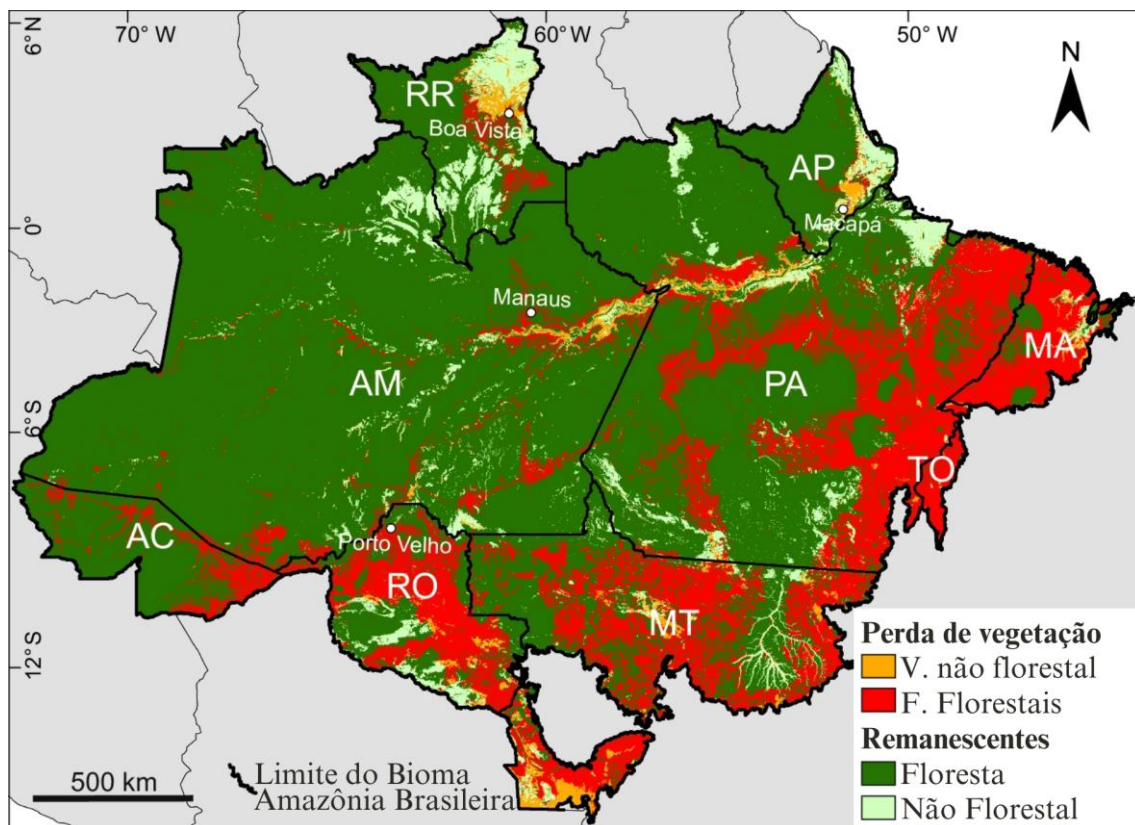


Figura 12 - Distribuição geográfica da vegetação remanescente e perdida (vegetação não florestal [VNF] e formações florestais) no bioma Amazônia brasileira (2000-2022). Autor: modificado de (Messias *et al.* 2024).

As análises multitemporais permitiram observar a tendência das coberturas relacionadas à atividade humana (Figura 13). A formação de floresta e a floresta alagável são as coberturas com maior área no estado. No entanto, as coberturas naturais do Estado estão retrocedendo a uma taxa aproximada de 27.079 ha a cada ano. Desde 2015, coberturas como a mineração aumentaram de maneira acentuada. Em 1985, foram detectadas 85 ha dedicadas à mineração, enquanto em 2023 esse número foi calculado em 3.325 há (Figura 13). O ponto de inflexão crítico ocorreu em 2017, quando os hectares dedicados à mineração passaram de 205 ha para 463 há.

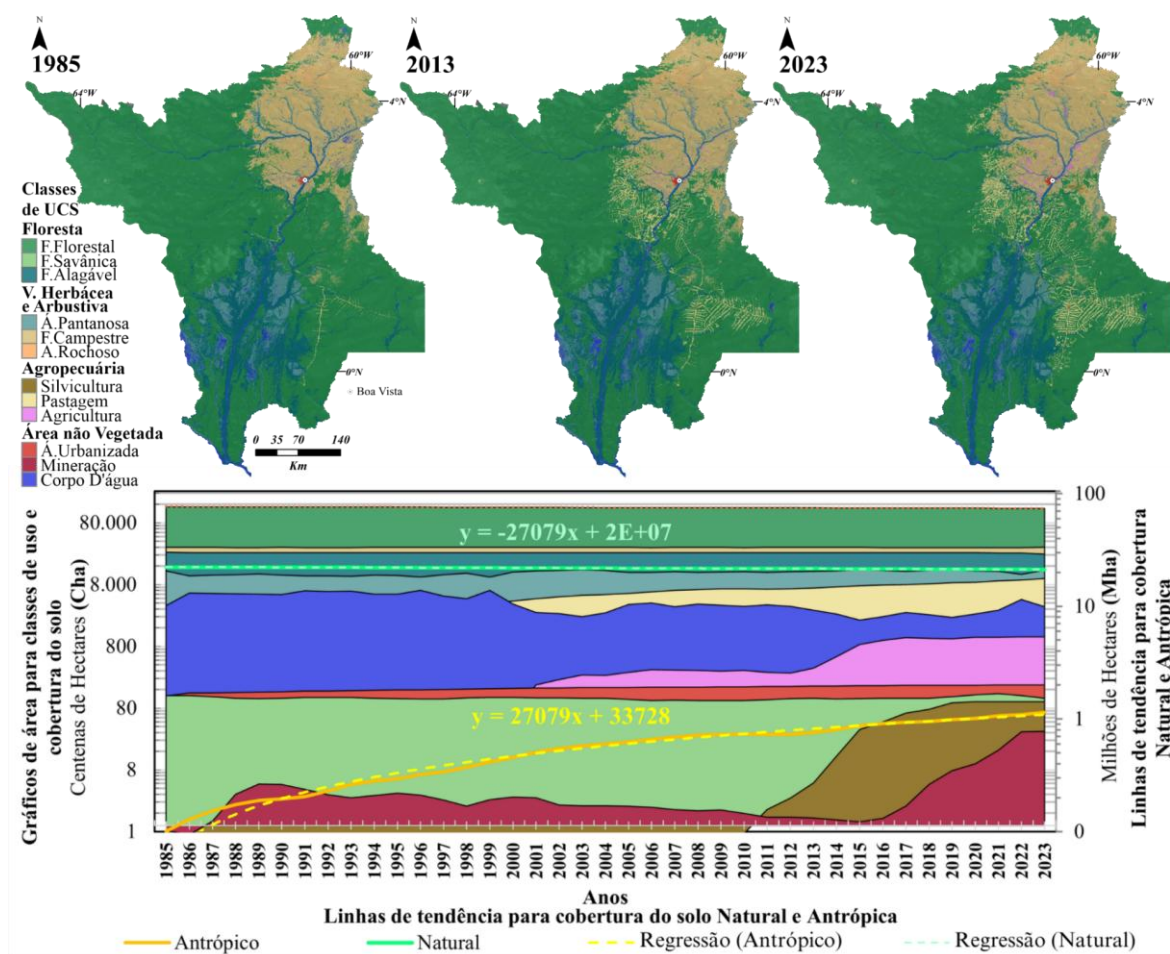


Figura 13 - Mapas de uso e cobertura do estado de Roraima para os anos de 1985, 2013 e 2023. Gráfico de área para as classes de uso e cobertura do solo (1985-2023), com linhas de tendência para uso antrópico e natural. Fonte: Modificado de Mapbiomas (2024) Versão 9.

A relação de metais preciosos com essa tendência está ligada ao seu padrão de aumento (Lobo *et al.* 2016, Siqueira-Gay & Sánchez 2021a). Um dos exemplos mais marcantes do aumento é o ouro, que teve um crescimento médio anual de 8% nas últimas duas décadas. Segundo o J.P. Morgan, esses aumentos também estão relacionados a eventos inesperados, como o início da guerra na Ucrânia, onde foram observados aumentos de até 13% no valor do metal (Jury & Tang 2024). o preço do ouro, que a partir de 2016 aumentou. Durante a década, as políticas de flexibilização quantitativa implementadas pela *Federal Reserve System* também conhecida como FED e outros bancos centrais contribuíram para o aumento do preço do ouro, à medida que os investidores buscavam ativos que preservassem seu valor frente à inflação (Galindo-Manrique *et al.* 2019).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 ANOMALIAS GEOQUÍMICAS

As anomalias geoquímicas podem ser definidas como regiões onde a concentração de elementos químicos específicos se desvia significativamente dos níveis esperados, indicando uma possível mineralização ou contaminação ambiental (Demetriades *et al.* 2018, Wang *et al.* 2024, Wang & Zuo, 2024). Essas anomalias são classificadas em dois tipos, primárias e secundárias, de acordo com sua gênese. As anomalias primárias estão frequentemente associadas a processos hidrotermais, enquanto as secundárias são geralmente geradas por intemperismo ou atividades antropogênicas (Gałuszka & Migaszewski 2011, Li *et al.* 2022). O reconhecimento dessas anomalias é crucial em diversos campos, como geologia, mineração e ciência ambiental, devido ao potencial benefício econômico que podem oferecer ou às preocupações derivadas dos efeitos da exposição a áreas contaminadas.

Os métodos desenvolvidos para identificar as anomalias possuem pontos fortes e limitações. As abordagens tradicionais baseavam-se na presunção de normalidade estatística das concentrações. No entanto, os dados geoquímicos são frequentemente enviesados, sendo necessário avaliar outros parâmetros estatísticos, como a média, a mediana e o desvio padrão, para separar os valores anômalos dos níveis de fundo (Afzal *et al.* 2010, Kieu & Van 2017). As melhorias na detecção de anomalias envolveram ferramentas robustas que levam em consideração a variabilidade espacial, como o modelamento multifractal e métodos geoestatísticos (Khavari *et al.* 2020). O *Machine Learning*, algoritmos de aprendizado profundo como os *autoencoders*, demonstraram ser ainda mais eficientes para reconhecer padrões complexos em dados geoquímicos, ampliando a identificação de anomalias sutis (Chen *et al.* 2019, Sabbaghi & Tabatabaei 2023, Yu *et al.* 2022).

A importância das anomalias geoquímicas é estratégica, pois representam a base da cadeia de suprimentos. Por isso, os estudos geológicos servem como indicadores de mineralização, orientando os esforços de exploração de recursos valiosos, como metais e ETR (Chen *et al.* 2019, Qin *et al.* 2021). Na China, especificamente na região de Jiandong, a detecção de nanopartículas de ouro permitiu delimitar áreas onde ocorrem processos metalogenéticos específicos, sendo fundamental para a prospecção desse metal, facilitando a identificação e previsão de depósitos de ouro (Li *et al.* 2022). Compreender

o potencial dessas anomalias melhora a eficiência na exploração de mineralizações (Hung *et al.* 2020, Liu *et al.* 2023). Outro caso de sucesso, também na Ásia, é o Vietnã, onde a avaliação estatística de dados geoquímicos identificou zonas de mineralizações polimetálicas (Figura 14) (Zheng *et al.* 2023), demonstrando a importância de localizar e identificar anomalias (Hung *et al.* 2020).

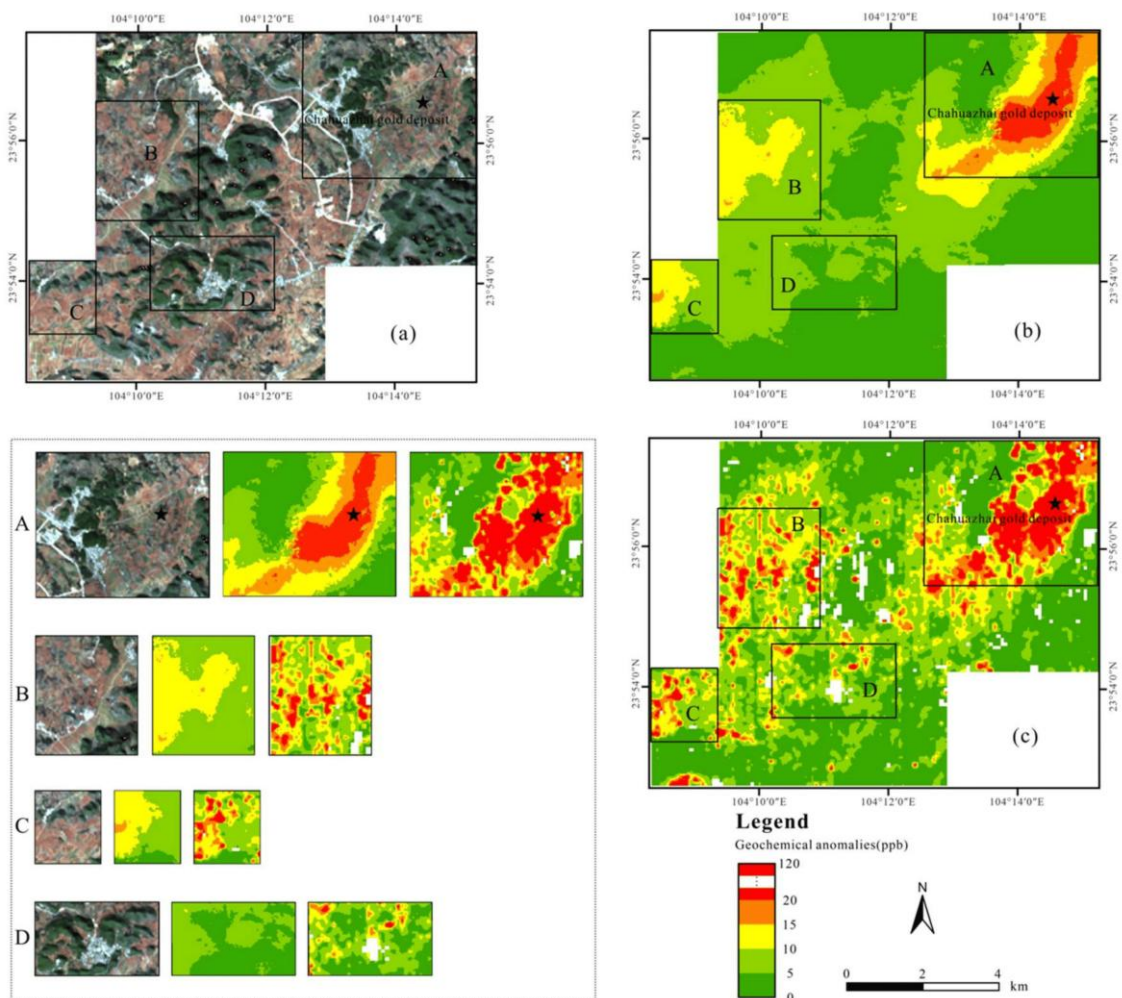


Figura 14 - Zonas de interesse. (a) Imagem hiperespectral original do GF-5, (b) Resultados da previsão por GWR, (c) Resultados da exploração geoquímica. Fonte: Zheng *et al.* (2023)

Em estudos ambientais, as anomalias geoquímicas são avaliadas para determinar os níveis de contaminação e os impactos antropogênicos nos ecossistemas, permitindo a identificação de áreas contaminadas para promover estratégias de remediação (Filippini-Alba 2022, Gałuszka & Migaszewski 2011). No contexto do monitoramento ambiental, os estudos de *Baseline/Background* geoquímico se tornaram essenciais para distinguir a variabilidade natural das influências antropogênicas, servindo de base para a avaliação e gestão da contaminação (Ahn *et al.* 2022, Dyachenko *et al.* 2024, Ma *et al.* 2022).

A integração de dados de sensoriamento remoto com análises geoquímicas gerou sinergias na capacidade de mapear depósitos minerais e avaliar seu potencial. Esse campo apresenta cada vez mais ferramentas para melhorar os resultados, como evidenciado em estudos recentes que utilizam imagens hiperespectrais (Qin *et al.* 2021, Zheng *et al.* 2023). No caso dos estudos realizados por Zheng *et al.* (2023), além da composição litológica, foi avaliada a cobertura vegetal, pois esta é um fator preponderante no modelo preditivo de anomalias geoquímicas de ouro na área de estudo.

4.2 GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS

Geralmente, a obtenção de amostras de sedimentos de córregos requer uma amostragem sistemática em diversas localizações dentro de uma bacia de drenagem. Esse procedimento é essencial para registrar a variação espacial dos componentes geológicos (Nforba *et al.* 2022). Frequentemente, estudos em sedimentos de corrente utilizam técnicas analíticas sofisticadas, como a espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) e métodos de ensaio pôr fogo, que facilitam a identificação de vários elementos ao mesmo tempo (Lapworth *et al.* 2012). Uma das bases do desempenho do ICP-MS reside na capacidade de ionizar e detectar uma ampla gama de elementos em baixas concentrações, alcançando uma sensibilidade na faixa de partes por trilhão (PPT) de forma simultânea. Essa técnica pode ser ainda mais aprimorada com o uso de células de colisão/reação, assim como coletores múltiplos, melhorando a detecção em amostras complexas (Balaram 2021, Goullé *et al.* 2014, Yang *et al.* 2021).

A geoquímica de sedimentos de rios tem um papel crucial na detecção de anomalias geoquímicas, as quais indicam a mineralização ou a poluição ambiental. Por exemplo, no Quadrilátero Ferrífero, localizado no sudeste do Brasil, o mapa geoquímico mostrou que entre 16-24% das amostras apresentaram anomalias positivas, o que indica uma possível mineralização associada a fatores naturais e humanos (Vicq *et al.* 2015). De maneira semelhante, na área de ouro e cobre de Zijinshan, as anomalias nos sedimentos dos rios estavam fortemente associadas às províncias metalogenéticas reconhecidas, destacando assim sua importância na exploração mineral (Li, Hou, *et al.* 2021). Durante as análises ambientais, os sedimentos de corrente podem representar as concentrações do background ou *baseline* de elementos que podem ser prejudiciais. Pesquisas demonstraram que a composição geoquímica dos sedimentos pode ser usada para definir valores de referência, que são cruciais para avaliar os efeitos antropogênicos no ambiente

natural (Albanese *et al.* 2007, Appleton *et al.* 2008). Nos mesmos estudos desenvolvidos por (Albanese *et al.* 2007, Ambrosino *et al.* 2024, Cicchella *et al.* 2022, Dominech *et al.* 2022, Reimann *et al.* 2018, Thiombane *et al.* 2019), na Itália, utilizando sedimentos foi possível definir as concentrações que servem como referência para EPT, apresentando os impactos do homem no meio ambiente e na saúde ambiental.

4.3 MAPEAMENTO GEOQUÍMICO COM SEDIMENTOS DE CORRENTE

A abordagem de mapeamento geoquímico com sedimentos de corrente é estratégica para avaliar condições ambientais locais ou regionais. Da mesma forma, é um meio de reconhecer características geológicas e possíveis depósitos minerais. A formulação de estudos geoquímicos com sedimentos de corrente é especialmente relevante em regiões com escassez de informações geológicas. No entanto, antes de iniciar, é necessário considerar variáveis como o uso do solo, as características granulométricas do sedimento a ser coletado, a composição microbiana, além dos padrões e sistemas hidrológicos.

A natureza e a composição dos sedimentos são variáveis primordiais, pois se tornam mais inertes à medida que aumenta o diâmetro do grão. Nas frações mais finas, os sedimentos atuam como repositórios de registros químicos, com origens tanto naturais quanto antropogênicas, funcionando como um arquivo de tudo o que ocorre a montante (Figura 15) (Doufexi *et al.* 2022, Tarnagda *et al.* 2024). As variáveis naturais que influenciam a composição dos sedimentos podem ser microbiológicas, mas, em sua maioria, estão relacionadas à geologia como fator preponderante. Por outro lado, as condições do solo circundante e seu uso podem alterar as condições iniciais tanto da água quanto dos sedimentos (Kim 2014). Por isso, além de um excelente método *pathfinder*, os sedimentos fornecem dados sobre saúde, ecologia e auxiliam na categorização dos impactos ambientais (Johnson *et al.* 2005).

Atualmente, uma das novas observações científicas aponta para a redução da atividade microbiana com os processos de urbanização (Hosen *et al.* 2017). Esse fenômeno está correlacionado com o aumento das taxas de sedimentação, gerando modificações na composição dos sedimentos. Essas dinâmicas tornam necessário o registro prévio dos valores de referência, para que impactos futuros possam ser comparados (Hosen *et al.* 2017, Oliveira *et al.* 2019).

Uma das estratégias envolvidas no mapeamento geoquímico com sedimentos são as assinaturas químicas que indicam áreas com potencial mineral. No Reino Unido, estudos desse tipo permitiram identificar padrões associativos resultantes não apenas da geologia superficial, mas também influenciados por processos que ocorrem em profundidade (Johnson *et al.* 2005, Jones *et al.* 2009). Essa abordagem continua sendo aplicada atualmente, permitindo a identificação de anomalias metálicas em sedimentos de corrente que indicam a presença de depósitos minerais abaixo da superfície (Tarnagda *et al.* 2024).

Resultados bem-sucedidos como esses dependem da metodologia de amostragem e dos tipos de análises realizadas nos sedimentos, sendo uma das etapas mais críticas desse tipo de estudo. Variáveis como a abertura ou digestão do material variam de acordo com o objetivo do estudo (Damak *et al.* 2019). Um exemplo é a capacidade limitada de um dos reagentes mais utilizados em estudos multipropósito, a Água Régia ($\text{1HNO}_3\text{:3HCl}$), que decompõe apenas uma fração dos elementos resistentes. Minerais de silicato e minerais refratários, em particular, requerem métodos mais agressivos para sua decomposição (Elomaa *et al.* 2017). Essa limitação é ainda mais evidente em análises comparativas que mostram que metodologias alternativas, como a digestão total utilizando uma combinação de ácido fluorídrico (HF), nítrico (HNO_3) e perclórico (HClO_4), proporcionam uma solubilização mais eficiente de elementos resistentes em matrizes geológicas complexas (Cotta & Enzweiler, 2012, W. Zhang *et al.* 2016).

Além disso, mudanças temporais e espaciais inesperadas em bacias hidrográficas, como secas ou inundações, são fatores cruciais na caracterização geoquímica dos sedimentos. Inundações massivas ou recorrentes mobilizam grandes volumes de material sedimentar, alterando abruptamente a composição dos sedimentos em curtos períodos (Jia & Wang, 2014). No entanto, isso evidencia a capacidade dos sedimentos de registrar não apenas informações químicas, mas também variações multitemporais, revelando processos de intemperismo, a evolução geológica da região e até mudanças no uso da terra causadas pela ação humana (Lipp *et al.* 2020).

A captura de sedimentos alóctones em cursos d'água é essencial para a conservação da qualidade da água e da vida aquática. Áreas ribeirinhas com ecossistemas saudáveis apresentam um trânsito moderado de sedimentos, baixa disponibilidade de contaminantes e um registro geoquímico inócuo (Burdon *et al.* 2013, Jidere *et al.* 2015). Por isso, compreender o percentual de sedimentos em suspensão e a natureza dos

sedimentos depositados no fundo do rio é fundamental para a realização de avaliações ambientais em zonas ribeirinhas.

Estudos aplicados a áreas urbanas, onde resíduos industriais frequentemente enriquecem os sedimentos com elementos potencialmente tóxicos (EPT) e contaminantes orgânicos, são uma estratégia essencial para a gestão territorial. Sedimentos de rios em ambientes urbanizados apresentam características granulométricas e composicionais que impactam comunidades microbianas e invertebradas (Lipp *et al.* 2020, Pesce *et al.* 2021). As correlações significativas entre a composição dos sedimentos e a saúde das populações de invertebrados bentônicos ressaltam a importância de manter dinâmicas sedimentares naturais para preservar a integridade ecológica (Austin & Strauss 2011, Burdon *et al.* 2013).

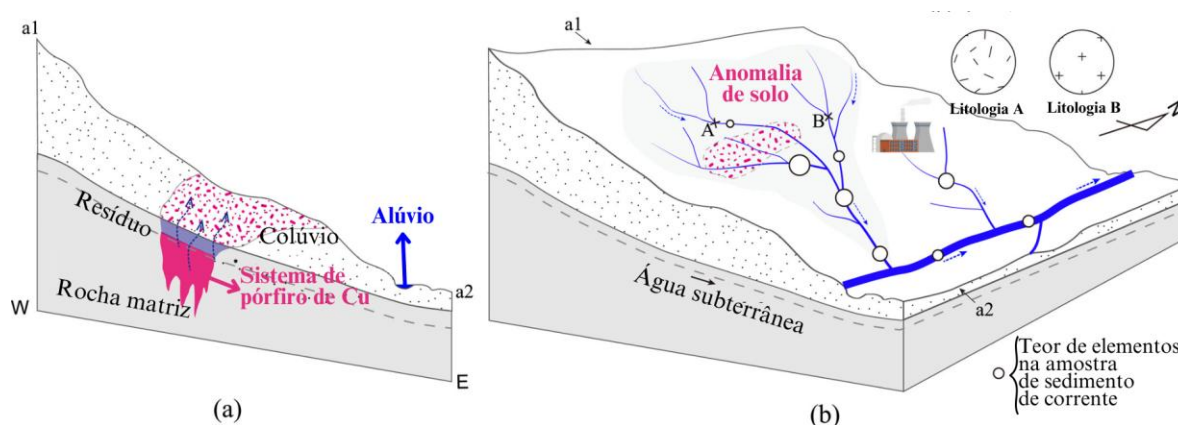


Figura 15 - Modelo conceitual simplificado de dispersão de elementos geoquímicos em solos e sedimentos de rios. A. Difusão a partir de um sistema de pórfido de cobre para o solo por meteorização, influenciada por fatores como lixiviação, erosão, gradiente de concentrações e topografia. B. Difusão em sedimentos de rios por um sistema de drenagem, afetada pela variabilidade litológica, irregularidades locais e diluição devido aos afluentes. O modelo desconsidera diversos fatores locais, como a dispersão biológica e a adsorção, o que gera incertezas no mapeamento geoquímico de sedimentos de rios. Fonte: (Xuejing 2008, Xie *et al.* 2008, Wang & Zuo 2024)

O mapeamento com sedimentos de corrente, além de ser uma ferramenta baseada na geoquímica, também apresenta um forte componente biológico que, ao se unir à geologia, compõe uma estratégia integrada de monitoramento ambiental.

4.4 MAPEAMENTO GEOQUÍMICO DE BAIXA DENSIDADE

As metodologias de mapeamento geoquímico de baixa densidade tornaram-se um recurso essencial nas investigações ambientais e geológicas, especialmente para avaliar

os sedimentos dos rios e realizar projetos de cartografia regional de grande envergadura. Esses procedimentos simplificam a análise de diversos fatores essenciais para definir linhas de base geoquímicas, que são fundamentais para entender os recursos minerais, os níveis de contaminação e a saúde dos ecossistemas. Uma das maiores vantagens do mapa geoquímico de baixa densidade é sua capacidade de cobrir grandes áreas com poucos pontos de amostragem, o que reduz custos e tempo e, simultaneamente, proporciona dados valiosos (Adiotomre 2014, Birke *et al.* 2015, Lin *et al.* 2019, Liu *et al.* 2019, 2021, Reimann 2022, Reimann *et al.* 2016). Um caso seria o do mapeamento geoquímico realizado na Alemanha (Figura 16), onde a maioria dos elementos analisados com diferentes níveis de resolução amostral apresentou uma linha de frequência quase semelhante (Birke *et al.* 2015).

Tabela 1 - Classificação do mapeamento geoquímico em função da densidade de amostragem

Densidade nominal de amostragem	Dimensão da malha de amostragem	Escala do mapa	Fase do mapeamento geoquímico
1 amostra/10,000 km ²	100 x 100 km	1:10,000,000	Continental
1 amostra/6400 km ²	80 x 80 km*		
1 amostra/2500 km ²	50 x 50 km	1:5,000,000	Regional
1 amostra/1600 km ²	40 x 40 km		
1 amostra/100 km ²	10 x 10 km	1:1,000,000	
1 amostra/1 km ²	1 x 1 km	1:100,000	
1 amostra/250,000 m ²	500 x 500 m	1:50,000	
1 amostra/62,500 m ²	250 x 250 m	1:25,000	Regional (ou fase de acompanhamento na exploração mineral)
1 amostra/10,000 m ²	100 x 100 m	1:10,000	
1 amostra/2500 m ²	50 x 50 m	1:5000	Local ou detalhado
1 amostra/625 m ²	25 x 25 m	1:2500	Local (ou fase de mineração/ultradetalhada na exploração mineral)
1 amostra/100 m ²	10 x 10 m	1:1000	
1 amostra/25 m ²	5 x 5 m	1:500	

Fonte : (Demetriades *et al.* 2018, Smith *et al.* 2018)

Outro caso é o estudo conduzido por Négrel *et al.* (2019), no qual amostras foram coletadas a cada 2500 km², permitindo obter informações representativas sobre os recursos geoquímicos da Europa. Da mesma forma, o *National Geochemical Survey of Australia* (NGSA) gerou um mapa geoquímico em escala continental, fornecendo dados

úteis tanto para a exploração mineral quanto para a gestão ambiental (Caritat & Cooper 2016). O NGSa oferece um mapa geoquímico em nível continental, útil tanto para a exploração de recursos quanto para a gestão ambiental (Caritat & Cooper 2016). Estudos de grande escala, como o realizado em Madagascar, podem fornecer informações importantes sobre domínios geológicos, já que a resolução espacial do estudo é inferior a uma amostra por cada 100 km² (Scheib *et al.* 2011).

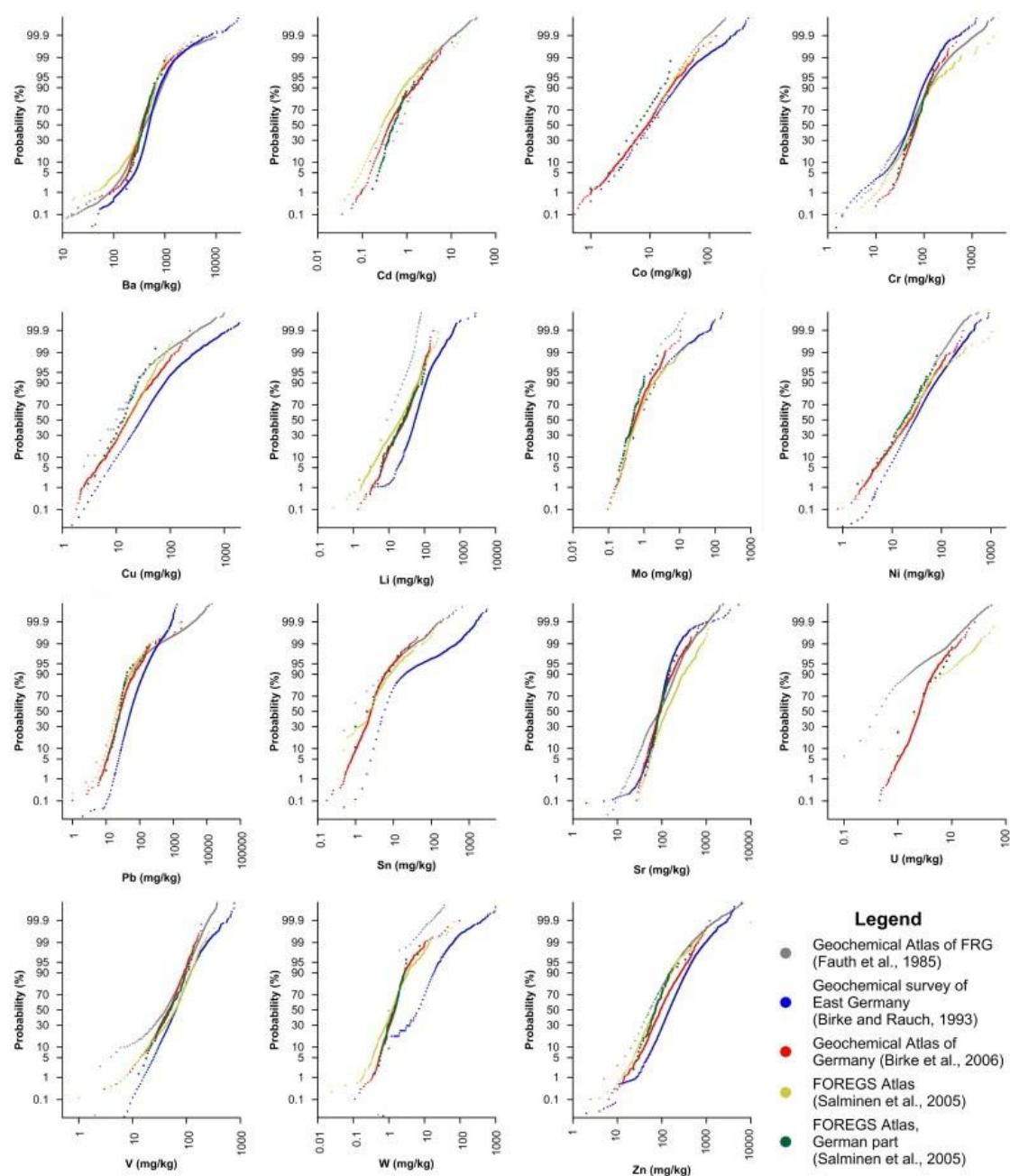


Figura 16 - Comparação dos valores do mapeamento de alta e baixa densidade amostral de parâmetros e elementos selecionados na água de córrego (diagramas de frequência cumulativa). Fonte: (Birke et al. 2015)

No entanto, em estudos de grande envergadura global, o desafio depende da unificação dos dados e da homogeneidade que envolvem cada uma das etapas, como a amostragem, a matriz, o processamento das amostras e os métodos de análise. Os mapas do modelo europeu apresentaram esse desafio para a integração dos dados de cada país, garantindo a coerência e harmonização dos resultados (Fordyce *et al.* 2020). Segundo Reimann *et al.* (2016), fenômenos localizados seriam imperceptíveis em função da escala do mapeamento, sendo necessário, portanto, um equilíbrio minucioso entre a escala e a qualidade dos dados. Isso pode ser medido utilizando a densidade amostral para os estudos de mapeamento geoquímico (Demetriades *et al.* 2018, Smith *et al.* 2018).

4.5 BACKGROUND E BASELINE GEOQUÍMICO

A composição geoquímica dos materiais terrestres é fundamental para a economia e a vida dos seres humanos. Para compreender o contexto de materiais como sedimentos, solos, rochas e água, é essencial quantificar sua composição e proveniência. Para isso, existem técnicas de avaliação baseadas em dois conceitos: Background geoquímico e Baseline geoquímico (Valdés Durán *et al.* 2022). Os termos Baseline e Background são utilizados em estudos de geoquímica ambiental ou de exploração mineral e apresentam certas diferenças que evidenciam discrepâncias em suas definições e métodos (McIlwaine *et al.* 2014).

O Background geoquímico refere-se às concentrações naturalmente presentes no ambiente e, portanto, nos diferentes materiais das matrizes ambientais, como sedimentos, solos e água. A distribuição e as concentrações, nesse caso, encontram explicação em processos endógenos e exógenos sem causas antrópicas (Shah *et al.* 2012). Para sua determinação, é necessário contar com amostras representativas e inalteradas, com o menor grau de alteração humana.

Por outro lado, o Baseline geoquímico é definido como a concentração quantificável dos elementos em um ambiente antes do surgimento de atividades humanas significativas, incluindo processos naturais de redistribuição geoquímica (Galán *et al.* 2008, Santos-Francés *et al.* 2017). No entanto, o conceito de Background geoquímico é apresentado como uma medida exclusiva das condições naturais, enquanto o Baseline geoquímico abrange tanto as mudanças no uso do solo resultantes da atividade humana

quanto os processos naturais, incluindo intemperismo, diagênese e transporte de sedimentos, que influenciam as características dos materiais avaliados (Li *et al.* 2019).

Isso representa um desafio amplamente discutido, pois a interpretação dos resultados é crucial em estudos ambientais e pode levar à superestimação ou subestimação de focos de contaminação ou processos naturais. As diferenças entre os conceitos envolvem aspectos como a seleção de amostras, mas também os métodos estatísticos. No caso do Background, utilizam-se medidas como percentis e métodos como a análise de componentes principais (PCA) para realizar agrupamentos que permitam distinguir a origem de populações associadas a diferentes contextos (Aleksander-Kwaterczak *et al.* 2021, Dung *et al.* 2013, Konstantinova *et al.* 2021).

No caso do Baseline geoquímico, as metodologias compartilham algumas características. No entanto, esse conceito tende a ter uma abordagem mais histórica em relação aos materiais examinados. Por exemplo, utilizam-se registros sedimentares, testemunhos de perfuração e análises estratigráficas para determinar os níveis prévios à intervenção humana (Martín-Méndez *et al.* 2023). A avaliação do Baseline também está acompanhada pelo uso de normalizadores geoquímicos, que são elementos abundantes, como Al, Fe e Mn, para corrigir efeitos de granulometria e diluição natural (Shah *et al.* 2012).

A aplicação desses estudos também diferencia os conceitos. Os estudos de Background, além da avaliação ambiental, visam reconhecer anomalias geoquímicas para avaliar mineralizações primárias. Em contraste, os estudos de Baseline são aplicados à medição da contaminação e à gestão ambiental, buscando identificar enriquecimentos em áreas degradadas pela ação humana (Breward *et al.* 2015, Quaresma *et al.* 2022).

A China é um dos países que se destacam na aplicação desse tipo de estudo. Após se tornar uma potência industrial, estudos de Baseline, como os desenvolvidos em Fuxin, permitiram delimitar áreas contaminadas e suas fontes, além de iniciar processos de remediação e mitigação (Zhang *et al.* 2020). No Brasil, o cálculo do Baseline na bacia do Rio Parauapebas foi um recurso importante para avaliar a qualidade da água e medir o impacto da exploração de recursos naturais (Quaresma *et al.* 2022).

4.6 ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS

Os EPTs incluem metais e metalóides como As, Cd, Pb e Hg, juntamente com alguns não metais como o Se. Esses elementos representam um risco significativo para o meio ambiente e a saúde humana devido à sua persistência em matrizes ambientais como o solo, a água e os sedimentos, bem como à sua capacidade de bioacumulação e toxicidade, mesmo em baixas concentrações (Melake *et al.* 2023).

Naturalmente, os EPTs podem ingressar no ambiente por meio de processos como atividade vulcânica, intemperismo geológico e meteorização de minerais (Tabela 2). No entanto, atividades humanas como descargas industriais, uso de fertilizantes e pesticidas e efluentes domésticos e emissão de combustíveis fósseis, são contribuintes-chave para sua disseminação nos ecossistemas, exacerbando os riscos associados (Bamuwamy *et al.* 2017, Copat *et al.* 2012, Pourret & Bollinger 2018, Pourret & Hursthouse 2019).

Tabela 2 - Concentrações (mg kg⁻¹) de EPT (intervalos) em rochas ígneas e sedimentares e solos não contaminados

PTE	Rochas basálticas	Rochas graníticas	Argilitos e argilas	Argilitos negros	Solos
As	0,2 - 10	0,2 - 13,8	-	1,0 - 900,0	5,0 - 10,0
Cd	0,006 - 0,6	0,003 - 0,18	<11,0	0,3 - 8,4	0,01 - 0,7
Co	24,0 - 90,0	1,0 - 15,0	5,0 - 25,0	7,0 - 100,0	1,0 - 40,0
Cr	40,0 - 600,0	2,0 - 90,0	30,0 - 590,0	2,0 - 1000	5,0 - 3000
Cu	30,0 - 160,0	4,0 - 30,0	18,0 - 120,0	20,0 - 200,0	2,0 - 100,0
Mo	0,9 - 7,0	1,0 - 6,0	-	1,0 - 300,0	0,2 - 5,0
Ni	45,0 - 410,0	2,0 - 20,0	20,0 - 250,0	10,0 - 500,0	10,0 - 100,0
Pb	2,0 - 180,0	6,0 - 30,0	16,0 - 50,0	7,0 - 150,0	2,0 - 200,0
Zn	48,0 - 240,0	5,0 - 140,0	18,0 - 180,0	34,0 - 1500,0	10,0 - 300,0

Fonte: Modificado de (Allaway 1968, Cannon *et al.* 1978, Li *et al.* 2009, Nieder & Benbi 2024, Prabhakaran Nair & Cottenie 1971).

Os metais pesados, em particular, definidos por sua alta densidade (acima de 5 g/cm³), apresentam uma dualidade em seu comportamento: enquanto alguns deles, como o Zn e o Cu, são essenciais em baixas concentrações para a vida e desempenham funções críticas como micronutrientes (Figura 17), outros elementos, mesmo em pequenas quantidades, são altamente tóxicos para plantas, animais e humanos (Pourret & Hursthouse 2019, Wu *et al.* 2018).

A persistência desses elementos em solos, sedimentos e corpos d'água é uma preocupação crítica, devido à sua permanência no meio ambiente por períodos

no caso do As, que está vinculado a diversos tipos de câncer, lesões na pele e doenças cardiovasculares, enquanto a exposição ao cádmio está principalmente associada a danos renais e problemas de saúde óssea (Lyu *et al.* 2024, Radovanovic *et al.* 2020). A exposição ao Pb pode provocar efeitos neurotóxicos, particularmente em crianças, e pode resultar em problemas de desenvolvimento e deterioração cognitiva (Ju *et al.* 2020, Roy & McDonald 2015). O mercúrio, frequentemente liberado por atividades industriais e pela combustão de combustíveis fósseis, pode causar danos neurológicos e distúrbios do desenvolvimento (Chen *et al.* 2022, Pan *et al.* 2018).

As normativas são essenciais no objetivo de mitigar os riscos associados aos EPT. No caso do Brasil, a Resolução CONAMA 454/12 (Tabela 3) busca propor diretrizes quanto aos procedimentos e concentrações desses elementos, entre outras substâncias, nos sedimentos. O monitoramento ambiental desempenha um papel fundamental na avaliação dos níveis de contaminação e seus possíveis impactos. Monitorar os níveis de EPT em solos agrícolas, corpos d'água e sedimentos ajuda a compreender as tendências de contaminação e a avaliar a efetividade das estratégias de mitigação (Pandiangan & Audah 2022, Zhu *et al.* 2016).

A bioacumulação de EPT nos solos agrícolas apresenta riscos significativos para a segurança alimentar. As lavouras cultivadas em solos contaminados podem absorver esses elementos, transferindo-os para a cadeia alimentar e expondo os consumidores a possíveis riscos à saúde (Rashid *et al.* 2023, Roy & McDonald 2015). Essa preocupação levou a pesquisas sobre estratégias de fitorremediação, nas quais se utilizam plantas para extrair ou estabilizar os EPT em solos contaminados, reduzindo assim sua bioacessibilidade e os riscos associados (Zhang *et al.* 2021, Ziniovskaia *et al.* 2021).

Tabela 3 - Concentrações (mg kg⁻¹) de EPT da Resolução CONAMA 454/12 para água doce e salgada, para os níveis 1 e 2

Substâncias Metais e Semi metais	Água doce		Água salina	
	N1	N2	N1	N2
As	5,9	17	19	70
Cd	0,6	3,5	1,2	7,2
Pb	35	91,3	46,7	218
Cu	35,7	197	34	270
Cr	37,3	90	81	370
Hg	0,17	0,486	0,3	1
Ni	18	35,9	20,9	51,6
Zn	123	315	150	410

Fonte: (Conselho Nacional do Meio Ambiente-Conama 2012).

5 ARTIGO: MAPEAMENTO GEOQUÍMICO E BASELINE DE METAIS EM SEDIMENTOS DE CORRENTE NOS RIOS DE RORAIMA, AMAZÔNIA, BRASIL.

Autores: Barón, A.F.G a, Serra, J.R.F a, Kütter, V.T a, Marques, E.D b, Lima, A.M.M c

a Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Faculdade de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal Do Pará, Rua Augusto Corrêa S/n, CEP 66075- 110, Belém, PA, Brasil

b Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), Belo Horizonte Regional Office, 30140-002, Brasil

c Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Pará, Belém 66075-110, Brasil

* Corresponding author.

E-mail address: galindobaron97@gmail.com

5.1 INTRODUÇÃO

O objetivo comum de aumentar o acesso à energia renovável para combater as mudanças climáticas resultou em uma maior exploração e consumo de metais, o que eleva seu descarte no meio ambiente (Habib *et al.* 2016, Watari *et al.* 2019). Alguns metais são nutrientes essenciais, no entanto, certas espécies químicas podem ser tóxicas para a vida (Briffa *et al.* 2020, Mitra *et al.* 2022, Mitran *et al.* 2024). Paralelamente, nas últimas décadas (1979-2018), tem sido registrada uma intensificação do ciclo sazonal, alterando a vazão dos rios na região amazônica. Esse fenômeno pode promover condições extremas no sistema Atmosfera-Terra-Oceano, favorecendo condições terrestres e marinhas mais extremas (Liang *et al.* 2020).

Da mesma forma, Fagundes *et al.* (2023) apontam que 51% dos principais rios da América do Sul experimentaram mudanças significativas no transporte simulado de sedimentos (QST) entre 1984 e 2019, sendo 36% atribuíveis ao desmatamento da Amazônia e à represamento dos rios, e 15% às mudanças na precipitação. Também foi estimada uma redução de 10% no aporte médio de sedimentos para os oceanos. Assim, a pressão ambiental associada ao descarte de elementos, entre eles metais, junto com as mudanças climáticas globais, altera os ciclos biogeoquímicos e o equilíbrio do qual

depende a sobrevivência das espécies (Schlesinger & Bernhardt, 2020).

Estudos em outras partes do mundo sobre a distribuição de elementos em diferentes matrizes ambientais, como sedimentos, água e solo, têm facilitado a identificação de irregularidades geoquímicas e suas conexões, sejam elas naturais ou antropogênicas, no contexto geológico e humano das áreas analisadas (Albanese *et al.* 2007, Ambrosino *et al.* 2024, Cembranel *et al.* 2017, Ferreira *et al.* 2021, Lima *et al.* 2021, Reimann *et al.* 2005, Reimann & de Caritat 2017, Reimann & Garrett 2005).

Neste cenário, destaca-se o Estado de Roraima, situado na Amazônia brasileira, que possui vastas áreas de floresta, povos indígenas tradicionais, incluindo etnias isoladas e espécies endêmicas (Demarchi *et al.* 2023, Kok *et al.* 2021), além de uma extensa rede de bacias hidrográficas com importante contribuição para o rio Amazonas. Essa região faz parte do Escudo das Guianas, um hotspot de biodiversidade com aproximadamente 3.000 espécies de vertebrados e 20.000 espécies de plantas, das quais cerca de 40% são endêmicas (Piedade *et al.* 2025).

Atividades como o uso irracional de fertilizantes na agricultura podem provocar o contaminação das águas fluviais, gerando processos de eutrofização e coprecipitação de elementos metálicos (Cicchella *et al.* 2022). Em um dos estados onde a atividade agropecuária mais cresceu no Brasil (Messias *et al.* 2024), as mudanças no uso do solo e nos ecossistemas expuseram a população a elementos identificados como substâncias tóxicas, de acordo com a Resolução CONAMA 454, além de favorecerem a proliferação de doenças (Ramos *et al.* 2020, Wetzler *et al.* 2022). A expansão urbana juntamente com a construção de rodovias, dinamizou a criação de novos centros populacionais (Fiúza *et al.* 2023). Na última década, a população de Roraima aumentou 41,2%, atingindo 636.600 habitantes, conforme o censo do (IBGE, 2023).

Outras mudanças importantes em Roraima incluem a implementação da Lei 1453 de 8 de novembro de 2021, que em seu artigo 8 estabelece medidas para mitigar os efeitos do uso de mercúrio na mineração e, no artigo 10, impõe a responsabilidade aos empreendedores de realizar compensações em caso de impactos negativos. Para este estudo, foram desenvolvidas estratégias que estabelecem um quadro comparativo mediante a integração de valores de referência para os sedimentos de corrente em cada uma das microbacias delimitadas. Os sedimentos de corrente refletem significativamente a composição das rochas e do solo circundante. A análise granulométrica de sedimentos

pode revelar fácies de depósito indicativas de erosão e redistribuição de materiais no ambiente fluvial, o que, por sua vez, fornece informações sobre a geologia local e a atividade humana na região (Sobrino-Figueroa 2021).

Os cálculos realizados para este estudo consideram a geodiversidade do estado de Roraima, que abrange não apenas a diversidade litológica e estrutural, mas também aspectos geomorfológicos, pedológicos, hidrológicos e climáticos que influenciam a distribuição geoquímica dos elementos. Geologicamente, o estado é composto predominantemente por rochas do Pré-Cambriano e está dividido em quatro domínios principais: Surumu, Guiana Central, Uatumã-Anauá e Parima (Almeida & Macambira, 2007, Bucholz & Spencer, 2019), além das Coberturas Fanerozoicas que atravessam o território de Roraima (Cordani & Teixeira 2007, Fraga *et al.* 2024).

O estudo tem como objetivo definir o baseline geoquímico do estado de Roraima por meio de métodos de estatística robusta, empregando análises exploratórias, cálculos de background/baseline (mMAD, TIF, percentis), análise fatorial e correlações geoquímicas, com o objetivo de interpretar as associações entre os elementos As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn e a geologia local. Além disso, serão calculados índices geoquímicos e ambientais para avaliar anomalias e o estado de contaminação nas bacias hidrográficas, integrando os resultados em modelos espaciais para analisar a distribuição dos elementos e diferenciar entre fontes naturais e antropogênicas.

5.2 AREA DE ESTUDO

O Estado de Roraima, situado na região Norte do Brasil, possui particularidades geográficas, ambientais e econômicas. Sua localização geográfica está nas coordenadas de latitude 2° 00' N e longitude 61° 00' O, com altitude que varia entre 80 e 2800 metros, dependendo da região, sendo o Monte Roraima o ponto de maior elevação. O Estado tem uma extensão total de cerca de 224.301 km², e entre suas formações geológicas mais destacadas estão as mesetas e os planaltos, típicos da região amazônica (Carvalho 2015, Carvalho *et al.* 2016, Cunha *et al.* 2016). Roraima abriga diversas áreas protegidas, incluindo o Parque Nacional do Viruá e a Terra Indígena Raposa Serra do Sol, considerada uma das maiores áreas indígenas do Brasil. Essas áreas são essenciais para a preservação da biodiversidade local e a proteção dos direitos das comunidades indígenas que residem na região. Além disso, o Estado dispõe de florestas nacionais e áreas de

proteção ambiental que visam proteger os ecossistemas locais e promover o uso sustentável dos recursos naturais (Cunha *et al.* 2016, Lisboa 2018).

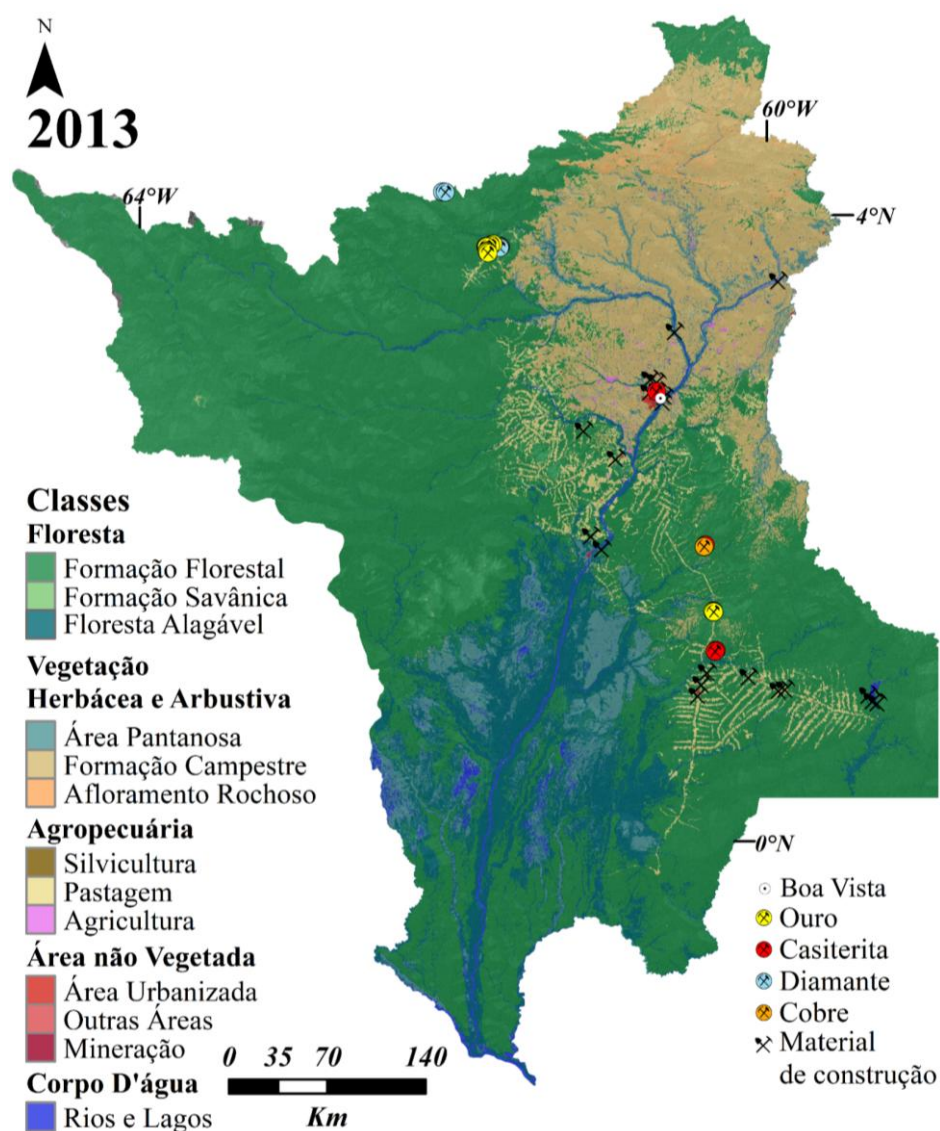


Figura 18 - Mapa de uso e cobertura do solo do Estado de Roraima. Fonte: modificado de Mapbiomas (2024)

As atividades econômicas características de Roraima incluem mineração, agropecuária e exploração madeireira. Em localidades como Serra do Sol e Alto Alegre, são extraídos principalmente ouro e diamantes (Brabosa & Buenafuente 2019, Rodrigues *et al.* 2017). O setor agropecuário se expandiu com a conversão de áreas de floresta em pastagens (Barni *et al.* 2012, Gama Neto *et al.* 2012). A exploração madeireira desempenha um papel importante na economia do Estado, apesar de enfrentar desafios relacionados à sustentabilidade e à exploração ilegal (Crivelli *et al.* 2017).

A principal bacia hidrográfica do Estado é a do Rio Branco, que serve como fonte de água para abastecimento público, meio de transporte e abriga uma rica biodiversidade aquática (Santos *et al.* 2021). A temperatura média anual em Roraima é de 26°C. No que diz respeito ao clima, a época de chuvas, está entre os meses de novembro e maio, em geral, o clima é predominantemente tropical (Carvalho 2015, Rodrigues *et al.* 2017).

A vegetação predominante é composta por florestas tropicais, savanas e campos abertos, mas a conversão de áreas em pastagens e a urbanização têm levado à fragmentação da vegetação nativa (Barni *et al.* 2012, Nascimento & Pacheco 2021, Gama Neto *et al.* 2012). Essa mudança no uso do solo tem impactos significativos na biodiversidade local e nos serviços ecossistêmicos, exigindo uma gestão cuidadosa para equilibrar o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental.

5.3 GEOLOGIA DA ÁREA

O Estado de Roraima está localizado no Oeste do cráton amazônico, sobre uma ampla porção do Escudo das Guianas. No Norte, é atravessado pelos cinturões Orosirianos, integrados pelo Grupo Parima, Cinturões ígneos Urubu, Orocaina e Cauarane-Coereoni e a Suíte Trairão. Ao Sul, encontra-se a grande província ígnea félsica Uatumã e ocorrências da grande província ígnea Avanavero. Também há a presença de eventos do magmatismo mesoproterozoico de suítes do tipo A no centro, juntamente com seções do cinturão ígneo Rio Urubu e da província ígnea félsica Uatumã. O estado também é atravessado de NE a SW por coberturas fanerozoicas.

Para este estudo, a área foi dividida utilizando os modelos propostos por (Almeida *et al.* 2007, 2008, Almeida & Macambira 2007, Freitas & Marmos 2017) para considerar os modelos de domínios tectonoestratigráficos (Figura 19). Foram considerados os seguintes:

Domínio Surumu (DSU): Localizado no norte e nordeste de Roraima, com estruturas ONO- ESE e E-O. Contém granitos cálcio-alcalinos e rochas vulcânicas com deformações do tipo xisto verde. As sequências sedimentares cratônicas cobrem parcialmente essas rochas. Inclui diversas formações e suítes intrusivas, como o Grupo Surumu, a Formação Cachoeira da Ilha e o Supergrupo Roraima (Almeida & Macambira 2007).

Domínio Guiana Central (DGC): Localizado no centro de Roraima, com estruturas NE-SO e predominância de gnaisses em fácies anfibolito. Contém intrusões do Mesoproterozoico de Anortosito-Mangerito-Granito e grabens formados no Mesozóico. Inclui a Suíte Rio Urubu e as intrusões da Suíte Apiaú (Mendes *et al.* 2022).

Domínio Parima (DPA): No oeste de Roraima, com terrenos de granito-greenstone do período Transamazônico, foliações NO-SE e E-O, e presença de plútons graníticos, batólitos de granito rapakivi e coberturas sedimentares. Também inclui parte do Graben do Tacutu (Juliani *et al.* 2005).

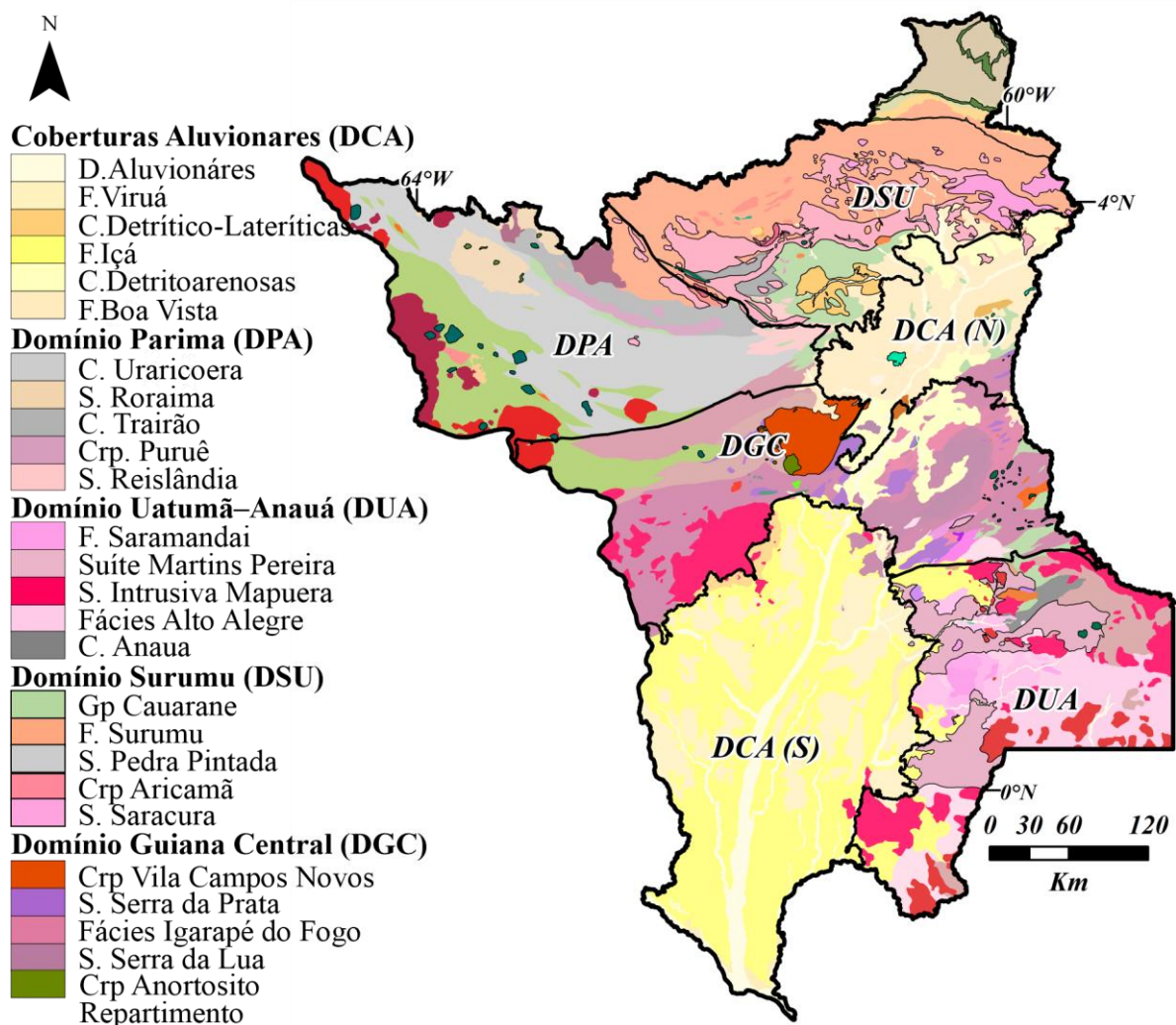


Figura 19 - Mapa geológico com limites dos domínios tectonoestratigráficos. Fonte: Modificado de (Mendes *et al.* 2023, Reis, Almeida, & Riker 2006, Reis, Almeida, Lopes, *et al.* 2006)

Domínio Uatumbã-Anauá (DUA): Situado no sudeste de Roraima, apresenta um magmatismo extenso de granitos e rochas supracrustais deformadas. Contém granitoides, gnaisses, migmatitos e diversas suítes intrusivas, como a Suíte Água Branca e o Grupo

Iricoumé (Reis *et al.* 2021).

Domínio das Coberturas Aluvionares (DCA): Estas cobrem áreas baixas de Roraima, conhecidas como "Pantanal Setentrional". Incluem a Formação Içá e sedimentos Cenozóicos, como as Formações Boa Vista e Areias Brancas. Ao Sul, também são encontrados tufo vulcânicos.

5.4 METODOLOGIA

5.4.1 Delimitação de Bacias Hidrográficas

Utilizando ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), como o ArcGIS 10.4, foram delimitadas 429 bacias hidrográficas em Roraima. 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.

As imagens SRTM utilizadas para a modelagem das drenagens durante a estação seca e para a construção dos polígonos nas divisórias de águas foram obtidas da NASA SRTM Digital Elevation 30m (Farr *et al.* 2007). A delimitação dos polígonos foi auxiliada pelos recursos HydroBASINS nível 12 (Lehner *et al.* 2022, Lehner & Grill 2013), WWF HydroATLAS Basins Level 07 (Lehner *et al.* 2022) Bacias Hidrográficas Ottocodificadas (BHO) do Níveis Otto 1-7 (Texeira 2012). Esses produtos homólogos foram utilizados porque o sistema de codificação de Pfafstetter é compatível apenas com hidrografia vetorial representada por um gráfico binário anti-arborescente, o que resulta na simplificação de regiões complexas, como áreas anastomosadas, reticuladas, deltas ou com múltiplas confluências causando perda de informações hidrográficas (Teixeira *et al.* 2022), como é o caso de algumas bacias hidrográficas da Roraima.

5.4.2 Coleta, preparação e análise química das amostras

Conforme descrito no Atlas Geoquímico do Estado de Roraima: Projeto Levantamento Geoquímico de Baixa Densidade do Estado de Roraima, elaborado pelo SGB/CPRM em 2017, foram coletadas amostras replicatas a cada dez amostras. O controle da amostragem em campo foi conduzido por meio da coleta de amostras replicadas, sendo uma replicata a cada dez amostras coletadas, com o intuito de avaliar a variabilidade dos resultados analíticos (Freitas & Marmos 2017). Devido às limitações impostas pela restrição de acesso a diversas terras indígenas e/ou a áreas com acesso

exclusivo por helicópteros, a amostragem geoquímica foi realizada em apenas 56% do território roraimense, correspondente a uma superfície aproximada de 126.000 km².

As amostras foram secas a 60 °C em um forno de ar forçado durante 48 horas para eliminar a umidade. Posteriormente, foram pulverizadas e peneiradas em uma malha menor que 80 mesh (0,117 mm) utilizando um moinho de anéis. Realizou-se uma digestão em água régia (HNO₃ + 3HCl) em um sistema de digestão por microondas para decompor as matrizes minerais e liberar os elementos traço. Essa metodologia é amplamente utilizada para facilitar comparações com outros estudos (Marques *et al.* 2023, Rente 2023, Salomão *et al.* 2021a, Salomão *et al.* 2021b, Farias, *et al.* 2021, Zumlot *et al.* 2009).

A análise dos elementos traços foi realizada por espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) e espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) no laboratório SGS GEOSOL®. Os elementos analisados incluíram: Au, Ag, Al, As, 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, Pt, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr.

5.4.3 Análise estatística univariada

Para a Análise Exploratória de Dados (AED) dos elementos, foi realizada uma inspeção qualitativa inicial do conjunto de dados, com o objetivo de identificar padrões e tendências gerais. A seguir, foram calculados diversos parâmetros estatísticos, incluindo a média aritmética (Mean), o desvio padrão (SD), a mediana (Median), a assimetria (SKEW) e a curtose (Rku), tanto para os dados brutos (Raw Data - RD) quanto para os dados transformados logaritmicamente (Log10). As amostras foram comparadas com os limites de detecção inferiores (LLD) e superiores (ULD) para determinar a confiabilidade das medições. Explorando as possíveis diferenças entre as populações de dados relacionadas à tectonoestratigrafia, foi realizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Esse teste avalia se há diferenças estatisticamente significativas nas distribuições dos elementos químicos. A transformação logarítmica (Log10) foi aplicada para melhorar a normalidade dos dados e reduzir a assimetria e dispersão, especialmente para elementos com distribuições altamente assimétricas ou com grande variabilidade nas concentrações. Para avaliar a normalidade estatística dos dados, foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk, tanto para os dados brutos quanto para os dados transformados logaritmicamente (Parrone *et al.* 2019). De acordo com o percentual de amostras acima do limite inferior de detecção

para cada elemento, foram escolhidas as que possuem mais de 70% para realizar os cálculos de *Baseline/Background*, estatística univariada, bivariada e multivariada.

5.4.4 Avaliação Do Background Geoquímico

Para comparar os valores do *Baseline/Background* geoquímico obtidos com estudos análogos, foram calculados os percentis 98, 95, 90 e 75, assim como o Boxplots, Mediana ± 2 * desvio absoluto da mediana Equação (1) (mMAD) e Tukey's inner fence (TIF). Os dados foram transformados utilizando log- transformação para normalizar sua distribuição. A partir dos dados transformados, definiu-se o intervalo interquartil (IQR) e estabeleceram-se os limites superior e inferior utilizando fórmulas específicas. Esses métodos fornecem uma avaliação robusta do *baseline/background* geoquímico, minimizando a influência de valores atípicos.

O mMAD é uma ferramenta estatística robusta usada para definir os limites superior e inferior do *baseline/background* geoquímico Equação (2) e (3), minimizando a influência de valores atípicos na análise de dados geoquímicos complexos (Bereş *et al.* 2024, Cembranel *et al.* 2017, Correa-Burrows *et al.* 2021, Habibnia *et al.* 2021, Sahoo *et al.* 2020, Tume *et al.* 2023). Este método baseia-se na mediana e no desvio absoluto da mediana (MAD), em vez da média e do desvio padrão, proporcionando maior resistência a distorções causadas por valores extremos.

O MAD é calculado como a mediana das diferenças absolutas dos valores em relação à mediana dos dados:

$$MAD=1.48 \times \text{Mediana} (|x_i - \text{Mediana} (x)|) \quad (1)$$

Onde X_i é o valor da concentração de cada amostra, e a mediana é definida para uma amostra $x_1, x_2, \dots, x_n$ como mediana (x_i). O fator 1,48 é utilizado para ajustar o MAD de forma que seja comparável ao desvio padrão em uma distribuição normal (Salomão *et al.* 2020). Para estabelecer os limites superior e inferior do background geoquímico, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\text{Limite Superior} = \text{Mediana} (x) + 2 \times MAD \quad (2)$$

$$\text{Limite Inferior} = \text{Mediana} (x) - 2 \times MAD \quad (3)$$

Esses limites são calculados a partir dos dados log-transformados e, posteriormente, são revertidos para obter os valores finais. A log-transformação é

essencial para normalizar a distribuição dos dados e melhorar a precisão da análise (Correa-Burrows *et al.* 2021).

O método mMAD é considerado um dos mais robustos para a identificação de outliers e a definição de limiares geoquímicos, especialmente em conjuntos de dados geológicos que costumam apresentar alta variabilidade e a presença de valores extremos (Bereş *et al.* 2024, Habibnia *et al.* 2021). Essa abordagem foi validada e amplamente utilizada em estudos geoquímicos e ambientais para diferenciar os conteúdos geogênicos daqueles influenciados por atividades antropogênicas (Tume *et al.* 2023).

O método TIF é baseado nos trabalhos publicados por Tukey (1977), que estabelecem métodos de Análise Exploratória de Dados (EDA), utilizados por autores como (Beyer 1981, Páez & Boisjoly 2022). Outros métodos derivados do TIF envolvem a definição de intervalos com base na média e no desvio padrão, sendo mais conservadores em relação aos limites definidos com base nos quartis Q3 e Q1, utilizados pelo método tradicional (Habibnia *et al.* 2021). Para definir os limites superior e inferior do método, são calculados os quartis Q3 e Q1 dos dados previamente transformados logaritmicamente. Com a diferença entre Q3 e Q1, é calculado o intervalo interquartil (IQR) Equação (4). Após realizar essas operações, pode-se inserir os valores nas seguintes fórmulas para definir o limite superior (UL) Equação (5) e o limite inferior (LL) Equação (6) do Background (Salomão *et al.* 2020, Souza-Filho *et al.* 2022).

$$IQR=Q3-Q1 \quad (4)$$

$$TIF \text{ Limite Superior}=10^{(\log_{10}(Q3)+1.5 \times \log_{10}(IQR))} \quad (5)$$

$$TIF \text{ Limite Superior}=10^{(\log_{10}(Q1)-1.5 \times \log_{10}(IQR))} \quad (6)$$

Para outros autores, como Marques *et al.* (2023), a análise dos limiares estabelece limites além dos anteriormente citados, representando um nível superior para catalogar anomalias extremas, utilizando também o diagrama de caixa (*boxplot*). O primeiro limiar (*first threshold -TH1*) corresponde ao valor do whisker superior, que delimita o intervalo de concentração de fundo do intervalo de concentração de anomalias ($Q3 + 1.5 * IQR$). O segundo limiar (*second threshold -TH2*) separa o intervalo de anomalia de primeiro grau do intervalo de anomalia de segundo grau ($Q3 + 3 * IQR$). Esse método facilita uma melhor compreensão da distribuição espacial dos elementos na área de estudo e seu comportamento estatístico, levando em conta principalmente as diversas características

das unidades geológicas.

5.4.5 Análise Estatística Bi e Multivariada

Para a identificação de relações entre elementos químicos, que podem estar associados a processos geoquímicos ou antropogênicos, foi utilizada a correlação de Spearman, uma técnica não paramétrica. A principal vantagem de utilizar este método reside em sua capacidade de analisar associações em dados não paramétricos, o que o torna particularmente adequado para dados geoquímicos que apresentam distribuições não normais (Aldis & Aherne 2021, Gautheir 2001, Schober *et al.* 2018).

As análises referentes à estatística multivariada empregaram os dados transformados utilizando o método CLR e através do software STATISTICA 12 foram realizadas análises de cluster, bem como análises fatoriais exploratórias e confirmatórias. Na aplicação da estatística multivariada, elementos como Hf e Zr foram omitidos por gerarem altas cargas na análise de viabilidade e, conseqüentemente, serem responsáveis por uma parte importante da variância. Esses elementos foram retirados para permitir uma melhor interpretação dos elementos de interesse.

Além dessas considerações, foi utilizado o método de Ward para o agrupamento hierárquico no caso do cluster. Essa decisão baseou-se na capacidade do método de minimizar o incremento da soma dos quadrados dentro dos clusters, gerando grupos mais homogêneos internamente. Isso resulta em clusters esféricos e compactos, menos suscetíveis aos efeitos de outliers, o que aumenta a robustez da análise (Hafeezallah *et al.* 2024). Como medida de distância, se empregou a distância 1-Pearson R, menos sensível às diferenças absolutas nos valores e mais focada na tendência geral dos dados (Zhang *et al.* 2023), sendo útil quando os dados contêm outliers que poderiam distorcer outras medidas de distância, como a euclidiana (Ogasawara & Kon 2021).

Por sua vez, a Análise Fatorial teve como objetivo identificar padrões subjacentes nos dados multivariados, permitindo agrupar variáveis altamente correlacionadas entre si e reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados. Quando aplicada a estruturas de dados composicionais, permite a identificação de associações geoquímicas que refletem a influência de processos geológicos e ambientais específicos na composição dos sedimentos (Mou *et al.* 2023). Juntamente com a transformação CLR, que oferece vantagem ao minimizar os efeitos do fechamento ("*closure effect*"), a análise fatorial facilita a interpretação dos fatores e reduz a incidência de correlações espúrias,

melhorando a robustez dos resultados (Egozcue *et al.* 2003).

Em uma primeira aplicação da Análise Fatorial Exploratória, os elementos empregados foram aqueles que apresentaram mais de 70% das amostras acima do limite de detecção. Estes elementos incluem: Al, Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, La, Mn, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, Y e Zn. O método de extração utilizado foi o de Componentes Principais, com rotação *Varimax Normalized*. O limite de autovalores foi definido como 1. Para avaliar a adequação da amostra, calculou-se o índice *Kaiser-Meyer-Olkin* (KMO) e, para determinar a existência de correlações significativas entre as variáveis, aplicou-se o teste de esfericidade de *Bartlett*.

Junto com os dados gerados pela análise fatorial, foram utilizados os scores fatoriais (*factor scores*) para gerar boxplots para cada um dos fatores. Com base nos percentis e nos limites superior e inferior dos boxplots, foram definidos os limiares para identificar valores atípicos. Os valores localizados entre o limite superior e o intervalo Q3 foram usados para gerar mapas de associações multielementares, empregando pontos e o modelo de bacias hidrográficas.

Diversos índices geoquímicos foram calculados para elementos como As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Ni e Zn, com o objetivo de determinar o enriquecimento dos sedimentos em relação a esses elementos. Esses elementos foram analisados por estarem contemplados na RESOLUÇÃO CONAMA Nº 454/2012. O objetivo desses índices ambientais é avaliar a qualidade dos sedimentos e o grau de contaminação. Os índices calculados incluem o fator de enriquecimento (EF), o fator de contaminação (CF), o grau de contaminação (CD), índice carga de poluição (PLI), o grau de contaminação modificado (mCD) e o índice de risco ecológico potencial (IREP).

5.4.6 Fator de Enriquecimento (EF)

O fator de enriquecimento (EF) é uma ferramenta que permite avaliar a influência das fontes antropogênicas sobre o meio ambiente (Ferreira *et al.* 2022, Mitran *et al.* 2024, Reimann & Caritat 2000, Xue *et al.* 2023). Este fator determina a normalização da concentração de um elemento cuja contaminação está sendo avaliada em relação à concentração de um metal de referência com baixa variabilidade de ocorrência na crosta terrestre. Os metais de referência mais comumente utilizados são alumínio, ferro e manganês, devido à sua estabilidade e capacidade de transportar metais (Ferreira *et al.* 2022, Han & Gu 2023, Mitran *et al.* 2024). O EF é calculado pela seguinte Equação (7).

$$EF = \frac{\left(\frac{C_n}{C_M}\right)_{\text{Amostras}}}{\left(\frac{C_n}{C_M}\right)_{\text{Mediana}}} \quad (7)$$

Onde (C_n/C_M) é a relação entre a concentração do elemento n “ (C_n) ” e a concentração do elemento de referência (C_M) na amostra de sedimento. O (C_n/C_M) Mediana é a relação entre as medianas do elemento analisado e a concentração do elemento de referência.

A escolha do elemento de referência deve se levar em consideração a abundância natural, estabilidade em condições naturais, compatibilidade com o meio, facilidade de detecção e fontes naturais predominantes. Li *et al.* (2021) utilizou o Li como metal de referência devido à sua capacidade de rastrear processos naturais e sua baixa influência por aportes antropogênicos. O elemento normalizador mais comumente utilizado é o Al, devido à sua ubiquidade e estabilidade na composição dos sedimentos, oferecendo excelentes resultados em diferentes estudos (Zubir *et al.* 2018, Salah *et al.* 2012, Zhao *et al.* 2012).

Neste estudo, foram utilizados como elementos de referência o Al, Fe+Mn e Ca+Mg devido à sua estabilidade e abundância na crosta terrestre. O Al está associado aos argilominerais, o Fe+Mn estão associados a óxidos-hidróxidos e o Ca+Mg a carbonatos, representando diferentes processos geológicos e mineralizações. O fator de enriquecimento mineral é classificado em cinco categorias (Tabela 5) conforme postulado por Hakanson (1980) e empregado por autores como Laudiño *et al.* (2024). sedimentos também podem e dos sedimentos também pode ser expressa como fator de enriquecimento percentual (%EF), fornecendo uma medida adicional da influência de fontes antropogênicas.

5.4.7 Fator de Contaminação (CF)

O Fator de Contaminação (CF) em sedimentos é uma ferramenta essencial para avaliar o grau de contaminação ambiental, especialmente em ambientes aquáticos (Aduwo & Adeniyi 2018, Usese *et al.* 2017). Ele tem sido empregado em diversos estudos para indicar a fonte de contaminação, sendo um mecanismo eficaz para distinguir entre fontes naturais e antrópicas. Uma de suas funções também é categorizar o nível de contaminação, servindo como base para direcionar a atenção para áreas específicas.

Dessa forma, destacam-se os principais aspectos de sua importância: avaliação do

impacto ambiental, identificação de fontes de contaminação, classificação do nível de contaminação, monitoramento e gestão ambiental, permitindo a adoção de estratégias de remediação. Em diferentes regiões, são utilizados valores de referência (Hung Phu *et al.* 2024, Islam *et al.* 2023). Para este estudo, foi adotada a mediana dos EPT como valor de referência. Além de seu uso individual, o FC pode ser aplicado em conjunto com diversos cálculos Equação (8), utilizando diferentes elementos para fornecer um panorama geral de uma determinada área (Arslan Kaya *et al.* 2024, Bat *et al.* 2024, Laudiño *et al.* 2024).

O CF é calculado se dividindo a concentração de cada metal no sedimento pelo valor de referência:

$$CF = \frac{(C_n) \text{ Amostras}}{(C_M) \text{ Mediana}} \quad (8)$$

Os valores de CF de acordo com as recomendações de Hakanson (1980) onde:

Tabela 4 - Classes do fator de contaminação e fator de enriquecimento

Fator de contaminação		Fator de enriquecimento	
Contaminação dos sedimentos	Classes de CF	Enriquecimento dos sedimentos	Classes de FE
Baixa	<1	Sem (NE)	<1
Moderada	1–3	Menor (MiE)	1–3
Considerável	3–6	Moderado (MoE)	3–5
Muito alta	>6	Moderadamente Severo (MSE)	5–10
		Severo (SE)	10–25
		Muito Severo (VSE)	25–50
		Extremamente Severo (ESE)	>50

C_n = Concentração do metal de interesse em um local
 C_M = Mediana de todas as concentrações do mesmo metal na área de estudo/Domínio tectonoestratigráfico

5.4.8 Grau de Contaminação (Cd) e Grau de Contaminação Modificado (mCD)

O Cd criado por Hakanson (1980) emprega o cálculo do CF para 7 EPT (As, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn) e o contaminante orgânico bifenilo policlorado (PCB). Tomando como exemplo o número de contaminantes considerados por Hakanson, os cálculos deste estudo foram realizados com os elementos As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn. Abrahim (2005) propôs uma forma modificada e generalizada do cálculo do grau de contaminação que permite maior flexibilidade Equação (9), assim como a inclusão de uma gama mais ampla de contaminantes. A modificação da fórmula do Cd consistiu na soma dos CF dividida pelo número de contaminantes analisados Equação (10). A escala para a avaliação dos resultados é amplamente utilizada por vários autores (Tabela 5) (Arslan Kaya *et al.* 2024,

Bat *et al.* 2024, Devanesan *et al.* 2017, Harsha *et al.* 2023, Laudiño *et al.* 2024).

Tabela 5 - Classes do Fator de Contaminação e Fator de Contaminação Modificado

Grau de contaminação		Grau de contaminação modificado	
Descrição	Cd Classes	Descrição	mCd Classes
Baixo	<6	Muito baixo	<1
Moderado	6–12	Baixo	1,5–2
Considerável	12–24	Moderado	2–4
Muito alto	>24	Alto	4–8
		Muito alto	8–16
		Extremo	16–32
		Ultra	>32

$$C_d = \sum_{i=1}^m C_f^i \quad (9)$$

$$mCd = \frac{\sum_{i=1}^m C_f^i}{n} \quad (10)$$

5.4.9 Índice de Carga de Poluição (PLI)

O Índice de Carga de Poluição (PLI, do inglês *Pollution Load Index*) é uma ferramenta amplamente utilizada para avaliar o nível de contaminação por metais potencialmente tóxicos em sedimentos. Desenvolvido por Tomlinson *et al.* (1980), o PLI é um índice que oferece uma visão geral do grau de poluição em um determinado local. Equação (11), considerando a multiplicação dos fatores de contaminação (CF) de diversos metais e, em seguida, tomando a raiz enésima do produto resultante. A fórmula geral para calcular o PLI é a seguinte:

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n)^{\left(\frac{1}{n}\right)} \quad (11)$$

Onde CF representa o fator de contaminação de um metal específico, definido como a razão entre a concentração desse metal na amostra e a concentração de fundo correspondente. O parâmetro n se refere ao número de metais considerados no cálculo.

Este índice é particularmente útil para sintetizar a informação sobre a poluição por metais pesados em uma única métrica, o que facilita a comparação entre diferentes locais ou zonas. De acordo com a literatura, um valor de PLI maior que 1 indica que a área está poluída, enquanto um valor menor que 1 sugere que a área não está poluída (Chris & Anyanwu 2022, Sachithanandam *et al.* 2020).

Além disso, o PLI pode ser aplicado em diferentes escalas, desde o nível de um único ponto de amostragem até zonas maiores, incluindo estuários inteiros. Esta flexibilidade torna o PLI uma ferramenta robusta para estudos ambientais que buscam identificar e quantificar a poluição por metais pesados em diferentes contextos geográficos (Pandey *et al.* 2015, Yongo *et al.* 2023). Portanto, o uso do PLI em estudos geoquímicos permite uma avaliação abrangente e comparativa da carga de poluição em sedimentos, sendo essencial para a determinação dos riscos ambientais associados à presença de metais pesados em áreas específicas (Radhakrishnan *et al.* 2023).

5.4.10 Índice de Risco Ecológico Potencial (IREP)

O Índice de Risco Ecológico Potencial estabelecido por Hakanson (1980) é utilizado para examinar os perigos ecológicos provocados por metais pesados. O IREP é determinado utilizando a seguinte fórmula: E_i simboliza o fator de risco individual do metal pesado i , enquanto T_{rf} simboliza o fator de resposta tóxica do metal pesado i Equação (12). Os valores de T_{rf} são: As (1), Cd (30), Cr (2), Cu (5), Hg (40), Ni (5), Pb (5) e Zn (1).

$$RI = T_{rf} \times CF_i \quad (12)$$

$$IREP = \sum RI = \sum (T_{rf} \times CF_i) \quad (13)$$

Tabela 6 - Classes do Índice de Risco Ecológico Potencial

Índice de Risco Ecológico Potencial	
Descrição	IREP Classes
Baixo	<150
Meio	300
Significativo	600
Extremo	>600

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.5.1 Distribuição de amostragem nas bacias hidrográficas de Roraima

A percentagem de área amostrada, representada pelas bacias hidrográficas delimitadas, corresponde à 47.422% da área do Estado de Roraima. A divisão por domínios tectonoestratigráficos permitiu elucidar o comportamento dos elementos químicos nos sedimentos nas bacias hidrográficas e como a geologia controla a distribuição dos elementos químicos. A quantidade de amostras em cada domínio

tectonoestratigráfico foi fundamental para determinar e associar o comportamento dos elementos tanto de forma individual quanto em suas associações.

O DPA, localizado no noroeste do Estado, apresentou um número reduzido de amostras, representando apenas 3,969% da área total do domínio, razão pela qual os cálculos de valores de *baseline/background* não foram realizados para essa região. Isso é, de fato, uma limitação, pois neste domínio correm as águas dos rios Urariquera, Mucajaí, Uraricaá e Parima, onde recentemente se observaram mudanças no uso e cobertura do solo em áreas classificadas como de garimpo. Na época da coleta das amostras, a área sobre esse domínio possuía uma das zonas mais preservadas dentro da bacia do rio Branco.

Dados recentes de classificação de uso e cobertura do solo, fornecidos pelo MAPBIOMAS Coleção 9, indicam que o crescimento de atividades como a mineração aumentou exponencialmente na Amazônia. No caso de Roraima, foram utilizados dados multitemporais do MAPBIOMAS, onde foi observado que áreas dedicadas à mineração sofreram uma mudança vertiginosa, passando de 205 ha em 2017 para 463 ha em 2018. Diversos estudos destacam as notáveis mudanças na conversão agrícola e o detrimento na resiliência florestal autóctone (Albuquerque *et al.* 2015, Barbosa *et al.* 2019, Urquiza *et al.* 2018) no território do DPA, que se encontra dentro da bacia do rio Branco. O domínio representa 18,497% da bacia do rio Branco. Isso soma mais uma razão pela qual os valores de referência não foram calculados para este domínio, evitando assim que os dados gerados neste trabalho sejam utilizados de maneira que comprometa sua veracidade.

Por outro lado, a bacia do rio Jufari apresentou o maior percentual de área amostrada em comparação com outras bacias. Aproximadamente 84,335% da área desta bacia está inserida dentro das microbacias amostradas, estando completamente situada no domínio das coberturas aluvionares, como pode ser observado na (Figura 20). A maior parte das áreas acumuladas reflete as medianas das áreas das microbacias dentro de sua respectiva bacia.

Os resultados variaram, com algumas bacias atingindo mais de 2000 km² de área, devido ao fato de que essas bacias são delimitadas pela área de influência da amostra e não estritamente pela hierarquia das drenagens (Figura 20). No entanto, as bacias hidrográficas na Amazônia apresentam uma particularidade: em regiões onde a savana

predomina, como no sul de Roraima, tendem a abranger uma área maior. Esse efeito é atribuído à baixa declividade dessas áreas. Em bacias como a do rio Branco, que se estende de norte a sul, essa variabilidade é bastante evidente. A bacia amazônica se distingue por extensas planícies aluviais e uma rede de rios que serpenteiam por uma paisagem relativamente plana. Essa topografia plana permite que a água se acumule em grandes extensões, criando bacias hidrográficas expansivas que podem captar e reter as precipitações (Coe *et al.* 2002).

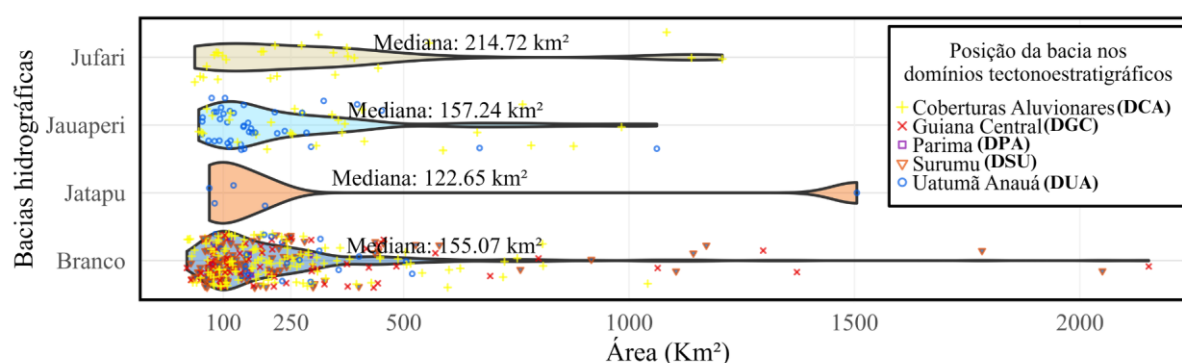


Figura 20 - Diagramas de violino da área (km²) das microbacias hidrográficas em relação aos domínios tectonoestratigráficos. Fonte: Autores

As bacias apresentam uma ampla heterogeneidade e estão divididas entre cinco domínios tectonoestratigráficos. Com as limitações de amostragem mencionadas anteriormente, existem porções, como o oeste do DGC, o oeste da bacia do rio Branco, o DPA e a bacia do rio Jatapú, que não possuem um número suficiente de amostras que cubra uma área representativa. Portanto, foram realizados cálculos para cada uma dessas segmentações, visando oferecer um valor cada vez mais preciso para que estudos futuros possam comparar áreas focalizadas com maior precisão.

Tabela 7 - Porcentagem das bacias hidrográficas de Roraima cobertas pelas microbacias e número de amostras em cada uma

Bacia hidrográfica	Área da bacia (km ²)	Área das microbacias (km ²)	Porcentagem da área das microbacias na bacia (%)	Número de amostras (n)
Branco	193175,693	78498,123	40,636	328
Jauaperi	39136,334	17290,588	44,18	69
Jufari	10209,213	8609,926	84,335	27
Jatapú	68428,089	1970,417	2,88	5

Fonte: Autor

5.5.2 Análise estatística dos elementos PTE nos sedimentos de Roraima

Os maiores percentuais de amostras abaixo do limite inferior de detecção (LID) foram para As (83,92%), Cd (51,75%) e Hg (52,45%), o que sugere uma baixa presença desses elementos na maioria das amostras (Tabela 8). Os valores de SD e MAD próximos de zero para As, Cd e Hg indicam uma baixa variabilidade em torno da média e da mediana, refletindo uma distribuição altamente concentrada em torno do LID. Além disso, a elevada assimetria (Skew) e curtose (Rku) nesses elementos confirmam a presença de outliers, o que é consistente com distribuições não normais.

Tabela 8 - Sumário estatístico dos elementos analisados, incluindo LLD (Limite Inferior de Detecção), AALD (%) (Percentual de Amostras Abaixo do Limite de Detecção), Média (DB: Dados Brutos, Log: Dados Logarítmicos), SD (Desvio Padrão), MAD (Desvio Absoluto Mediano), Skew (Coeficiente de Assimetria), Rku (Curtose), valores mínimos (Min), mediana e máximos (Max), além do teste de normalidade Shapiro-Wilk

Elemento	Unidades	LID	AALD%	Média		SD		MAD		SKEW		Rku		Min		Median		Max		Shapiro-Wilk	
				RD	Log10	RD	Log10	RD	Log10	RD	Log10	RD	Log10	RD	Log10	RD	Log10	RD	Log10	RD	Log10
Ag	mg kg ⁻¹	0,01	31,24	0,06	-1,61	0,12	0,12	0,78	-0,11	8,2	0,23	98,46	-0,79	0	-2,3	0,03	-1,52	1,75	0,24	<0,05	<0,05
Al	at.%	0,01	1,17	0,55	-0,47	0,68	0,43	1,83	0,26	3,16	-0,04	12,15	0,41	0	-1,7	0,34	-0,47	5,04	0,7	<0,05	<0,05
As*	mg kg⁻¹	1	83,92	0,65	-0,23	0,45	0,17	0,5	-0,3	3,96	2,69	17,62	6,77	0,5	-0,3	0,5	-0,3	4	0,6	<0,05	<0,05
Au	mg kg ⁻¹	0,1	100	0,05	-1,3	0,01	0,05	0,05	-1,3	15,2	13,55	245,1	190,7	0,1	-1,3	0,05	-1,3	0,3	-0,52	<0,05	<0,05
Ba	mg kg ⁻¹	5	13,75	35,22	1,31	41,3	0,5	220,4	2,34	5,84	-0,45	65,95	-0,54	2,5	0,4	25	1,4	570	2,76	<0,05	<0,05
Be	mg kg ⁻¹	0,1	47,09	0,19	-0,93	0,23	0,41	0,78	-0,11	2,4	0,68	6,63	-0,81	0,1	-1,3	0,1	-1	1,4	0,15	<0,05	<0,05
Bi	mg kg ⁻¹	0,02	50,12	0,55	-1,59	0,68	0,49	0,01	-2	3,16	1,23	12,15	2,15	0	-2	0,34	-2	5,04	0,83	<0,05	<0,05
Ca	at.%	0,01	45,22	0,02	-0,48	0,03	0,43	1,83	0,26	3,5	-0,03	17,25	0,4	0	-1,7	0,01	-0,47	0,24	0,7	<0,05	<0,05
Cd*	mg kg⁻¹	0,01	51,75	0,02	-1,94	0,03	0,44	0,01	-2,3	3,53	0,85	22,6	-0,6	0	-2,3	0,01	-2,3	0,31	-0,51	<0,05	<0,05
Ce	mg kg ⁻¹	0,05	0	36,06	1,34	48,61	0,44	138,8	2,14	5,05	-0,13	38,81	0,56	0,5	-0,27	21,2	1,33	510,9	2,71	<0,05	0,11
Co	mg kg ⁻¹	0,1	0	1,68	0,07	1,6	0,36	6,64	0,82	2,52	0,09	8,51	-0,34	0,1	-1	1,1	0,04	11,9	1,08	<0,05	0,05
Cr*	mg kg⁻¹	1	0	20,75	0,98	52,84	0,43	33,75	1,53	6,53	1,32	51,36	2,65	2	0,3	8	0,9	582	2,76	<0,05	<0,05
Cs	mg kg ⁻¹	0,05	24,01	0,32	-0,83	0,54	0,55	2,31	0,36	5,38	0,06	39,55	-0,7	0	-1,6	0,17	-0,77	5,83	0,77	<0,05	<0,05
Cu*	mg kg⁻¹	0,5	1,17	5,68	0,65	4,14	0,32	16,56	1,22	2,04	-0,68	7,28	1,88	0,3	-0,6	4,5	0,65	35,6	1,55	<0,05	<0,05
Fe	at.%	0,01	0	1,19	0	0,76	0,25	2,95	0,47	2,35	-0,05	10,56	0,24	0,1	-0,85	0,99	0	7,06	0,85	<0,05	0,98
Ga	mg kg ⁻¹	0,1	0	2,57	0,26	2,75	0,34	6,18	0,79	3,13	0,43	12,57	0,73	0,1	-1	1,7	0,23	23,1	1,36	<0,05	<0,05
Ge	mg kg ⁻¹	0,1	86,48	0,07	-1,23	0,06	0,19	0,05	-1,3	4,16	2,89	19,47	7,62	0,1	-1,3	0,05	-1,3	0,5	-0,3	<0,05	<0,05
Hf	mg kg ⁻¹	0,05	12,59	0,04	-0,69	0,1	0,52	2,28	0,36	5,09	-0,04	40,41	-0,35	0	-1,6	0,22	-0,66	6,97	0,84	<0,05	<0,05
Hg*	mg kg⁻¹	0,01	52,45	0,04	-1,89	0,1	0,54	0,01	-2,3	5,74	1,27	41,15	0,85	0	-2,3	0,01	-2,3	1,05	0,02	<0,05	<0,05
In	mg kg ⁻¹	0,02	82,75	0,02	-1,9	0,02	0,24	0,01	-2	8,12	2,69	83,52	7,79	0	-2	0,01	-2	0,31	-0,51	<0,05	<0,05
K	at.%	0,01	43,12	0,03	-0,48	0,04	0,43	1,83	0,26	1,6	-0,03	2,58	0,4	0	-1,7	0,02	-0,47	0,21	0,7	<0,05	<0,05
La	mg kg ⁻¹	0,1	0	16,87	1	24,89	0,44	56,57	1,75	5,43	-0,05	42,34	0,9	0,3	-0,52	9,9	1	270,2	2,43	<0,05	<0,05
Li	mg kg ⁻¹	1	71,56	1,17	-0,48	1,8	0,43	1,83	0,26	4,33	-0,03	22,73	0,4	0,5	-1,7	0,5	-0,47	15	0,7	<0,05	<0,05
Mg	at.%	0,01	58,74	0,02	-2,01	0,03	0,41	0,01	-2,3	3,34	1,15	13,88	0,1	0	-2,3	0,01	-2,3	0,19	-0,72	<0,05	<0,05
Mn	mg kg ⁻¹	5	0	218,8	2,21	192,4	0,33	738,5	2,87	2,65	0,01	10,48	0,17	12	1,08	160	2,2	1593	3,2	<0,05	0,71
Mo	mg kg ⁻¹	0,05	15,15	0,47	-0,62	0,81	0,53	1,38	0,14	7,24	-0,32	80,65	0,05	0	-1,6	0,28	-0,55	11,29	1,05	<0,05	<0,05
Na	at.%	0,01	88,58	0,01	-2,25	0	0,16	0,01	-2,3	5,12	3,24	34,39	10,31	0	-2,3	0,01	-2,3	0,05	-1,3	<0,05	<0,05
Nb	mg kg ⁻¹	0,05	4,9	1,14	-1,61	1,66	0,57	0,78	-0,11	7,23	0,23	85,06	-0,79	0	-2,3	0,68	-1,52	23,85	0,24	<0,05	<0,05
Ni*	mg kg⁻¹	0,5	5,36	3,83	0,42	4,11	0,38	9,39	0,97	3,75	-0,39	20,16	1,35	0,3	-0,6	2,5	0,4	38,5	1,59	<0,05	<0,05
P	mg kg ⁻¹	50	51,75	75,64	1,71	84,52	0,36	25	1,4	2,96	0,77	11,2	-0,53	25	1,4	25	1,4	557	2,75	<0,05	<0,05
Pb*	mg kg⁻¹	0,2	0,47	7,72	0,78	5,65	0,33	27	1,43	2,37	-1,12	9,21	4,45	0,1	-1	6,4	0,81	43,4	1,64	<0,05	<0,05
Pd	mg kg ⁻¹	0,1	63,4	0,26	-0,96	0,47	0,5	0,05	-1,3	3,76	1,16	17,41	0,01	0,1	-1,3	0,05	-1,3	3,8	0,58	<0,05	<0,05
Pt	mg kg ⁻¹	0,1	99,77	0,05	-1,3	0,01	0,03	0,05	-1,3	20,7	20,69	428	428	0,1	-1,3	0,05	-1,3	0,2	-0,7	<0,05	<0,05
Rb	mg kg ⁻¹	0,2	13,52	3,84	0,22	4,49	0,67	52,19	1,72	2,07	-0,49	5,84	-0,79	0,1	-1	2,2	0,34	29,3	1,47	<0,05	<0,05
S	at.%	0,01	86,01	0,01	-2,22	0,01	0,22	0,01	-2,3	4,16	2,85	18,63	7,32	0	-2,3	0,01	-2,3	0,06	-1,22	<0,05	<0,05
Sb	mg kg ⁻¹	0,05	39,86	0,08	-1,22	0,07	0,35	0,8	-0,09	2,02	0,28	8,15	-1,21	0	-1,6	0,06	-1,22	0,65	-0,19	<0,05	<0,05
Sc	mg kg ⁻¹	0,1	20,98	1,51	-0,18	1,82	0,67	13,41	1,13	2,76	-0,59	11,78	-0,8	0,1	-1,3	1	0	15,2	1,18	<0,05	<0,05
Se	mg kg ⁻¹	1	87,18	0,5	-0,3	1,08	0,25	0,5	-0,3	4,79	2,84	29,1	7,08	0,5	-0,3	0,5	-0,3	11	1,04	<0,05	<0,05
Sn	mg kg ⁻¹	0,3	12,35	1,06	-0,1	1,02	0,35	2,99	0,48	7,51	-0,61	94,19	0,57	0,2	-0,82	0,9	-0,05	15,3	1,18	<0,05	<0,05
Sr	mg kg ⁻¹	0,5	12,59	3,35	0,26	3,93	0,51	26,15	1,42	2,94	-0,11	14,85	-0,85	0,3	-0,6	1,9	0,28	36,1	1,56	<0,05	<0,05
Ta	mg kg ⁻¹	0,05	93,71	0,03	-1,57	0,01	0,12	0,03	-1,6	5,51	4,19	35,89	17,45	0	-1,6	0,03	-1,6	0,17	-0,77	<0,05	<0,05
Te	mg kg ⁻¹	0,05	81,82	0,1	-1,45	0,36	0,39	0,03	-1,6	8,25	3,03	78,17	9,5	0	-1,6	0,03	-1,6	4,29	0,63	<0,05	<0,05
Th	mg kg ⁻¹	0,1	0,23	8,96	0,76	11,86	0,4	27,58	1,44	5,4	-0,27	44,16	2,4	0,1	-1,3	5,7	0,76	141,4	2,15	<0,05	<0,05
Ti	at.%	0,01	7,93	0,09	-1,33	0,11	0,49	0,52	-0,29	3,79	-0,14	21,55	-0,27	0	-2,3	0,05	-1,3	1,05	0,02	<0,05	<0,05
U	mg kg ⁻¹	0,05	0,47	0,98	-0,18	0,96	0,4	4,47	0,65	2,38	-0,2	7,55	0,14	0	-1,6	0,71	-0,15	6,9	0,84	<0,05	0,11
V	mg kg ⁻¹	1	3,73	10,57	0,8	14,6	0,45	46,86	1,67	4,95	-0,15	35,25	0,42	0,5	-0,3	6	0,78	155	2,19	<0,05	<0,05
W	mg kg ⁻¹	0,1	59,67	1,64	-0,82	7,96	0,75	0,05	-1,3	11,5	1,54	166	1,48	0,1	-1,3	0,05	-1,3	129,5	2,11	<0,05	<0,05
Y	mg kg ⁻¹	0,05	0	4,9	0,53	4,77	0,38	21,76	1,34	3,66	-0,27	24,1	0,08	0,2	-0,8	3,63	0,56	50,48	1,7	<0,05	0,06
Zn*	mg kg⁻¹	1	6,06	9,24	0,74	9,9	0,48	46,86	1,67	2,21	-0,3	6,63	-0,31	0,5	-0,3	6	0,78	75	1,88	<0,05	<0,05
Zr	mg kg ⁻¹	0,5	1,4	13,75	0,88	19,42	0,48	59,36	1,77	4,22	-0,16	25,59	0,55	0,3	-0,6	7,3	0,86	185,2	2,27	<0,05	0,01

(*)Valores de Background/Baseline para os elementos considerados como substâncias tóxicas pela Resolução CONAMA 454/2012 (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn)

Um exemplo claro é o Hg, onde o valor mínimo e a mediana coincidem em 0,01 mg/kg, que também é o limite inferior de detecção para esse elemento. Além disso, o número de amostras abaixo desse limite e dividido por dois foi de 52,44%. Por outro lado, a concentração máxima de Hg foi de 1,05 mg kg⁻¹ (Tabela 8).

Os parâmetros estatísticos do Cr, Ni e Pb, como mínimo, máximo e mediana, mostram distribuições assimétricas. Os elevados valores de curtoses nesses elementos confirmam a presença de valores extremos e caudas longas. O desvio padrão (SD) e a Rku do Cr são os mais altos entre os elementos PTE, o que indica uma grande dispersão nos dados. Após a transformação logarítmica, a Rku do Cr diminuiu de 51,36 para 2,65, reduzindo a influência dos outliers e melhorando a normalização dos dados (Tabela 8). Isso facilita uma análise mais precisa do baseline geoquímico e garante que as anomalias não distorçam os cálculos (Ng & Cribbie 2019, Zhao *et al.* 2024).

5.5.3 Avaliação de limiar geoquímico: aplicações do mMAD e TIF em elementos PTE

O método mMAD é considerado o mais rigoroso para calcular o background, pois é menos influenciado pelos outliers, permitindo estabelecer limites mais precisos em comparação com os métodos de percentis e TIF (Ahn *et al.* 2022, Konstantinova *et al.* 2021, Pinto *et al.* 2019, Reimann *et al.* 2018, Sahoo *et al.* 2020, Wen *et al.* 2024). Os intervalos obtidos com o mMAD permitem identificar tanto outliers negativos, que indicam empobrecimento nas concentrações, quanto limites superiores conservadores, que delimitam possíveis anomalias. Foram avaliados os percentuais de anomalias acima do limite superior (LSB) utilizando ambos os métodos, TIF e mMAD (Tabela 9).

Como já foi exposto, os elementos alvo deste trabalho, como As, Cd e Hg, ficaram abaixo de 70%. Portanto, foram comparados com os realizados na bacia do rio Itacaiúnas (Salomão *et al.* 2020) e na bacia do rio Parauapebas (Salomão *et al.* 2021b, Farias, *et al.* 2021). No primeiro estudo, os valores comparados utilizando o limite superior do método mMAD para esses três elementos mostraram que o Hg possui um limite superior de 0,14 mg kg⁻¹ e, em função desse valor, no Estado de Roraima, encontram-se 28 amostras acima desse limite. O Cd apresentou um limite superior de 0,08 mg kg⁻¹, com um total de 34 amostras acima desse valor. As foi comparado com o valor da bacia do rio Parauapebas (0,24 mg kg⁻¹), o que permitiu observar 7 amostras acima desse limite, o valor para a bacia do Itacaiúnas foi de 7,57 mg kg⁻¹, e o valor máximo para o As em Roraima é de

4,00 mg kg⁻¹.

Elementos potencialmente tóxicos como Cr, Cu, Ni, Pb e Zn tiveram os cálculos realizados para definir os limiares com os métodos, assim como os demais elementos que atenderam a mais de 70% de amostras acima do limite de detecção. Os cálculos de TIF e mMAD são comparados nos boxplots apresentado na (Figura 21). Como já apontado pela literatura, que o método Mmad é o mais robusto, não apenas por permitir detectar um maior número de anomalias, mas também por revelar tendências que vão além dos cálculos de distribuição realizados com dados brutos. Isso pode ser observado, por exemplo, no caso do Cs, onde o limite inferior é mais amplo do que o mostrado no *boxplot*, ou no caso do Pb e Cu, onde é possível identificar o empobrecimento desses metais.

A mediana de valores atípicos é de aproximadamente 2,56% considerando o método mMAD. Os elementos que ultrapassaram a mediana foram o Cr (7,93%) e o Ni (2,10%). O Cu, Pb e Zn apresentaram percentuais de anomalias abaixo de 2% segundo o método mMAD e uma proporção ainda menor, inferior a 0,23%, de acordo com o método TIF. Os percentuais dos demais elementos podem ser observados na (Tabela 9).

Tabela 9 - Percentil 75th, 90th, 95th e 98th e limiares dos métodos Tukey's Inner Fences (TIF), mediana $\pm$ 2* Desvio Absoluto da Mediana (mMAD) para o Estado de Roraima e Domínios Tectonoestratigráficos. Siglas: RR: Roraima, DCA: Domínio das Coberturas Aluvionares, DGC: Domínio Guiana Central, DSU: Domínio Surumu e DUA: Domínio Uatumã-Anauá. Limite Inferior do Baseline (LIB) e Limite Superior do Baseline (LSB).

Elemento	DT	75 th	90 th	95 th	98 th	TIF LIB	TIF LSB	mMAD LIB	mMAD LSB
Al at. %	RR	0,57	1,08	1,65	2,13	0,04	3,09	0,06	1,83
	DCA	0,51	1,77	2,52	3,44	0,01	5,15	0,02	2,21
	DGC	0,51	0,77	1,13	1,30	0,08	1,75	0,12	1,23
	DSU	0,58	0,82	1,21	1,35	0,10	1,71	0,15	1,22
	DUA	0,59	0,72	1,44	1,52	0,06	2,73	0,10	1,75
As* mg kg-1	RR	<1	<1	<1	<1	-	-	-	-
	DCA	<1	<1	<1	<1	-	-	-	-
	DGC	<1	<1	<1	<1	-	-	-	-
	DSU	<1	<1	<1	<1	-	-	-	-
	DUA	<1	<1	<1	<1	-	-	-	-
Ba mg kg-1	RR	47,0	76,5	97,0	123,3	1,0	478,9	2,8	219,5
	DCA	23,5	54,6	90,0	112,8	0,1	676,1	0,3	312,8
	DGC	40,0	64,2	94,0	99,9	3,4	182,4	5,9	118,4
	DSU	64,5	94,0	110,4	143,9	9,5	203,3	13,7	147,8
	DUA	53,0	88,6	95,7	115,6	3,2	285,6	6,5	177,3
Cd* mg kg-1	RR	0,02	0,06	0,08	0,09	-	-	-	-
	DCA	0,02	0,05	0,08	0,08	-	-	-	-
	DGC	0,08	0,09	0,1	0,12	-	-	-	-
	DSU	0,02	0,03	0,04	0,05	-	-	-	-
	DUA	0,02	0,07	0,08	0,1	-	-	-	-
Ce	RR	42,4	75,2	119,2	153,0	1,84	269,38	3,26	138,32

mg kg-1	DCA	36,6	52,5	72,13	98,68	1,04	308,4	1,88	128,4
	DGC	29,7	45,8	70,17	103,4	3,43	120,73	6,27	80,13
	DSU	52,6	94,7	123,1	142,9	3,19	287,64	5,34	153,33
	DUA	43,5	86,8	163,3	204,5	1,4	360,77	2,86	184,93
Co	RR	2,1	3,4	4,6	6,5	0,1	10,9	0,2	6,6
mg kg-1	DCA	1,3	2,0	2,6	4,0	0,1	8,1	0,1	3,7
	DGC	2,2	3,2	5,1	5,8	0,2	9,1	0,4	5,8
	DSU	3,3	4,8	6,2	7,7	0,2	17,1	0,5	9,9
	DUA	1,7	2,4	2,8	3,2	0,3	5,6	0,4	3,3
Cr*	RR	14,0	21,0	29,6	40,8	<1	77,9	1,9	33,7
mg kg-1	DCA	15,0	21,0	31,0	45,5	1,4	69,7	2,2	45,4
	DGC	7,0	11,8	14,8	20,1	0,7	32	1,1	22,7
	DSU	18,0	26,4	36,4	42,3	1,0	125,9	2	72
	DUA	8,5	15,8	19,0	23,2	1,1	37	1,8	19,9
Cs	RR	0,36	0,65	1,1	1,76	<0,05	6,96	<0,05	2,3
mg kg-1	DCA	0,21	0,69	1,5	1,99	<0,05	5,58	<0,05	1,92
	DGC	0,35	0,5	0,57	0,63	<0,05	1,89	0,04	1,18
	DSU	0,47	0,72	0,89	1,07	0,06	1,57	0,1	1,05
	DUA	0,29	0,7	1,04	1,76	<0,05	8,25	0,01	1,61
Cu*	RR	7,2	11,4	14	16,47	0,81	26,77	1,23	16,52
mg kg-1	DCA	6	8,66	11,42	15,89	0,74	21,03	1,13	14,13
	DGC	4,9	7,64	7,97	8,37	1,37	11,03	1,77	9,03
	DSU	10,6	15,4	16,72	19,68	0,64	56,78	1,12	30,47
	DUA	8,7	11,9	13,4	14,59	1,03	30,09	1,57	19,93
Fe	RR	1,48	2,05	2,48	3,13	0,23	4,55	0,33	2,94
at. %	DCA	1,29	1,69	2,1	2,66	0,2	3,91	0,3	2,7
	DGC	1,46	2,01	2,4	2,5	0,23	4,35	0,27	3,09
	DSU	1,81	2,33	2,49	3,16	0,26	5,81	0,35	4
	DUA	1,69	2,68	3,59	3,9	0,28	5,05	0,41	3,4
Ga	RR	2,6	4,55	6,925	9,74	0,271	11,371	0,469	6,167
mg kg-1	DCA	2,85	8,32	10,34	12,13	0,156	16,774	0,291	5,81
	DGC	3,0	4,9	5,889	7,383	0,406	9,967	0,517	6,984
	DSU	2,5	3,38	4,2	4,983	0,466	7,176	0,671	5,376
	DUA	2,5	3,14	4,554	5,593	0,382	8,091	0,603	5,987
Hf	RR	0,44	0,9	1,291	1,967	0,011	4,061	0,021	2,27
mg kg-1	DCA	0,28	0,53	0,88	1,263	0,003	4,223	0,014	1,556
	DGC	0,37	1,0	1,217	1,663	0,012	2,864	0,022	2,24
	DSU	0,47	0,78	1,037	1,55	0,019	3,144	0,034	1,572
	DUA	1,14	1,84	2,401	3,577	0,033	9,523	0,065	4,019
Hg*	RR	0,030	0,080	0,186	0,398	-	-	-	-
mg kg-1	DCA	0,07	0,21	0,378	0,531	-	-	-	-
	DGC	0,03	0,04	0,067	0,13	-	-	-	-
	DSU	0,02	0,03	0,04	0,059	-	-	-	-
	DUA	0,01	0,01	0,005	0,005	-	-	-	-
La	RR	18,2	29,3	51,1	72,8	1,0	106,9	1,7	56,4
mg kg-1	DCA	15,9	22,2	32,9	52,1	0,6	108,2	1,1	52,4
	DGC	14,1	23,2	27,4	39,4	1,7	62,8	2,7	34,8
	DSU	21,4	32,4	51,3	60,3	1,6	103,7	2,5	51,9
	DUA	21,1	47,1	96,0	110,5	0,7	160,0	1,5	90,8
Mn	RR	272,0	451,0	555,2	755,9	22,2	1231,4	34,8	736,6
mg kg-1	DCA	151,0	200,0	235,0	277,8	25,5	436,5	36,5	296,0
	DGC	293,0	368,0	472,9	668,4	20,6	1443,0	44,2	905,9
	DSU	418,0	642,0	764,5	1020,0	38,4	1749,8	62,5	948,6
	DUA	365,0	552,0	783,6	849,5	62,8	1049,6	86,1	881,9
Mo	RR	0,47	0,93	1,32	1,89	0,03	2,47	0,06	1,38
mg kg-1	DCA	0,43	0,61	0,73	1,03	0,04	1,63	0,08	1,01
	DGC	0,33	0,43	0,5	0,53	0,06	0,89	0,1	0,67
	DSU	1,17	2,11	2,74	3,96	0,01	17,98	0,03	7,35
	DUA	0,31	0,55	0,71	1,05	0,01	4,33	0,02	1,97

Nb mg kg-1	RR	1,38	2,59	3,41	4,5	0,06	8,71	0,1	4,47
	DCA	0,85	1,14	1,38	2,31	0,05	4,06	0,09	2,63
	DGC	2,84	4,48	5,79	8,05	0,05	33,64	0,11	19,67
	DSU	1,44	2,45	3,47	5,58	0,07	9,11	0,11	4,87
	DUA	2,13	3,21	3,38	3,5	0,17	9,83	0,24	6,12
Ni* mg kg-1	RR	4,2	7,0	9,6	12,2	0,44	16,31	0,67	9,37
	DCA	4,1	6,07	7,24	9,87	0,6	13,34	0,88	8,32
	DGC	2,7	3,36	4,06	6,16	0,36	9,11	0,6	5,98
	DSU	7,08	10,3	12,28	20,79	0,15	70,74	0,36	33,28
	DUA	3,0	5,0	5,7	6,68	0,69	9,3	0,92	6,77
Pb* mg kg-1	RR	10	13,9	16,7	23,2	0,9	42,7	1,5	26,9
	DCA	10,1	15,8	19,6	35	0,7	47,1	1,2	26,3
	DGC	12,2	15,9	17,3	18,5	2,3	32,7	3,5	26,5
	DSU	8,6	12,2	13,4	16,9	1,2	27,5	1,8	21,3
	DUA	8,3	11,5	12,7	15,4	2,1	19,4	2,7	14,8
Rb mg kg-1	RR	5,7	9,3	12,3	16,9	0,09	166,9	0,1	51,9
	DCA	1,9	5,6	9,8	17,0	0,02	55,6	0,02	18
	DGC	6,1	8,8	10,8	15,7	0,2	44,6	0,7	17,9
	DSU	8,5	12,2	13,8	15,6	1,3	25,3	1,9	17,4
	DUA	5,3	9,1	12,3	15,6	0,12	91,4	0,1	34,6
Sc mg kg-1	RR	1,9	3,7	4,66	6,79	0,02	30,28	0,08	13,35
	DCA	2,9	4,58	5,69	8,91	0,01	87,16	0,03	28,73
	DGC	2,28	3,29	3,89	5,63	0,19	9,6	0,33	6,8
	DSU	1,4	2,2	2,75	3,29	0	207,43	0,02	26,2
	DUA	1,4	1,96	2,57	3,0	0,17	4,99	0,24	3,68
Sn mg kg-1	RR	1,4	1,8	2,2	2,7	0,2	4,1	0,3	3,0
	DCA	1,3	1,7	1,9	2,9	0,1	5,5	0,2	3,2
	DGC	1,5	2,2	2,5	2,6	0,3	3,9	0,4	2,4
	DSU	1,5	1,8	2,2	3,6	0,1	7,3	0,4	3,3
	DUA	1,0	1,3	1,5	1,7	0,3	2,6	0,3	1,9
Sr mg kg-1	RR	4,5	8,1	10,7	14	0	73,3	0,1	26,0
	DCA	1,6	3,9	5,1	6,8	0,1	9,2	0,1	8,1
	DGC	3,6	4,9	7,1	8,1	0,2	18,4	0,4	12,9
	DSU	7,7	11,5	13,4	15,1	0,3	49,7	0,6	28,7
	DUA	7,1	10,6	12,7	17,6	0,3	43,0	0,7	26,1
Th mg kg-1	RR	9,7	15,7	24	35,7	0,7	45,9	1,2	27,5
	DCA	7,5	10,9	14,5	16,9	0,7	32,4	1,2	19,2
	DGC	11,0	13,0	16,9	24,0	1,4	39,4	2,6	23,4
	DSU	9,9	21,1	23,6	30,6	0,7	50,5	1,2	21,4
	DUA	11,0	23,9	34,7	44,1	0,7	65,5	1,1	41,9
Ti at. %	RR	0,1	0,2	0,32	0,41	0	1,12	0,01	0,52
	DCA	0,05	0,08	0,11	0,24	0	0,56	0	0,23
	DGC	0,17	0,26	0,38	0,41	0,01	1,49	0,01	0,76
	DSU	0,13	0,22	0,35	0,4	0	1,17	0,01	0,47
	DUA	0,15	0,23	0,34	0,42	0,01	1	0,01	0,51
U mg kg-1	RR	1,23	2,1	2,83	3,88	0,05	8,1	0,11	4,45
	DCA	1,18	2,07	2,85	3,87	0,02	12,79	0,05	4,41
	DGC	1,1	1,45	1,83	2,37	0,15	3,59	0,23	2,14
	DSU	1,31	2,19	2,56	3,45	0,13	5,24	0,25	3,24
	DUA	1,14	2,72	3,4	3,93	0,06	6,59	0,12	4,27

V mg kg ⁻¹	RR	12,0	21,0	28,7	51,0	0,4	96,0	0,8	46,7
	DCA	10,0	20,8	27,8	48,9	0,2	111,8	0,5	31,1
	DGC	11,5	19,0	29,4	41,2	1,3	49,1	2,0	32,2
	DSU	17,0	24,0	33,2	61,8	1,3	81,1	2,2	45,4
	DUA	8,0	12,0	18,0	20,6	1,4	22,6	1,8	19,9
Y mg kg ⁻¹	RR	6,31	9,67	13,07	16,24	0,32	37,74	0,61	21,69
	DCA	4,5	8,14	10,11	14,03	0,23	26,49	0,42	14,12
	DGC	6,31	9,53	12,52	13,54	0,85	21,28	1,21	14,7
	DSU	8,29	10,4	12,87	15,74	0,9	31,44	1,7	18,66
	DUA	5,36	9,09	12,77	19,23	0,47	24,89	0,78	15,27
Zn* mg kg ⁻¹	RR	12,0	24,0	29,6	40,9	0,4	96,0	0,8	46,7
	DCA	6,0	12,0	16,2	25,4	0,4	31,2	0,5	17,8
	DGC	17,0	29,6	33,0	41,1	1,3	81,1	1,8	48,8
	DSU	17,7	27,5	30,0	44,0	1,2	90,2	2,2	45,4
	DUA	10,0	16,0	18,5	22,4	0,5	60,9	0,9	41,0
Zr mg kg ⁻¹	RR	15,8	33,6	44,4	60,0	0,5	128,8	0,9	59,1
	DCA	10,5	17,9	28,5	52,6	0,4	80,0	0,7	40,6
	DGC	12,8	33,0	45,4	54,6	0,5	83,9	0,9	47,6
	DSU	15,9	26,6	35,5	47,3	0,8	94,7	1,4	47,2
	DUA	37,5	66,9	90,7	123,8	1,3	283,6	2,5	143

(*)Valores de Background/Baseline para os elementos considerados como substâncias tóxicas pela Resolução CONAMA 454/2012 (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn)

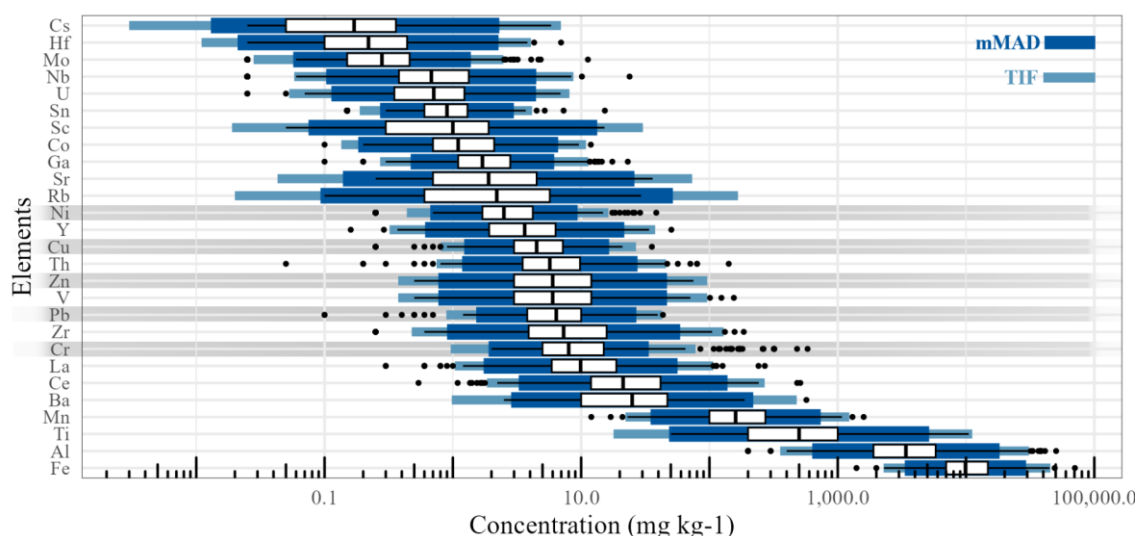


Figura 21 - Boxplots e intervalos dos métodos mMAD e TIF

As concentrações que excedem os limites estabelecidos pela resolução e o teor médio da crosta terrestre se refletem possíveis enriquecimentos geoquímicos nos domínios tectonoestratigráficos. Uma ampla porção dos elementos apresenta medianas superiores em seus respectivos domínios tectonoestratigráficos, o que indica enriquecimentos e tendências de associação específicas de metais base e processos

ligados ao ambiente geológico. Na avaliação dos métodos de cálculo, os valores dos percentis podem ignorar valores atípicos críticos que o mMAD detecta, gerando um perfil de risco menor. A técnica de percentis é acompanhada pela eliminação de valores atípicos, mas isso apresenta um risco para a padronização dos métodos de cálculo, uma vez que os métodos de reconhecimento de outliers variam. Além disso, os métodos gráficos para identificar valores atípicos tendem a ser subjetivos (Burns *et al.* 2021). Os valores de TIF e mMAD podem ser consultados na (Tabela 9).

5.5.4 Influência da granulometria na geoquímica de sedimentos finos

Na Resolução CONAMA 454/12, se estabelece no artigo 2º, na definição VIII, a fração total em que se considera a fração menor que 2 mm, correspondente a areias muito grossas, englobando também partículas de areia grossa, média, silte e argila. Entretanto, neste trabalho, a fração utilizada foi de 80 mesh, correspondente a 0,125 mm. A utilização de 80 mesh é importante porque, além de ser uma matriz tradicionalmente usada na exploração de metais, possui um equilíbrio entre a representatividade da área de coleta que frações maiores oferecem e a possibilidade de contaminação no laboratório de frações menores (Doherty *et al.* 2023, Garrett 2019). Na escala de Wentworth (1922), utilizada na Resolução CONAMA 454/2012, esse intervalo de tamanhos de partículas corresponde à areia muito fina, silte e argila, permitindo uma análise detalhada da fração fina dos sedimentos (Blair & McPherson 1999).

Essa abordagem é especialmente relevante para compreender os processos de dispersão clástica, associados ao intemperismo físico, e a dispersão hidromórfica, relacionada ao intemperismo químico, que predominam nas frações de limo, argila e coloidal. Esses processos desempenham um papel fundamental na distribuição e geração do material analisado. Isso é importante porque frações grossas de sedimento, como as areias, compostas principalmente de quartzo, exibem concentrações mais baixas de metais, devido à sua menor reatividade e superfície reduzida (Parlak *et al.* 2022).

Por outro lado, sedimentos com granulometria inferior a 80 mesh, apresentam assinaturas geoquímicas distintas, refletindo sua proveniência e o histórico de intemperismo químico (Wu *et al.* 2014). A dispersão hidromórfica associada ao intemperismo químico envolve processos como hidrólise e oxidação, modificando significativamente a composição dessas partículas. Esse processo permite a lixiviação de elementos solúveis e a formação subsequente de minerais secundários (Chen *et al.* 2020,

Gurumurthy 2024). Essas dinâmicas estabelecem uma relação entre o grau de intemperismo químico e a composição da fração fina (silte e argila) (Zhou *et al.* 2015).

Essa relação é fundamental ao estudar a composição dos elementos, pois os métodos de digestão ácida tendem a apresentar variações em sua eficácia em relação ao tamanho das partículas envolvidas. Estudos como os realizados por Li *et al.* (2017) e Liu *et al.* (2019) utilizando frações de sedimentos finos junto com digestão realizada em água régia, permitiram a extração de elementos traço, demonstrando enriquecimento. Segundo Li *et al.* (2017), a detecção de ETR melhorou significativamente. Isso pode ser evidenciado, pois elementos como Ce, La e Y apresentaram 100% das amostras acima do limite de detecção (Tabela 8).

Normas como a resolução CONAMA 454/12 estabelecem o uso dos métodos de digestão ácida especificados na norma SW-846 da EPA, em particular os que utilizam HCl e HNO₃, que são cruciais para a extração eficaz de metais dos sedimentos. Estes são os mesmos ácidos empregados na digestão das amostras deste estudo.

O tamanho das partículas não é importante apenas pelas características mencionadas anteriormente, mas também porque sua composição guardam uma relação intrínseca, na qual minerais argilosos, óxidos de ferro, manganês e alumínio possuem a propriedade de absorver metais de forma eficaz (Hosseini & Sajjadi 2018, Jelecevic *et al.* 2021, Yao *et al.* 2015). A matéria orgânica também desempenha um papel importante, pois, em sedimentos finos, a absorção de metais é mais eficaz (Mandzhieva *et al.* 2014).

5.5.5 Anomalias geoquímicas e heterogeneidade entre domínios tectonoestratigráficos de Roraima

As comparações entre os níveis de concentração em sedimentos de água doce da Resolução CONAMA 454/2012 para os elementos considerados potencialmente tóxicos e o respectivo teor médio na crosta terrestre (*Mean Upper Crust Concentration* – UCC – Rudnick *et al.* 2003) são apresentadas em gráficos de *boxplot* para todo o Estado de Roraima e cada um dos Domínios Tectonoestratigráficos (Figura 22).

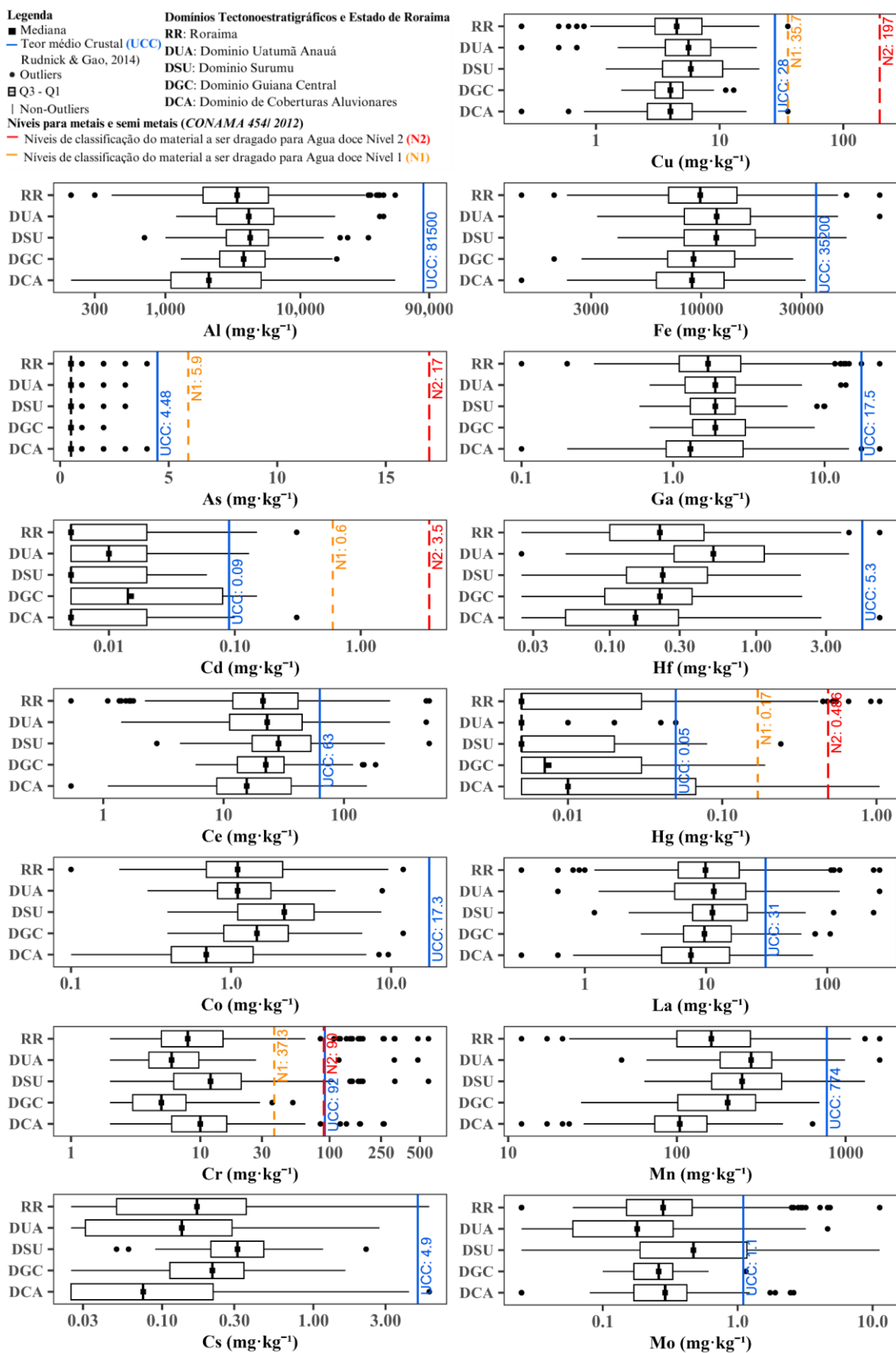
O As foi o único elemento que não ultrapassou os valores N1 e N2, nem a UCC. No caso do Cd, todos os domínios litoestratigráficos excederam os valores da UCC. O DGC apresentou anomalias de Cr que ultrapassaram o valor N1 da resolução, enquanto os demais domínios excederam tanto o nível N2 quanto a UCC. O Cu apresentou anomalias nos domínios DGC e DCA, sendo este último o que mostrou concentrações

superiores tanto à UCC quanto ao nível N1. Em relação aos diagramas de caixa, as distribuições dos domínios DSU, DGC e DCA superaram a UCC, e, em particular, o domínio DCA também ultrapassou os níveis N1 e N2. O domínio DGC, por sua vez, superou apenas o valor N1 (Figura 22).

Como pode ser observado na (Figura 22), os elementos Cr, Cu e Ni apresentaram o maior número de anomalias no domínio DSU, localizado ao norte do Estado, e mostraram coincidências espaciais em suas anomalias nos domínios DUA e DCA, o que sugere uma possível relação geoquímica ou ambiental entre esses elementos. A questão central reside em determinar se essas anomalias têm uma origem natural, relacionada à geologia regional, ou se são influenciadas por atividades antropogênicas. Nas bacias hidrográficas onde ocorrem essas anomalias no norte de Roraima, é possível encontrar minas de ouro, diamantes e cassiterita. No entanto, essas ocorrências também indicam a presença de rochas ultramáficas. A Suíte Uraricaá é destacada por sua relação com diversos depósitos minerais, entre eles os diamantes, que se acredita terem surgido das rochas Paleoproterozoicas localizadas abaixo dela (Bassoo & Befus 2021).

No caso do Pb, este pode estar associado a mecanismos que envolvem atividade hidrotermal e sedimentar. A concentração de minerais que contêm Pb pode ocorrer em zonas de cisalhamento e em greenstone belts (Kroonenberg *et al.* 2016). No entanto, os estudos sobre minerais que contêm chumbo no Escudo das Guianas são limitados (Nomade *et al.* 2003). Há evidências de protólitos arqueanos submetidos a metamorfismo de fácies granulito dentro do Escudo Guianense, especificamente no bloco Amapá. Nessas condições, o Pb, assim como outros elementos, pode ter se concentrado (Kroonenberg *et al.* 2016).

Os valores do Q3 e o limiar superior dos valores anômalos apresentados pelo Zn mostram uma correlação espacial com rochas relacionadas ao magmatismo do tipo A no centro do DGC (Figura 22). Nestes locais, se encontram suítes como Surucucus, mencionada por seu enriquecimento em Zn, alcançando valores de até 500 mg kg^{-1} de Zn (Pínheiro *et al.* 1981). Foram encontradas concentrações anômalas de até $34.328 \text{ mg kg}^{-1}$ para ETR e 7.936 mg kg^{-1} para Th, além de valores anômalos importantes para (400 mg kg^{-1}), Zn (893 mg kg^{-1}), Nb (908 mg kg^{-1}) e U (346 mg kg^{-1}), que são explicadas pela presença de lateritas radioativas, maciças a bandeadas, limoníticas/goetíticas, que sustentam um morro com características geomorfológicas de dissolução (Aguiar *et al.* 2019).



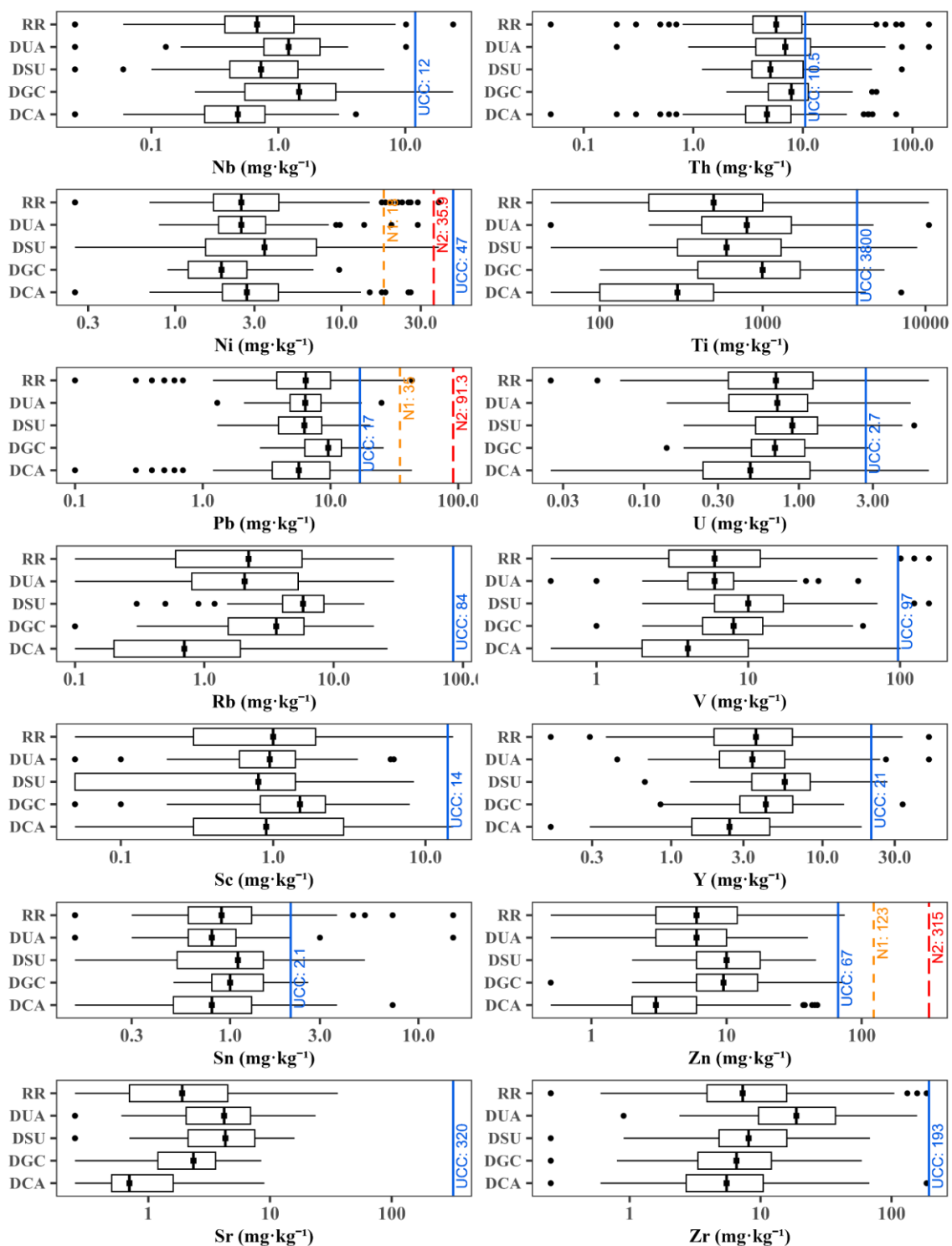


Figura 22 - Boxplots das concentrações dos elementos Al, As, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Hf, Hg, La, Mn, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, Y, Zn e Zr para o estado de Roraima e seus domínios tectonoestratigráficos, comparados com o teor médio crustal (UCC) segundo Rudnick & Gao 2014 e os níveis N1 e N2 da Resolução CONAMA 454/12. Siglas: RR: Roraima, DUA: Domínio Uatamá-Anauá, DSU: Domínio Surumu, DGC: Domínio Guiana Central, DCA: Domínio Coberturas Aluvionares. Fonte: Autor

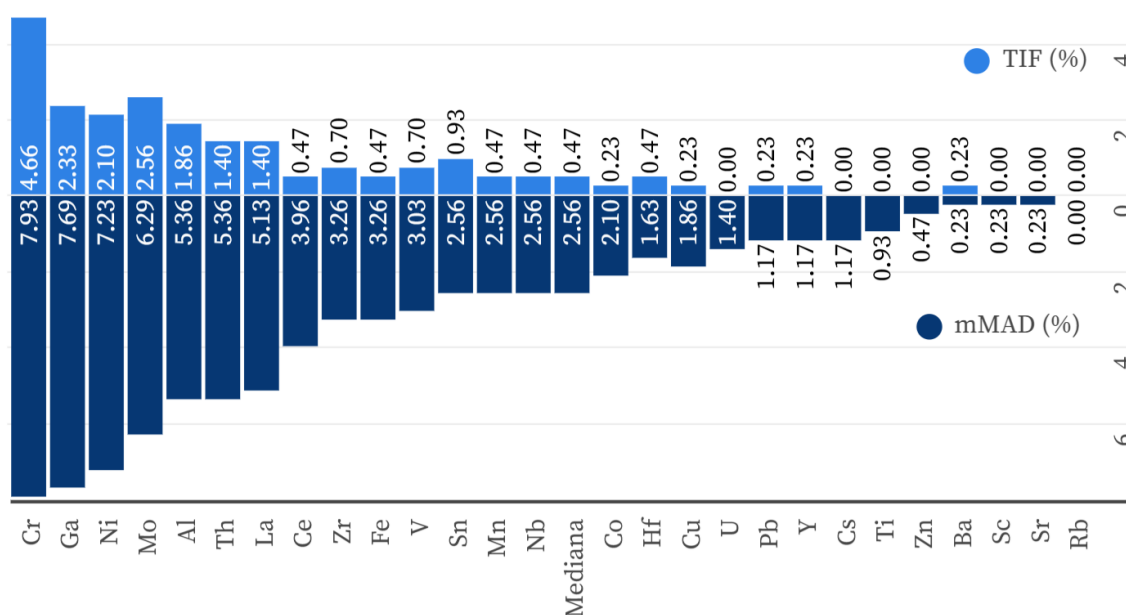


Figura 23 - Porcentagem de valores anômalos acima do limite superior dos métodos (TIF e mMAD) e mediana das anomalias dos elementos em Roraima

Essas lateritas também refletem fortes anomalias em aerogamaespectrometria localizadas no centro do DGC com valores superiores a 900 mg kg⁻¹ de Zn, majoritariamente associadas a mineralizações vinculadas a rochas alcalinas diversas, seus produtos de alteração intempérica e processos hidrotermais (Aguilar et al. 2019). Entre os corpos que mostraram um enriquecimento em Zn está a Formação Apoteri, composta por basaltos e andesitos continentais de filiação toleítica, cujo importante conteúdo de Zn e outros elementos têm sido utilizado para a melhoria de solos ácidos, consequentemente enriquecendo estes solos (Melo et al. 2012). Outra interessante ocorrência de Zn no DGC se deve à Suíte Apiaú, fruto de um sistema magmático- hidrotermal que apresenta enriquecimentos no regolito por processos secundários (Goulart et al. 2023).

5.5.6 Correlação e agrupamento de elementos

As relações analisadas entre os elementos químicos foram investigadas utilizando a matriz de correlação de Spearman para dados brutos e para os dados transformados por CLR (Salomão *et al.* 2021a). Essas correlações são distintas em vários casos, evidenciando amplos exemplos de correlações espúrias (Figura 25). Ainda assim, as relações relativas foram confirmadas pelas correlações obtidas com os dados transformados, como nos casos de Ni e Cr, Al e Ga, Ce e La, e Ce e Y, que apresentaram correlações fortes (Figura 24).

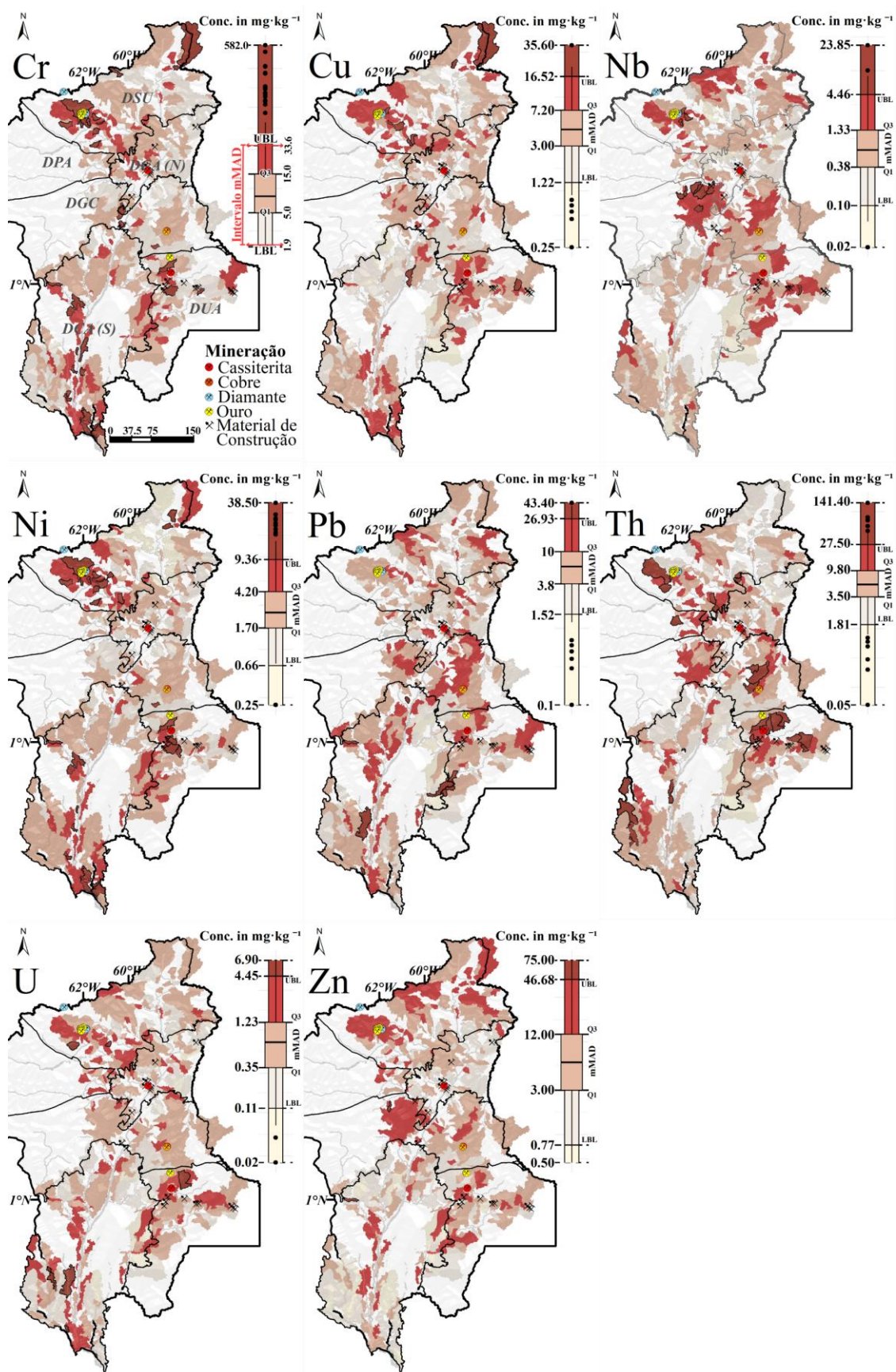


Figura 24 - Mapas unielemtares de Cr, Cu, Nb, Ni, Pb, Th, U e Zn. Siglas: DUA: Domínio Uatamá-Anauá, DSU: Domínio Surumu, DGC: Domínio Guiana Central, DCA: Domínio Coberturas Aluvionares. Limite Superior do Background (UBL), e Limite Inferior do Background (LBL)

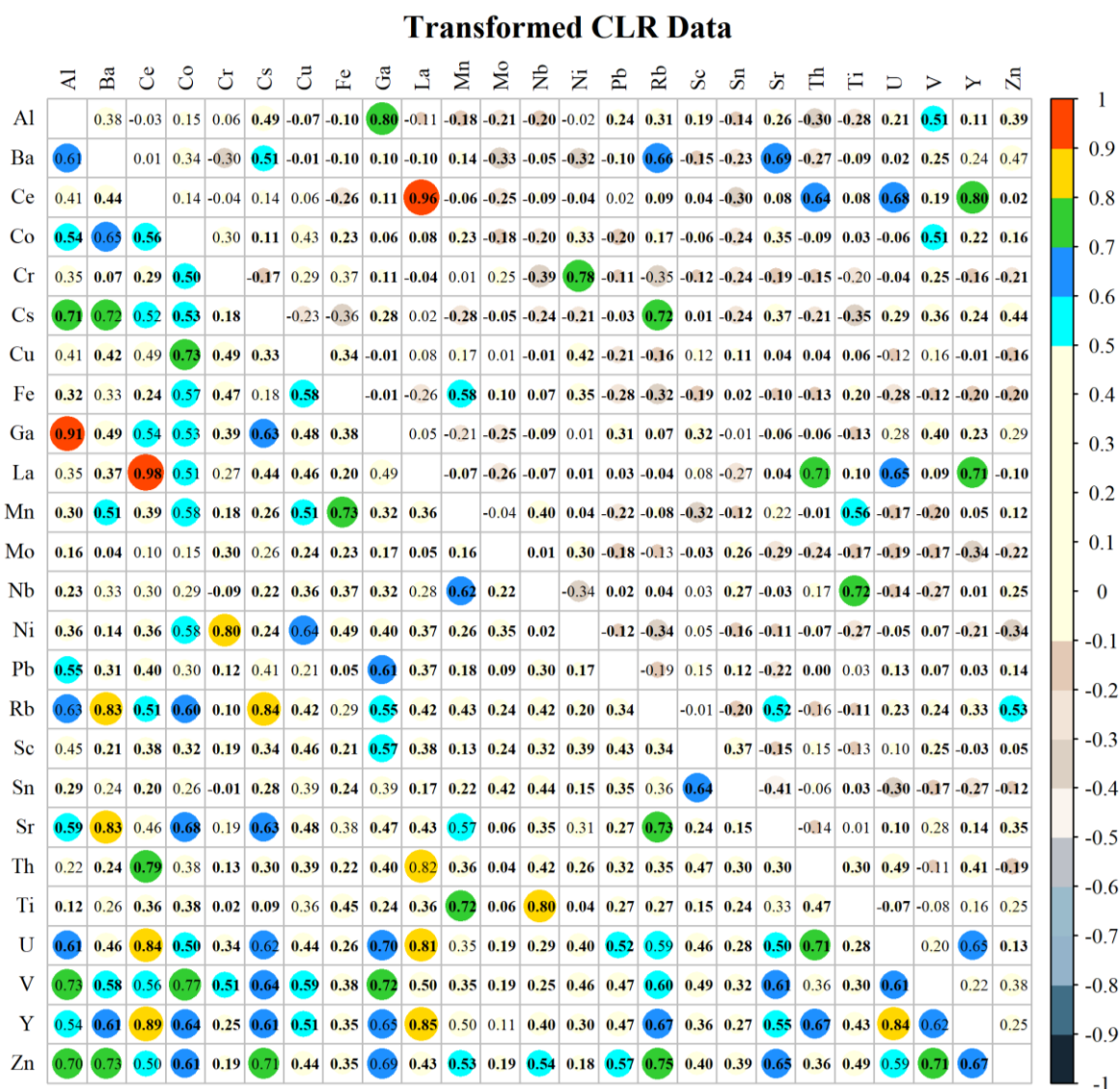


Figura 25 - Matriz de correlação de Spearman para dados log transformados na parte inferior esquerda e dados CLR transformados na parte superior direita. Fonte: Autor

Para estruturar melhor os dados e determinar associações multielementares foi construído um dendrograma. Essa técnica apresentou várias vantagens sobre a matriz de correlação, pois organiza os elementos em níveis hierárquicos, facilitando a interpretação das associações elementares e proporcionando uma visão mais global de como os grupos estão inter-relacionados. Com base nos cinco agrupamentos estabelecidos no dendrograma, utilizando uma distância de ligação (linkage distance) de 2, foram agrupados os mapas unielementares criados com os limites superior e inferior definidos pelo método mMAD, incorporando também os quartis Q1 e Q3. Ao comparar os mapas

unielementares de cada elemento, se observou uma maior quantidade de correlações espaciais quando se utilizou uma distância de ligação de 1 (Figura 26).

As associações estabelecidas por elementos como Al, Ga e Pb têm em comum o fato de serem formadores de óxidos estáveis e, no caso do Pb, também de sulfetos (Jacob *et al.* 2019, Liu *et al.* 2024, Stazi *et al.* 2014). Mo e Sn estão vinculados a mineralizações hidrotermais, assim como a depósitos sulfetados, enquanto o Sc está associado a ambientes ígneos e rochas máficas (Bhattacharya *et al.* 2024, Levard *et al.* 2018, Tchaptchet *et al.* 2021). Elementos como Co e V são metais de transição com múltiplos estados de oxidação, o que lhes confere a capacidade de participar em diversos ambientes redox (Kompanchenko *et al.* 2018, Nicklas *et al.* 2016, Tao *et al.* 2022).

Elementos como Cr, Ni e Cu, estão vinculados à formação de depósitos magmáticos e hidrotermais (Chelle-Michou *et al.* 2017, Wilkinson 2013). Elementos primários formadores de óxidos estáveis, como Fe e Mn, estão associados a condições redox e tendem a controlar as condições de dissolução e mobilidade (Alozie *et al.* 2018).

Por outro lado, Nb e Ti estão presentes em óxidos de rochas ígneas e sedimentares (Zhang *et al.* 2024). Elementos alcalino-terrosos, como Ba e Sr, têm tendência a substituir o Ca, enquanto Cs e Rb, ambos metais alcalinos, tendo a capacidade de substituir o K em feldspatos e silicatos (Bambi *et al.* 2012, Yaisamut *et al.* 2023). Juntos, Ba, Sr, Cs, Rb e Zn tendem a se mobilizar ou concentrar em zonas alteradas e em depósitos minerais durante processos hidrotermais e de intemperismo (Gysi *et al.* 2016, Vasyukova *et al.* 2016). Os elementos Ce, La e Y são terras raras, com um comportamento geoquímico compatível com rochas ígneas, sendo, portanto, indicadores importantes da evolução magmática e de processos de alteração hidrotermal (Zhitkov & Vertman 2006). Th e U são actínídeos radioativos (Figura 26). Análise fatorial e confirmatória de elementos geoquímicos: identificação de fatores em sedimentos de Roraima.

Para melhorar a interpretação das estruturas subjacentes nos dados e aproveitando a redução de dimensionalidade obtida pela transformação CLR, foram realizadas análises fatoriais exploratórias. O valor do KMO (*Kaiser-Meyer-Olkin*) foi de 0,71, indicando que os dados são razoavelmente adequados para uma análise fatorial. Os valores individuais de adequação amostral (MSA) para cada variável variaram de 0,40 (Sc) a 0,87 (U). Para avaliar se as variáveis estavam correlacionadas, se utilizou o teste de esfericidade de *Bartlett* (Watkins 2018), que apresentou um valor de p de 2,2e-16, confirmando a

existência de correlações significativas e, portanto, a viabilidade da análise fatorial.

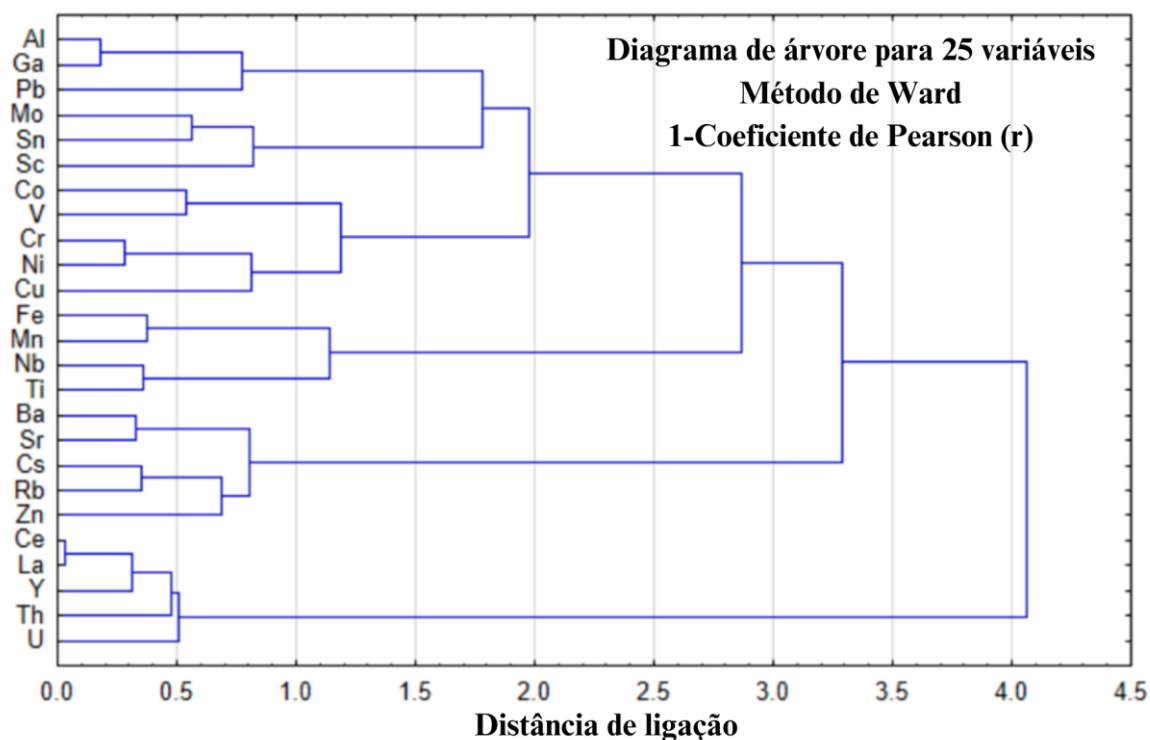


Figura 26 - Dendrograma dos elementos com dados transformados em CLR (Centered Log-Ratio)

O valor de *Multiple R-Square* determinado na análise de comunalidade mostrou que elementos como Cu e Pb têm valores de 0,415 e 0,449, respectivamente. Esses elementos foram mantidos por serem considerados substâncias tóxicas pela resolução CONAMA 454/2012. O Hf e o Zr apresentaram uma alta comunalidade, com valores de *R-Square* superiores a 0,85. Por não serem representativos para este estudo, devido à sua inocuidade e inércia, foram removidos para evitar o mascaramento de correlações mais significativas. Isso foi corroborado na Análise Fatorial Exploratória (AFE), na qual foi identificada a associação (Hf-Mn-Nb-Ti-Zr), que não representou um padrão significativo para o modelo. Outro resultado da AFE foi o comportamento isolado do Mo no último dos sete fatores gerados, onde as demais variáveis apresentaram comunalidades inferiores a 0,5.

Com essas informações obtidas na AFE, foi desenvolvida uma Análise Fatorial Confirmatória (AFC), na qual as variáveis Hf, Mo e Zr foram excluídas. O objetivo da AFC é testar um modelo previamente definido. Para isso, foram aplicadas a rotação Varimax Normalized e a extração de componentes principais, definindo como critério a retenção de valores próprios superiores a 1.

Diferentemente da AFE, na AFC foi obtido um fator a menos, totalizando seis fatores. Isso permitiu refinar tanto o modelo quanto a interpretação dos dados, confirmando padrões mais coerentes com os processos geoquímicos esperados. Além disso, na AFC, os elementos Cu e Pb foram mantidos devido à sua forte relação com a composição mineral da área de estudo, apesar da comunalidade de 0,41 obtida para cada um.

Os elementos utilizados para a análise fatorial confirmatória foram Al, Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, La, Mn, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, Y e Zn. A extração dos componentes principais revelou uma estrutura subjacente de seis fatores com autovalores superiores a 1, explicando 75,48% da variância total do sistema. Apenas dois elementos, Pb (0,41) e Cu (0,40), apresentaram comunalidades inferiores a 0,50 (Tabela 10). No entanto, foram mantidos na análise, pois as associações estabelecidas com esses elementos coincidiram com aquelas obtidas na análise de cluster realizada com os dados transformados por CLR. Para analisar os fatores obtidos, foram calculados os scores dos fatores, que posteriormente foram representadas em boxplots para identificar os outliers e o intervalo entre o quartil superior (Q3) e o limite superior. Esses valores foram apresentados em mapas baseados em bacias hidrográficas e polígonos que marcam a localização das bacias.

Tabela 10 - Loadings, percentual de variância e comunalidades da AF aplicada aos dados geoquímicos (dados transformados por CLR)

Elemento	F1	F2	F3	F4	F5	F6	Comunalidades
Al	0,33	-0,06	-0,27	0,07	0,81	0,02	0,88
Ba	0,86	-0,04	0,07	0,01	0,05	0,2	0,77
Ce	0,07	0,96	-0,01	0,05	0,01	0,05	0,97
Co	0,4	0,02	0,12	0,74	0,1	0,2	0,72
Cr	-0,34	-0,11	-0,3	0,63	0,07	0,23	0,69
Cs	0,72	0,07	-0,37	-0,17	0,21	0,01	0,69
Cu	-0,01	0,09	0,18	0,7	-0,11	-0,33	0,41
Fe	-0,25	-0,34	0,37	0,46	-0,16	0,3	0,72
Ga	0	0,08	-0,25	0,05	0,85	-0,13	0,87
La	-0,03	0,97	0	0,04	-0,06	0,03	0,97
Mn	0,05	-0,11	0,72	0,19	-0,28	0,38	0,78
Nb	0,01	0,03	0,77	-0,22	-0,11	-0,31	0,67
Ni	-0,39	-0,04	-0,34	0,69	-0,09	-0,01	0,79
Pb	-0,24	0,11	0,03	-0,3	0,64	-0,03	0,41
Rb	0,85	0,09	-0,1	-0,15	-0,05	-0,11	0,72
Sc	-0,09	0,09	-0,12	0,09	0,13	-0,82	0,64
Sn	-0,18	-0,3	0,11	-0,13	0	-0,75	0,51
Sr	0,75	0,03	0,03	0,18	-0,05	0,21	0,71
Th	-0,21	0,83	0,16	-0,06	-0,13	-0,16	0,77
Ti	-0,07	0,13	0,9	0,01	-0,09	0,07	0,8
U	0,07	0,78	-0,2	-0,1	0,32	0,04	0,73

V	0,39	0,08	-0,03	0,45	0,57	-0,06	0,73
Y	0,26	0,83	0,13	-0,01	0,15	0,14	0,84
Zn	0,61	0	0,29	-0,13	0,46	0,01	0,64
Eigenvalue	4,94	3,78	3,34	2,8	1,8	1,44	
Variância (%)	20,6	15,76	13,9	11,68	7,51	6,01	
Cum. var. (%)	20,6	36,37	50,27	61,95	69,47	75,48	

Fonte: Autor

5.5.7 Fator 1 (Ba - Cs - Rb - Sr - Zn)

O percentual de variância explicado pelo sistema de dados para este fator foi de 20,60. Esta associação inclui elementos típicos de ambientes plutônicos como pegmatíticos, sugerindo uma relação com a evolução de rochas ígneas diferenciadas. O Ba, Rb e Cs são comuns em rochas graníticas ricas em feldspatos, enquanto o Sr também é encontrado em feldspatos e plagioclásios (Dostal *et al.* 2020). O Zn, assim como os demais elementos dessa associação, pode refletir a mineralização hidrotermal associada a intrusões graníticas, já que esses elementos tendem a se concentrar em ambientes com diferenciação magmática ou alteração hidrotermal (Mbassa *et al.* 2018). Esses processos podem estar vinculados a eventos tectono-magmáticos no DSU, onde são observados granitos e corpos intrusivos (Figura 27).

A composição elementar das rochas graníticas, particularmente a presença de Ba, Rb e Cs, muitas vezes está relacionada com os processos de diferenciação que ocorrem durante a cristalização do magma (Ibe 2020, Odewumi & Olarewaju 2013, Ugbe *et al.* 2016). Esses elementos geralmente se enriquecem em fluidos magmáticos de estágio tardio, o que é crucial para compreender a evolução dos sistemas graníticos (Vale Junior *et al.* 2022). Além disso, as características geoquímicas dos feldspatos e do plagioclásio nas rochas graníticas são essenciais para entender os processos magmáticos em funcionamento (Li *et al.* 2020). A presença de Sr nesses minerais é um indicador chave das condições nas quais o magma cristalizou (D'Antonio & Arienzo 2022). As altas concentrações de Sr podem sinalizar uma história de diferenciação magmática ou a influência de processos hidrotermais que mobilizaram o Sr das rochas circundantes para os minerais em cristalização (Derycke *et al.* 2021).

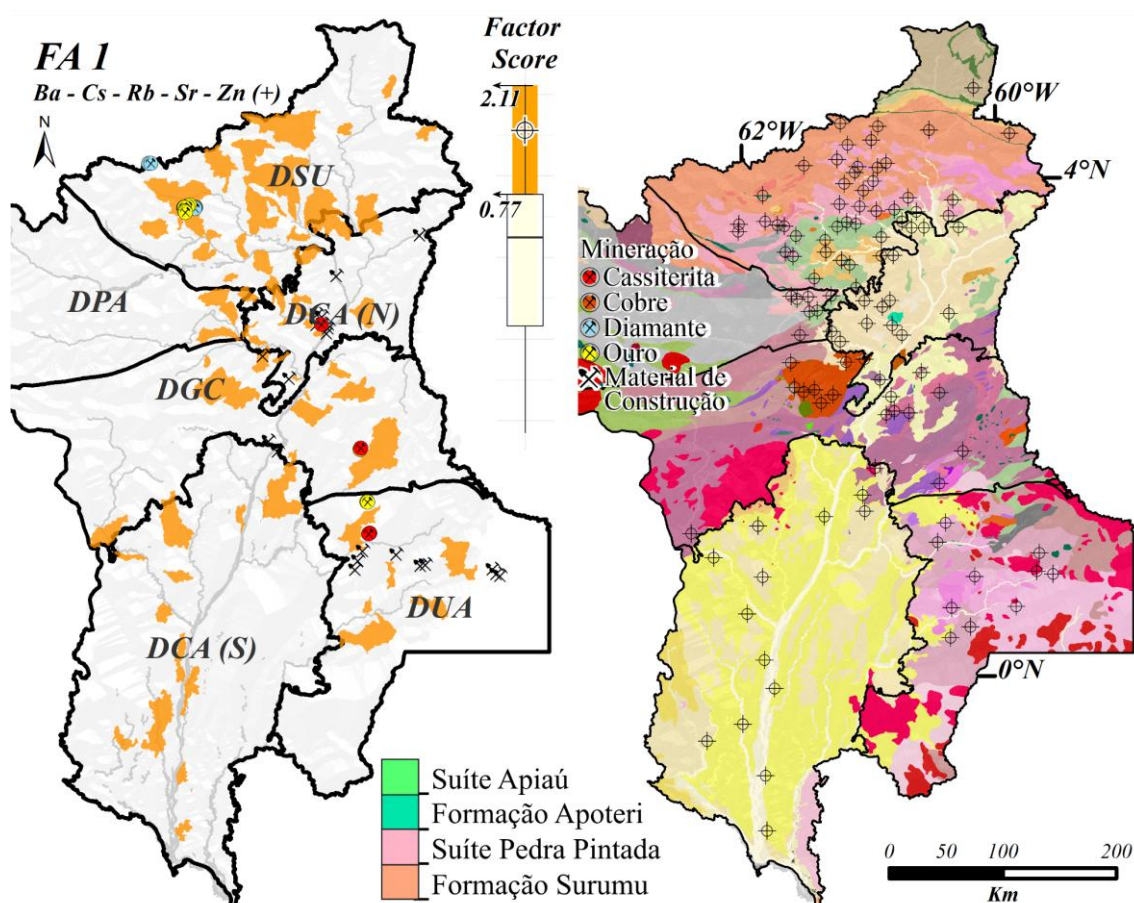


Figura 27 - Mapa de distribuição dos fator scores para o fator 1 (Ba-Cs-Rb-Sr-Zn). À esquerda, as bacias hidrográficas, à direita, as amostras

É especialmente notável a relação entre esses metais alcalinos e o Sr. O Sr é frequentemente considerado um elemento relativamente móvel em sistemas hidrotermais, o que pode levar ao seu enriquecimento junto com o Cs e o Rb durante os processos de alteração (Franqui *et al.* 2017). A presença de Zn nessa associação pode estar associada às rochas resultantes do magmatismo Mesoproterozóico da Formação Apoteri e da Suíte Apiaú. O comportamento geoquímico do Zn nesses ambientes também é afetado pelo grau de fusão parcial e pelos processos de fracionamento subsequentes que ocorrem durante a formação do manto cratônico e da protocrosta máfica (Doucet *et al.* 2020). As assinaturas isotópicas de Zn e outros metais associados podem fornecer informações sobre os processos magmáticos que levaram à sua concentração. Isso sugere que altos graus de fusão parcial podem gerar assinaturas geoquímicas distintas que se preservam na mineralização e, por conseguinte, nos sedimentos (Gurumurthy 2024, Rousseau *et al.* 2019).

A distribuição dos sinais do DSU superior para essa associação forma uma densa

tendência de pontos no norte de Roraima, mais precisamente sobre a Suíte Pedra Pintada, onde o vulcanismo cálcio-alcálico contribuiu para a configuração geológica da região (Reis *et al.* 2000). Dentro dos domínios DGC e DPA, também é possível encontrar uma concentração de sinais. Isso pode estar ligado à relação temporal entre o cinturão da Guiana Central e a Suíte Pedra Pintada, que exibem idades entre 1,96 e 1,91 Ma, coincidindo com os eventos magmáticos da Suíte e o desenvolvimento do cinturão (Figura 27).

5.5.8 Fator 2 (Ce - La - Th - U - Y)

O percentual de variância explicado pelo sistema de dados para este fator foi de 15,76. A associação geoquímica do Fator 2 (Figura 28) ocorreu entre os elementos terras-raras leves (La e Ce), Th, U e Y, demonstrando anomalias espacialmente localizadas em suítes e formações que integram o Cinturão Ígneo Orocaina. As formações Surumu e a Suíte Pedra Pintada, no setor norte (DSU), exibem ambientes ígneos cálcico-alcálicos de alto-K (Fraga *et al.* 1996, Fraga *et al.* 2017, Reis *et al.* 2017). Tanto os andesitos, dacitos e riolitos que compõem a formação quanto os granodioritos, sienogranitos, monzogranitos e tonalitos que formam as rochas plutônicas da Suíte Pedra Pintada podem conter minerais acessórios como a monazita (Aldila *et al.* 2024). A presença de Th e U nessas estruturas geológicas pode aumentar a concentração de terras-raras, dado que esses actínídeos frequentemente se encontram em contextos geológicos similares e podem influenciar o comportamento geoquímico das ETR durante os processos magmáticos (Elias *et al.* 2022).

Os Th, U e os ETR são comumente encontrados em minerais acessórios como monazita, xenotima e apatita (Papadopoulos *et al.* 2019). A apatita contribui amplamente para o conteúdo dos elementos envolvidos no Fator 2 (Gomes *et al.* 2011, Warren *et al.* 2019). No DGC, no complexo anortosito–mangerita–granito rapakivi (AMG), a apatita é um dos principais minerais acessórios. Outras evidências mostram que, dentro do complexo, amostras de mangeritas e granito de biotita-hornblenda apresentam caráter metaluminoso, enquanto amostras de granito, de biotita e diques variam de metaluminosas a marginalmente peraluminosas (Fraga *et al.* 2009a, Fraga *et al.* 2009b). Esse fato é corroborado por anomalias dessa mesma correlação elementar encontradas na mesma área de estudo em rochas alcalinas (monzonitos) da Suíte Apiaú no DGC.

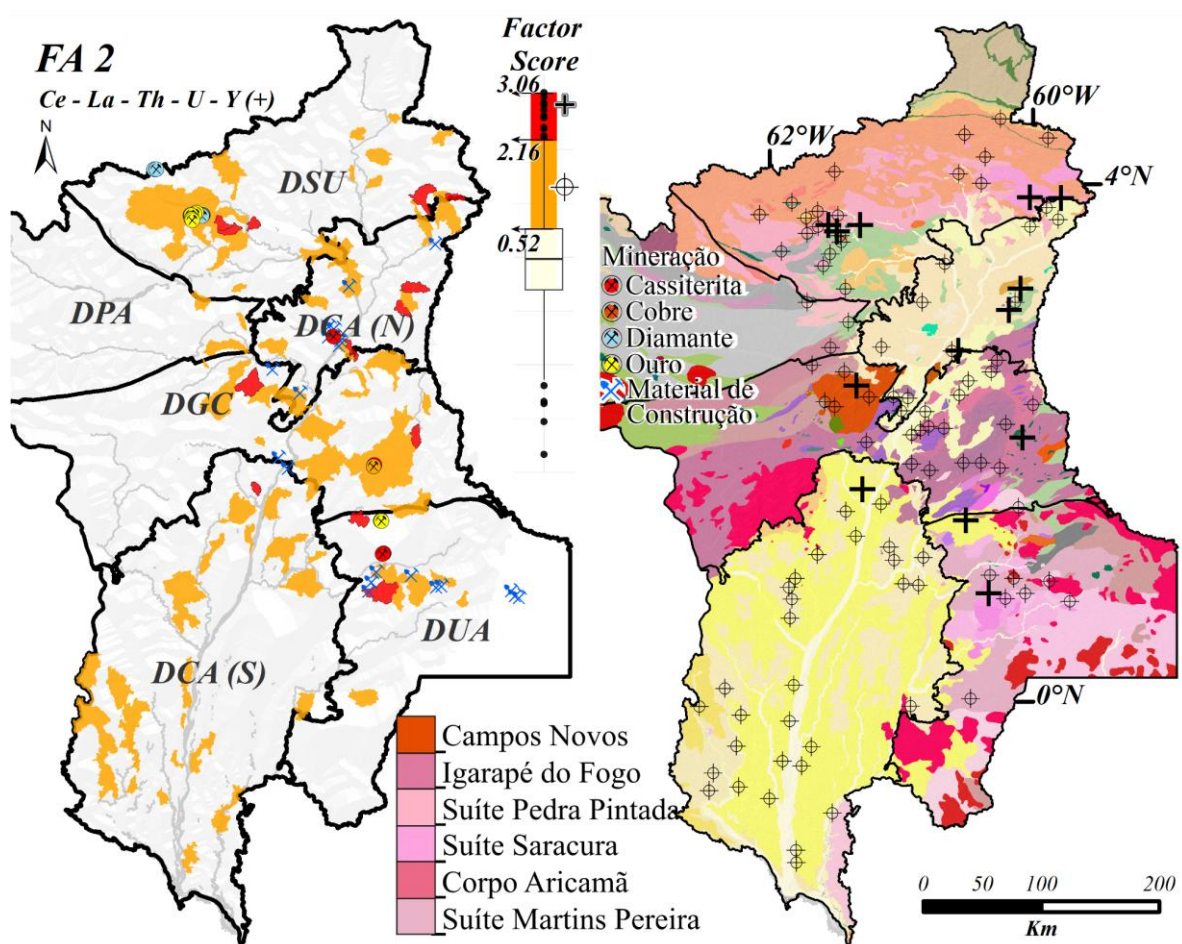


Figura 28 - Mapa de distribuição dos fator scores para o fator 2 (Ce-La-Th-U-Y). À esquerda, as bacias hidrográficas, à direita, as amostras

Isso sugere uma gênese de fosfatos favorecida por fases magmático-hidrotermais, onde fatores como o relevo e, consequentemente, o perfil de intemperismo são enriquecidos em elementos terras-raras leves e, posteriormente, em horizontes lixiviados ricos em elementos de Alta Força de Campo, como U e Y (Goulart *et al.* 2023). No sudeste do Estado, no domínio DUA, encontram-se rochas graníticas alcalinas onde coexistem minerais acessórios como a monazita e xenotima (Almeida *et al.* 2007). A correlação espacial entre os scores e os corpos graníticos de caráter peraluminoso da Suíte Água Branca, anteriormente conhecida como Granito Igarapé Azul, evidencia a afinidade entre os elementos da associação e a mineralogia (Figura 28). A Suíte Martins Pereira, composta majoritariamente por granitos cálcio-alcálicos, apresenta enriquecimento no conteúdo de K, Th e U, além de características migmatíticas associadas à presença de monazita (Almeida *et al.* 2007, Almeida & Macambira 2007).

5.5.9 Fator 3 (Mn - Nb - Ti - Fe)

O percentual de variância explicado pelo sistema de dados para este fator foi de 13,90. As correlações espaciais apresentadas pelo fator 3 revelam 3 tendências corroboradas pela geologia. A primeira envolve os diques e soleiras diabásicas da Suíte Avanavero, no norte do estado sobre o DSU (Figura 29). A química toleítica naturalmente integra os elementos desta associação, onde são fundamentais no controle da cristalização de minerais como magnetita e ilmenita (Nomade *et al.* 2003). A presença do Nb nesses magmas permite associá-los a uma fonte mantélica (Derycke *et al.* 2021b).

O intemperismo desses materiais se reflete nos sedimentos dos depósitos aluvionares, como as superfícies dendrítico-lateríticas a jusante. No domínio DGC, os sinais seguem as fácies da Suítes Urubu, Serra da Lua e Martins Pereira, compostas por anfibólios e micas, onde elementos como Fe, Mn e Ti são comuns na hornblenda. A biotita também contém Fe, e nos minerais acessórios do gnaiss é possível encontrar Nb.

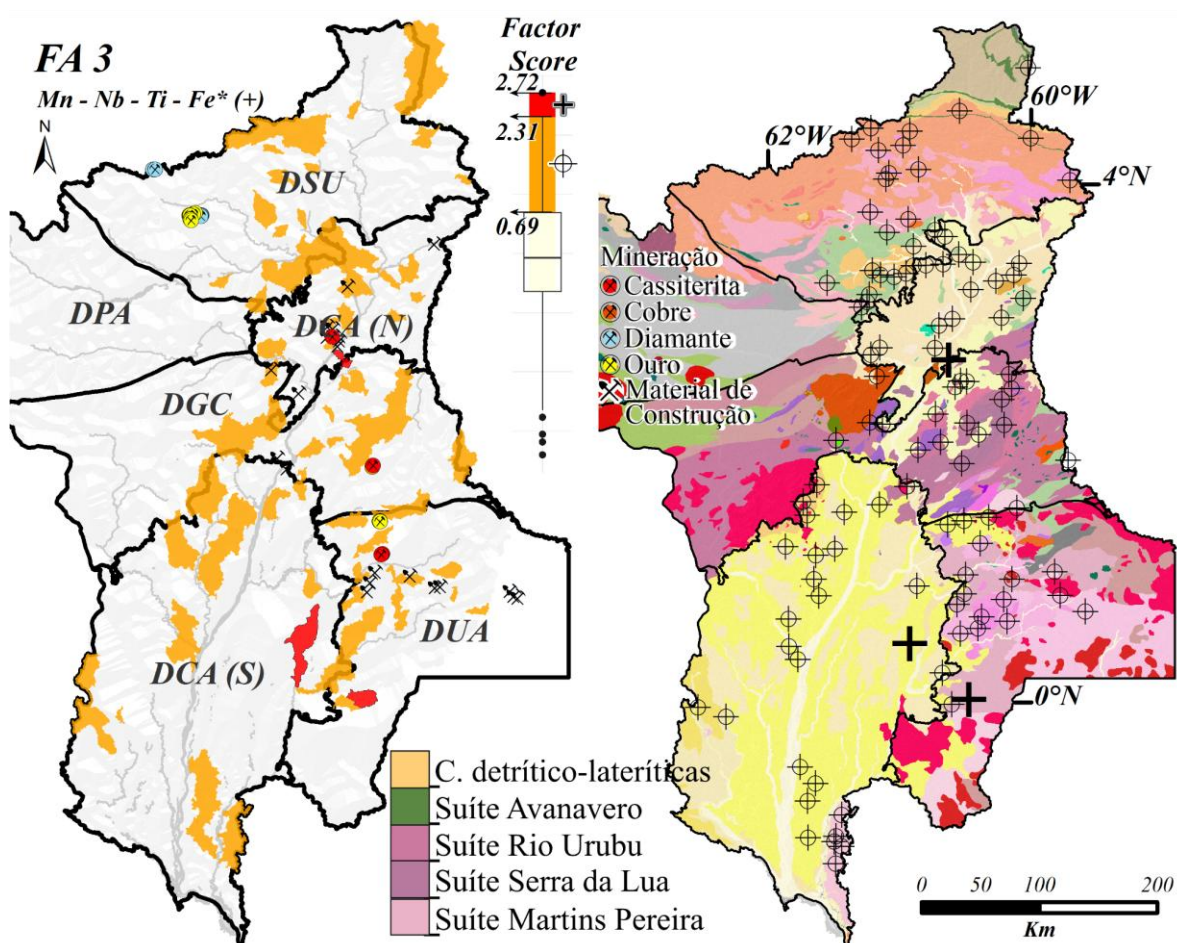


Figura 29 - Mapa de distribuição dos fator scores para o fator 3 (Mn-Nb-Ti-Fe). À esquerda, as bacias hidrográficas, à direita, as amostras

5.5.10 Fator 4 (Co - Cr - Cu - Fe - Ni - V)

O percentual de variância explicado pelo sistema de dados para este fator foi de 11,68. A associação geoquímica dos elementos Cr, Ni, Cu, Fe, Co e V representa características específicas da litoestratigrafia (Figura 30). Elementos como Cr, Ni e Co são amplamente encontrados em rochas máficas e ultramáficas, concentrados em minerais típicos como olivina, piroxênios e anfibólios (Mével 2003, Quantin *et al.* 2008, Bai *et al.* 2019). No Estado de Roraima, é possível encontrar essas ocorrências em rochas do Mesoproterozoico, como os Corpos Rochas Máficas-Ultramáficas Indiscriminadas, Corpo Caracarái e Corpo Repartimento, bem como nos Andesitos basálticos e Traquiandesitos da Formação Represa Jatapu (Suszczyński 1981). No Paleoproterozoico, encontram-se a Suíte Avanavero e o Corpo Serra do Cupim (Beyer *et al.* 2015, Santos *et al.* 2002, Teixeira *et al.* 2019, Voicu *et al.* 2001). No Mesozóico, os basaltos toleíticos da Formação Apoteri também podem apresentar tais associações (Benevides Filho *et al.* 2023).

No norte do Estado, no DSU, a Suíte Intrusiva Uraricaá contém ortopiroxênios e clinopiroxênios, minerais que concentram principalmente elementos como Cr, Ni, Co, V e Cu (Reis *et al.* 1999). Ainda no DSU, as análises químicas de basaltos e andesitos em diques e soleiras da Suíte Avanavero revelam teores de óxidos de ferro, além de concentrações significativas de Ni, Cr, Co e Cu, com menores quantidades de V (Reis *et al.* 2013).

Próximo aos setores marcados pelas bacias que apresentam os maiores scores da associação, encontram-se coberturas detrítico-lateríticas. Essas coberturas são compostas por restos de material saprolitizado de rochas metassedimentares do Grupo Cauarane (Fraga *et al.* 2009b). No projeto Caracarái, análises dessas lateritas identificaram concentrações de Cr, V, Cu e, em menor grau, Ni, além de Pb e Zn (Faria *et al.* 2000).

No DGC, as rochas máficas gabroicas de Caracarái, intrudidas na Suíte Metamórfica Rio Urubu, estão próximas às anomalias apresentadas pela associação geoquímica. Nessas rochas, encontram-se Cr e Fe associados à composição das biotitas, além da presença de apatitas na composição da Serra Repartimento (Ballesteros-Camaro & Ríos-Guerrero 2019).

Embora, ao sul, dentro do DUA, haja presença de rochas máficas do Grupo Caracarái, as concentrações dos elementos estudados na área denominada Jaburu não

apresentaram valores significativos para nenhum dos elementos da associação (Reis *et al.* 1999). Assim, é provável que, nesse domínio, a distribuição dos elementos esteja relacionada à presença das intrusões dos corpos máficos e ultramáficos da Suíte Uraricaá, localizados a montante (Reis *et al.* 2022).

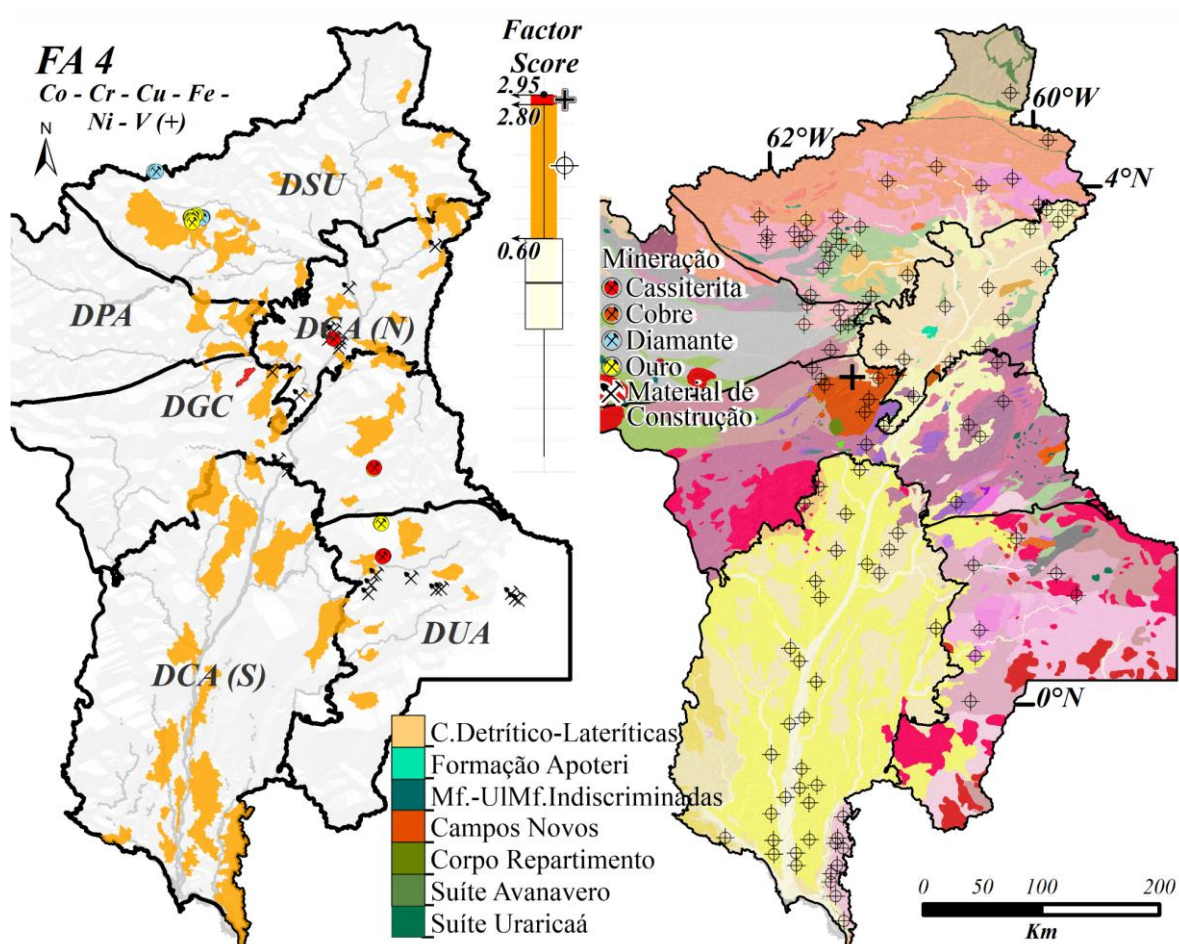


Figura 30 - Mapa de distribuição dos fator scores para o fator 4 (Co-Cr-Cu-Fe-Ni-V). À esquerda, as bacias hidrográficas, à direita, as amostras

5.5.11 Fator 5 (Al - Ga - Pb - V - Zn)

O percentual de variância explicado pelo sistema de dados para este fator foi de 7,51. Os scores mais altos dentro da distribuição dos boxplots foram utilizados para classificar espacialmente a relação com o ambiente em mapas. Essa associação explica 85% da variância do fator 5. Este fator reflete processos geoquímicos controlados pela intemperização devido à redistribuição de elementos em ambientes sedimentares aluviais. As respostas dessa associação nos mapas tendem a formar aglomerações sobre áreas correspondentes ao DCA no Norte, mas ainda mais densas no sul do Estado, na foz do Rio Branco (Figura 31).

A ampla presença de minerais argilosos nesses ambientes, como caulinita e gibbsita, é resultado da meteorização química de feldspatos e micas. Essas alterações são amplamente encontradas nos domínios tropicais do Escudo das Guianas (Nomade *et al.* 2003). Uma das alterações produzidas nesses ambientes envolve elementos como Al e Ga, que possuem uma correlação bastante estreita, observada na matriz de correlação de Spearman e na análise de clusters. Eliopoulos & Eliopoulos (2019) explicam como o Ga tem a capacidade de substituir o Al^{3+} em minerais de alumínio, devido à relação entre seus raios iônicos semelhantes na estrutura mineral.

O V é mobilizado por processos de alteração supergênica, geralmente se concentrando em minerais secundários, como os vanadatos (Mondillo *et al.* 2020). As argilas podem incorporar o V, assim como os óxidos de Fe e Mn, especialmente em ambientes aluviais (Bhattacharjee *et al.* 2018, Huang *et al.* 2015, Pech *et al.* 2023). No Estado, as coberturas aluviais são influenciadas por intrusões de magmatismo máfico, representadas principalmente pelas doleritas Avanavero e Quarenta Ilhas (Beyer *et al.* 2015, Hebeda *et al.* 1973, Reis *et al.* 2022). Essas intrusões apresentam concentrações de V que variam entre 745,00 e 222,00 mg kg⁻¹, sugerindo uma contribuição significativa desses corpos para o enriquecimento geoquímico no ambiente aluvial (Reis *et al.* 2013).

As coberturas aluviais do Estado encontram-se intrudidas tanto ao norte quanto ao sul. Para elementos como Pb e Zn, as concentrações chegam a 10,30 e 99,00 mg kg⁻¹, respectivamente (Reis *et al.* 2013). Durante a meteorização, os elementos podem ser mobilizados e precipitados na forma de minerais secundários. Esses processos podem ser acumulativos em zonas saprolíticas e sedimentos aluviais, onde mudanças de pH e condições de oxirredução favorecem o enriquecimento (Haeruddin *et al.* 2019, Kelepertzis *et al.* 2012).

No DCA, que corresponde a áreas de baixa declividade e, em sua maioria, inundadas, como no Sul, formam-se armadilhas para esses elementos. O retrabalhamento de formações mais antigas, como as sedimentares proterozóicas e coberturas lateríticas terciárias, também é uma variável importante (Pinheiro *et al.* 1990). Nessas áreas, é possível encontrar minerais argilosos e oxi-hidróxidos de Fe que podem concentrar os elementos da associação (Zhang *et al.* 2012). Um exemplo do exposto é a Formação Içá, que apresenta uma composição argilosa e pelítica, ocupando áreas de baixa declividade ao sul do estado, sobre o DCA (S) (Silva *et al.* 2023, Soares *et al.* 2021, Souza *et al.* 2013). Este fator composicional se soma ao efeito de concentração pode ser apenas um

dos fatores em um rio de águas brancas como o Rio Branco, influenciado por processos de classificação hidrodinâmica que concentram minerais densos no leito do rio, gerando o efeito de mineral pesado (Garçon & Chauvel 2014, Ferreira Neto *et al.* 2021).

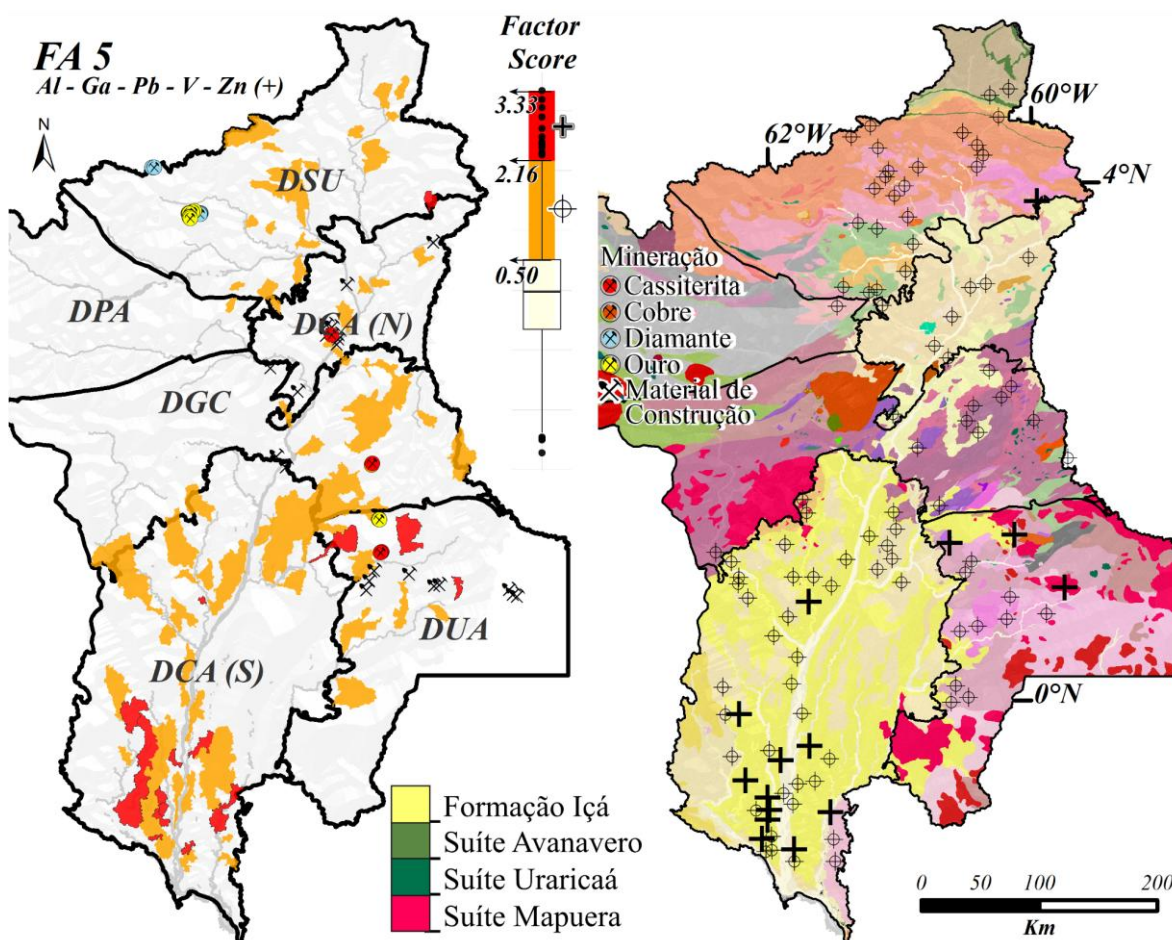


Figura 31 - Mapas de distribuição dos fator scores para o fator 5 (Al-Ga-Pb-V-Zn). À esquerda, as bacias hidrográficas, à direita, as amostras

5.5.12 Fator 6 (Sc - Sn - Nb)

O percentual de variância explicado pelo sistema de dados para este fator foi de 6,01. Os elementos dessa associação frequentemente estão associados a ambientes geológicos específicos para sua acumulação, que nesse caso, são corpos graníticos (Figura 32). Os depósitos de Sn são tipicamente encontrados em associação com intrusões graníticas, onde os processos hidrotermais podem concentrar o mineral cassiterita (SnO_2) (Voicu *et al.* 2001). O Sc e Nb, por outro lado, costumam ser encontrados em associação com rochas ígneas alcalinas e carbonatitos, que podem ocorrer no Escudo das Guianas (Voicu *et al.* 2001). Os processos de diferenciação magmática também contribuem para a concentração desses elementos, juntamente com intrusões máficas e ultramáficas que

são comuns na região (Reis *et al.* 2013). Segundo Barreto *et al.* (2013), grandes províncias ígneas silicatadas existentes durante o Proterozóico nessa região, devidos a períodos de intensa atividade magmática, podendo ter contribuído para a formação de depósitos ricos em Sc e Nb. Os óxidos dos elementos da associação são fases características dos granitos evoluídos que passaram por processos de fracionamento magmático (Gao *et al.* 2023, Garate-Olave *et al.* 2020).

Dentro dos domínios DCA (N), DGC e DUA, há minas de cassiterita que ocupam as bacias com os maiores scores. Isso poderia demonstrar a existência desses componentes em depósitos minerais, como cassiterita (SnO_2), columbita (óxidos de Nb, Ta) e pirocloro (óxido de Nb), que frequentemente se devem a esses processos de segregação (Inverno & Hutchinson 2006, Li *et al.* 2023).

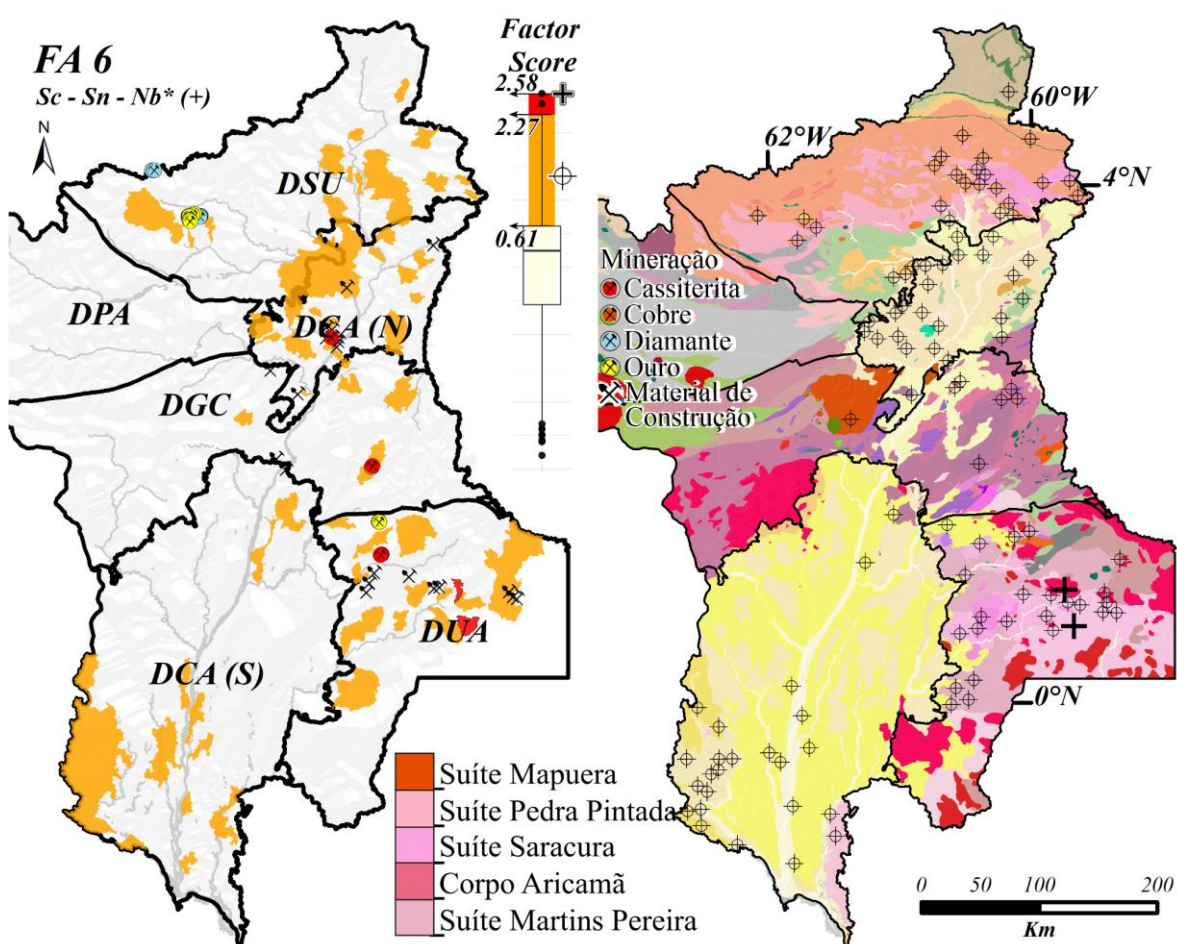


Figura 32 - Mapas de distribuição dos fator scores para o fator 6 (Sc-Sn-Nb). À esquerda, as bacias hidrográficas, à direita, as amostras

Segundo Klimpel *et al.* (2021), os processos hidrotermais podem gerar a lixiviação de Sc a partir de fontes hidrotermais profundas. Como as litologias da SLIP

Uatumã, que coincidem com os scores mais altos dessa associação no DUA e incluem os dioritos, granitos e sienogranitos da Suíte Mapuera, podem fornecer vias adequadas para os fluidos hidrotermais, possibilitando o transporte de Sc e outros elementos como Nb e Sn para depósitos secundários (Almeida & Macambira 2007). No DSU, o cinturão Ígneo Orocaima, setor norte, integra monzogranitos e granodioritos da Suíte Pedra Pintada, granitos e alcalifeldspatos do Corpo Aricamã (Mendes *et al.* 2022, Reis *et al.* 2000). O Stock da Suíte Saracura é composto por sienogranitos e monzogranito (Reis *et al.* 2000). Fatores adicionais, como a atividade tectônica e o magmatismo, concentram e acumulam esses elementos em sistemas graníticos, com ênfase em zonas de processos pegmatíticos e hidrotermais, onde se entrelaçam (Guo *et al.* 2022, Zhang *et al.* 2022).

5.5.13 Índices geoquímicos para análise de contaminação em Roraima

Para avaliar a qualidade e os níveis de concentração de elementos considerados potencialmente tóxicos, tanto pela sua ocorrência natural quanto pela associação com atividades humanas, como mineração e agropecuária, foram calculados índices geoquímicos e ambientais. Nesses cálculos, também foram incluídos elementos com poucas amostras acima do limite inferior de detecção, como As (16,08%), Cd (48,25%) e Hg (47,55%). A razão para utilizar esses elementos está na sua relevante presença em atividades antropogênicas.

Os elementos As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn foram utilizados nos cálculos de EF, CF, mGC, PLI e RI. Cada um desses índices se baseia em medidas de tendência, sendo a mediana a mais empregada devido à sua menor influência por valores atípicos. A mediana dos elementos foi calculada tanto para toda a área de estudo quanto para cada um dos domínios litoestratigráficos de Roraima. Neste trabalho, foram utilizados três tipos de normalizadores: Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Esses elementos destacam-se por não sofrerem alterações significativas devido à atividade humana, dada a sua abundância natural. Além disso, possuem características específicas, como o Ca+Mg, que tende a representar processos biogeoquímicos (Wang *et al.* 2011b).

O normalizador que permitiu identificar o maior número de enriquecimentos extremamente severos (ESE) foi o Al, conhecido por representar minerais argilosos. Os elementos Hg (5,82%) (Figura 36), Cd (1,39%) (Figura 34), Cr (0,69%) (Figura 35) e As (0,46%) (Figura 33) apresentaram o maior número de amostras na classe ESE. A tendência geral mostra que entre 48,13% e 50,23% das amostras concentram-se na classe

Sem Enriquecimento (NE), seguida pela classe de Enriquecimento Menor (MiE), com 37,99% para a área total e 38,22% na segmentação por domínios litoestratigráficos. Isso indica que o efeito da segmentação tem impacto leve, porém perceptível, em todos os elementos, especialmente no As, Cd e Hg. Os mapas de EF do Hg mostraram maiores enriquecimentos na porção sul, na bacia do rio Jufari, acompanhados, em menor grau, por Cd e As. Os demais elementos seguem padrões de enriquecimento associados à geologia. Uma exceção é o Pb (Figura 39), cujos enriquecimentos MSE e SE tendem a coincidir com o mapa unielementar da seguinte forma: no Sul, sobre o DCA, utilizando o normalizador Al, há uma tendência de coincidência com algumas concentrações dentro do intervalo superior. Com o normalizador Fe+Mn, os enriquecimentos são observados no DGC, na região central do Estado. O Pb não apresentou enriquecimento VSE ou ESE. Em Roraima, a baixa presença de carbonatos contribui para o baixo desempenho do normalizador Ca+Mg. A aplicação desse normalizador foi realizada com a intenção de compreender o ciclo biogeoquímico dos metais nos sedimentos, especialmente em regiões fortemente influenciadas pela agropecuária, como é o caso de Roraima (Bai *et al.* 2019).

Adicionalmente, os resultados para os elementos mencionados requerem consideração das observações de autores como Figas *et al.* (2021), que observaram que, apesar dos solos da área de estudo não estarem altamente contaminados, os valores de EF indicavam contaminação severa e localizada, atribuída a atividades antropogênicas específicas. Isso destaca a importância de estabelecer um Background/Baseline geoquímico sólido antes de interpretar os resultados de EF.

Ao empregar o CF, os elementos Cr, Cu e Ni mostraram ocorrências espacialmente relacionadas à geologia, vinculadas a corpos máficos e ultramáficos nos domínios DSU, DGC e DUA (Figura 41). Elementos como Zn também estão associados a rochas graníticas nesses domínios. Cd e Hg apresentam coincidências espaciais nas áreas dos domínios DSU no Norte e DGC, especificamente na porção oriental do cinturão ígneo Rio Urubu. Para o Cd, as bacias hidrográficas onde as amostras apresentaram alta e extrema contaminação coincidem no Norte, nos DCA (N), DUA e DGC. Toda a bacia do rio Jufari apresentou um nível de contaminação extrema segundo o índice (Figura 42).

A hierarquia dos elementos com maior número de amostras em contaminação extrema é: Hg (15,38%) > Cd (11,19%) > Cr (5,59%) > Zn (3,26%) > Ni (2,10%) > Pb (1,17%) > As (0,23%) > Cu (0,23%). Esses percentuais têm relação direta com o número

de amostras abaixo do limite de detecção, influenciando a mediana e elevando os valores do CF, comprometendo a precisão do índice para elementos com poucas amostras representativas. Uma alternativa para analisar tendências nos mapas de CF e EF é avaliar amostras acima do limite de detecção e compará-las com estudos de maior resolução amostral.

Por essas razões, os elementos As, Cd e Hg não foram utilizados no cálculo de índices multielementares para evitar distorções nos resultados ao serem combinados com Cr, Cu, Ni, Pb e Zn (Figura 43). A análise detalhada e multiescalar realizada neste estudo ressalta a importância de compreender a distribuição geoquímica de elementos potencialmente tóxicos em Roraima, tanto em relação à sua geologia quanto às atividades humanas. A integração de índices multielementares com mapas geoquímicos e estudos de segmentação regional fornece uma base sólida para a gestão de riscos ambientais e ecológicos no estado.

Isso é evidenciado nos resultados dos índices GCM e IREP, onde o primeiro tende a mostrar um cluster de bacias no DSU e no sul do DUA, correspondendo a áreas com afloramentos de rochas máficas da Suíte Uraricaá e do Corpo Rochas Máficas-Ultramáficas indiscriminadas. No DUA, afloramentos do Corpo Caracará foram identificados. Observou-se que, nos mapas segmentados, os valores de GCM classificados como muito altos foram reclassificados como altos ou até baixos no Norte. No Sul, sobre o DUA, o efeito foi oposto, com uma bacia passando de contaminação muito alta para ultra alta (Figura 39). Isso também é corroborado pelo IREP, onde o risco médio passou para baixo no DSU, enquanto, no DUA, uma bacia mudou de risco baixo para médio. Os índices GCM e IREP no DCA indicaram tendências de contaminação predominantemente baixas e moderadas. O risco ecológico potencial, de forma geral, é baixo.

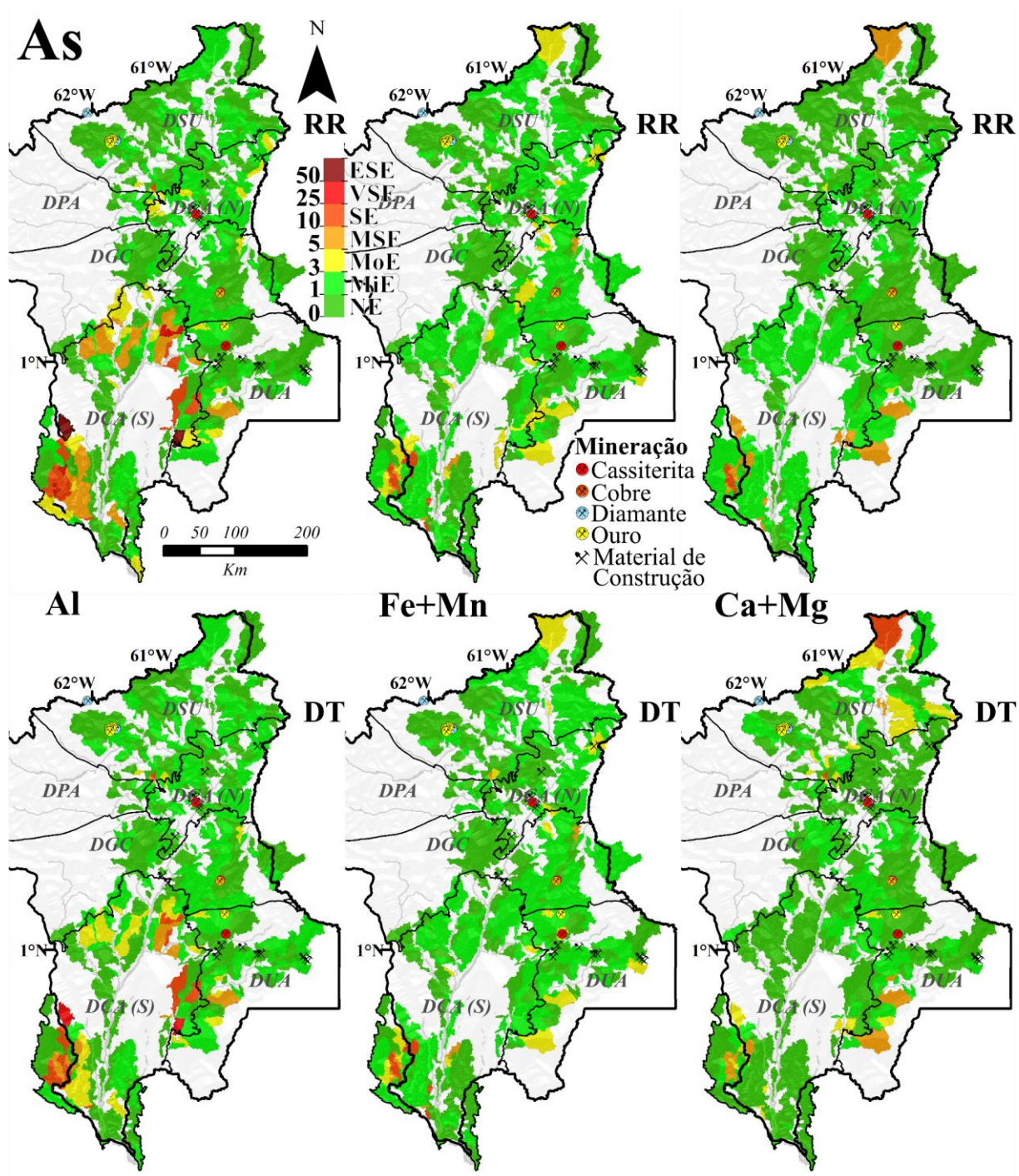


Figura 33 - Mapas do Fator de Enriquecimento para As, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE). Fonte: Autor

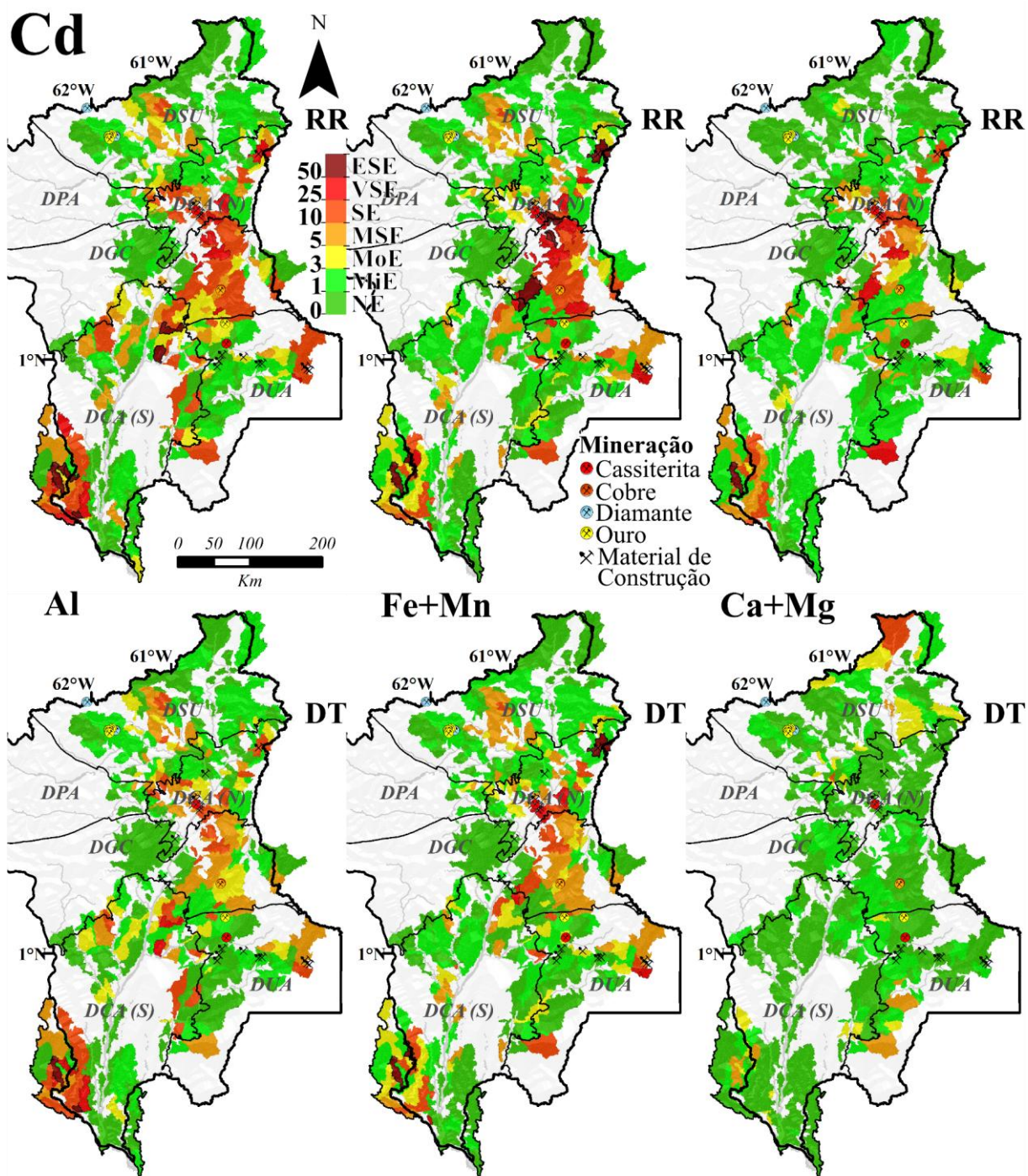


Figura 34 - Mapas do Fator de Enriquecimento para Cd, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE). Fonte: Autor

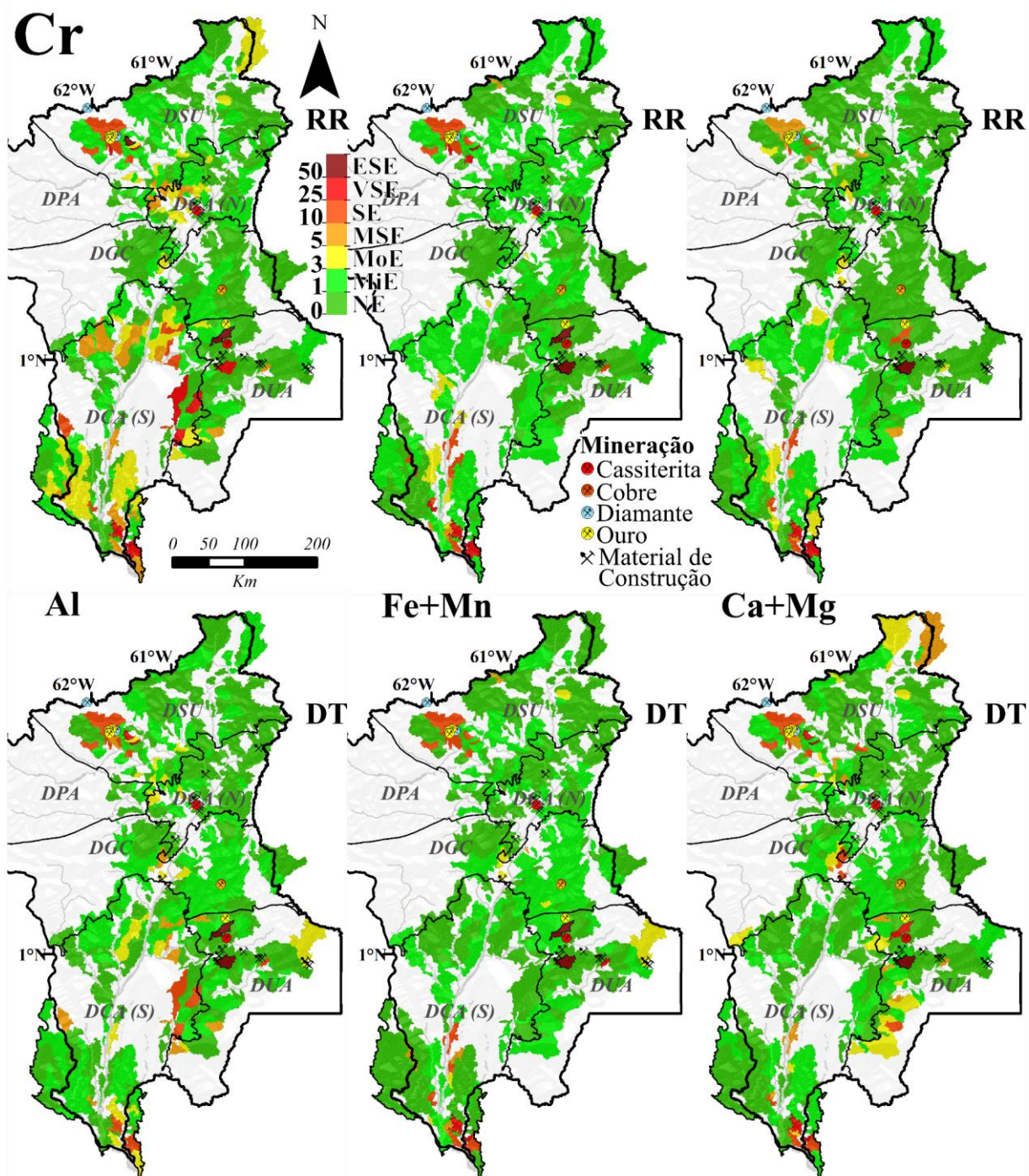


Figura 35 - Mapas do Fator de Enriquecimento para Cr, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE). Fonte: Autor

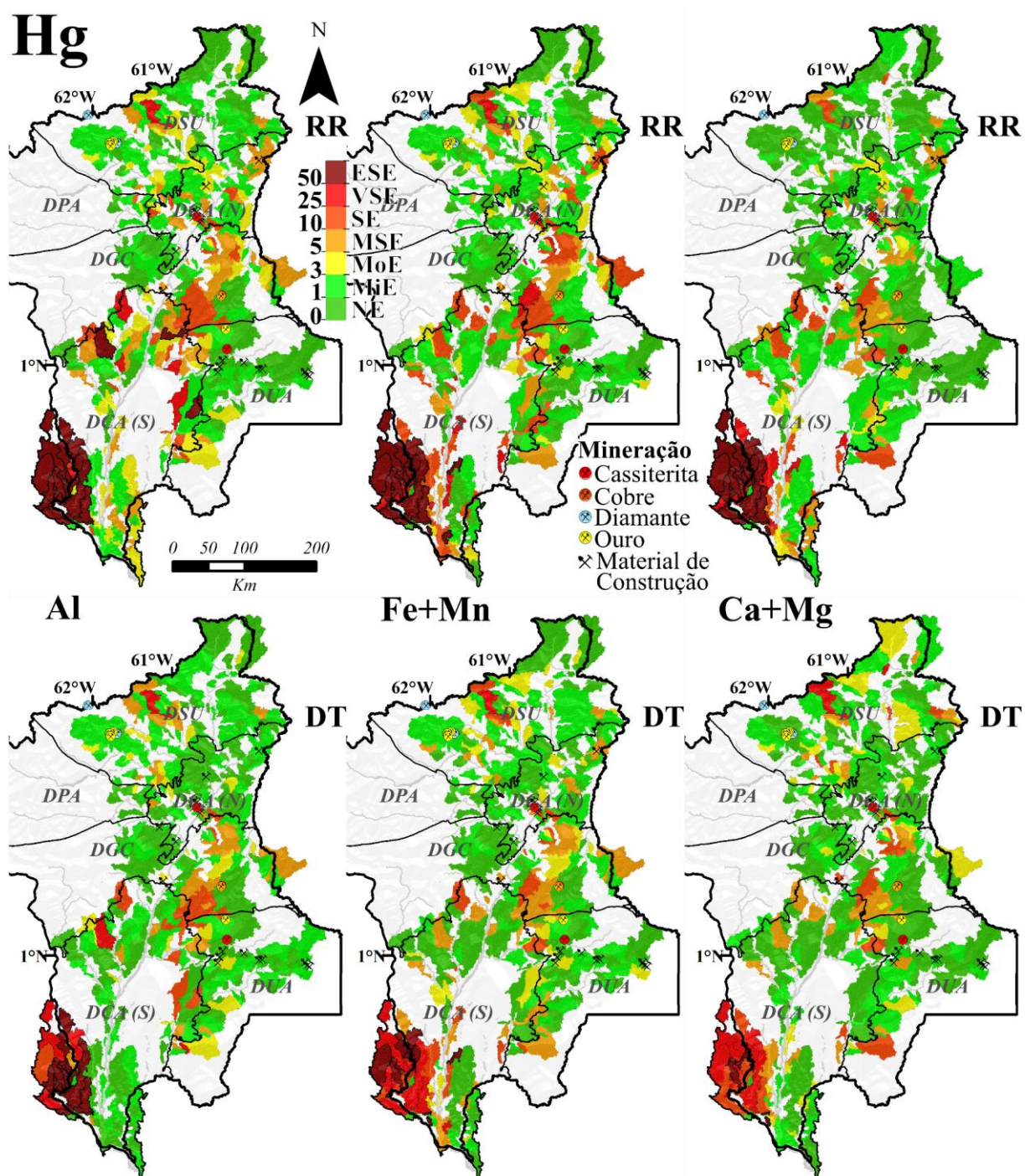


Figura 36 - Mapas do Fator de Enriquecimento para Hg, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE). Fonte: Autor

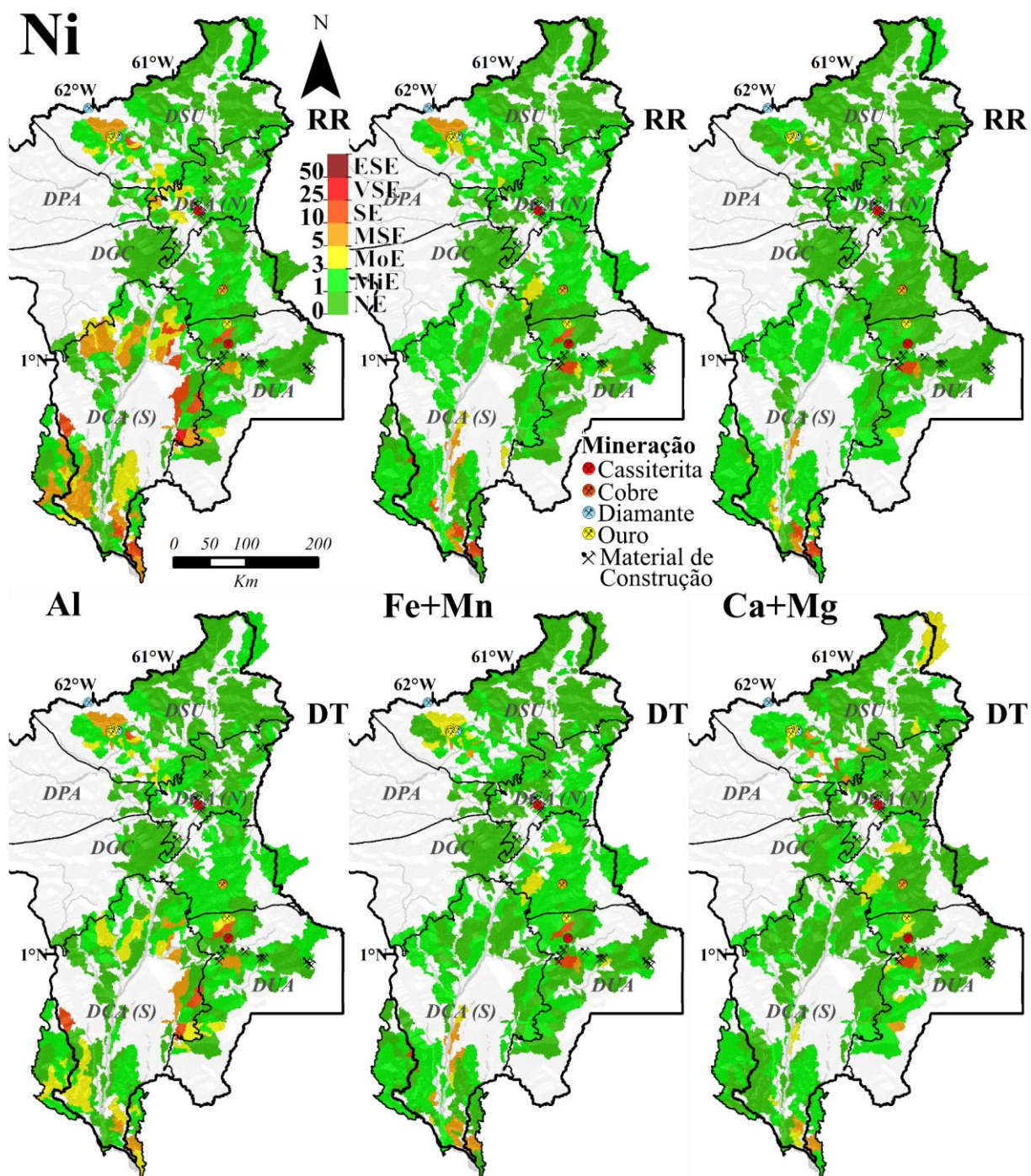


Figura 37 - Mapas do Fator de Enriquecimento para Ni, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE). Fonte: Autor

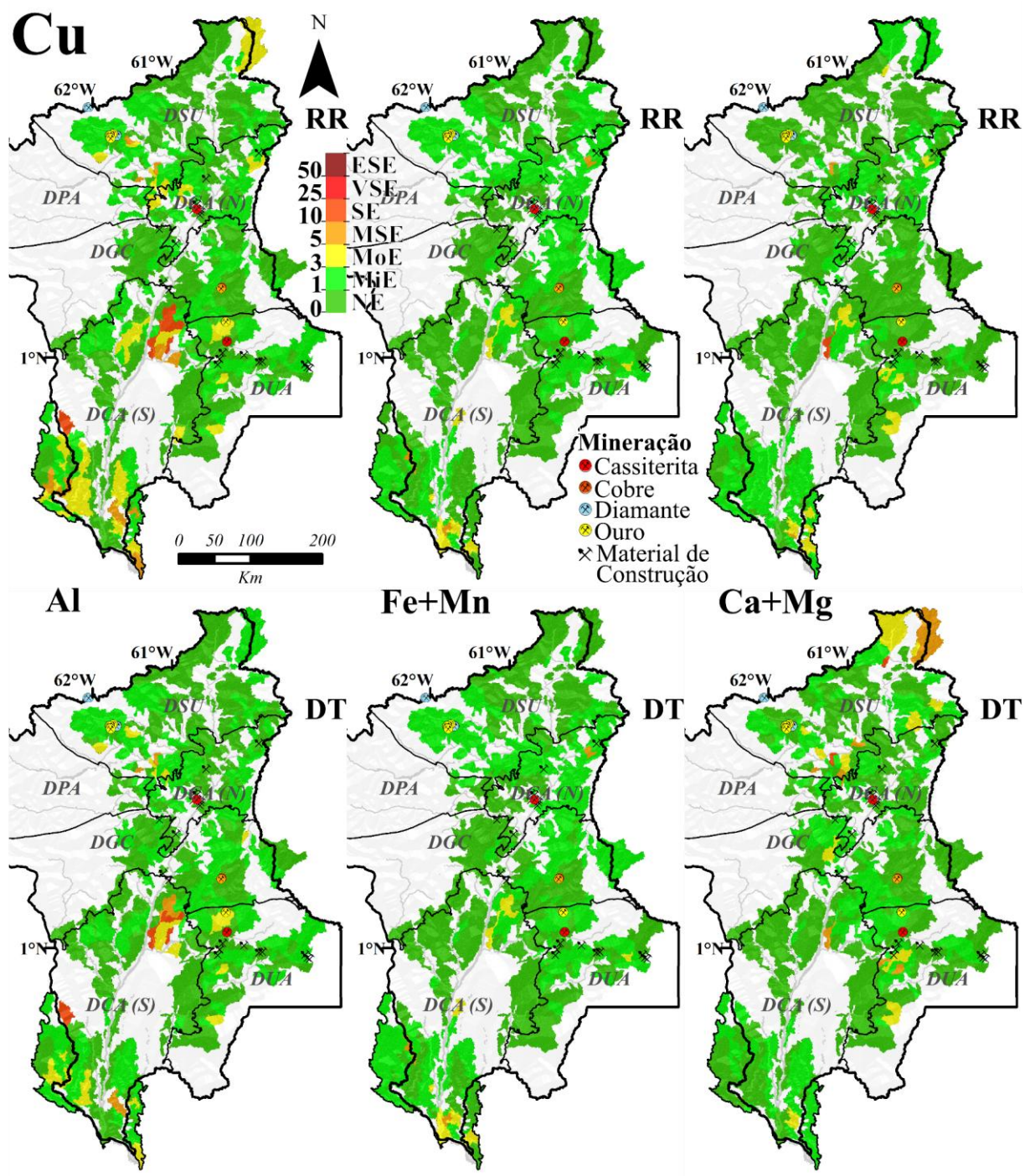


Figura 38 - Mapas do Fator de Enriquecimento para Cu, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE). Fonte: Autor

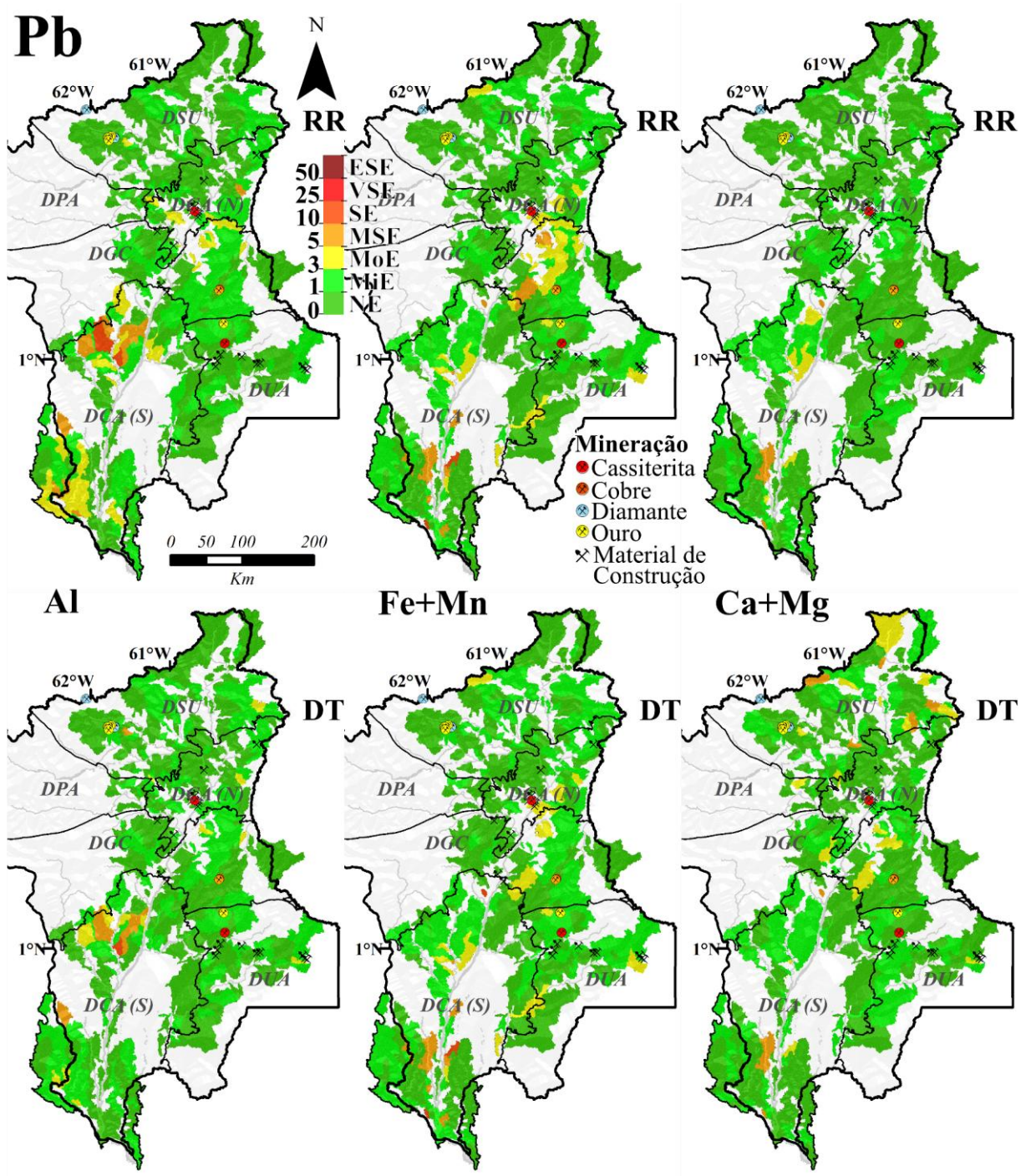


Figura 39 - Mapas do Fator de Enriquecimento para Pb, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE). Fonte: Autor

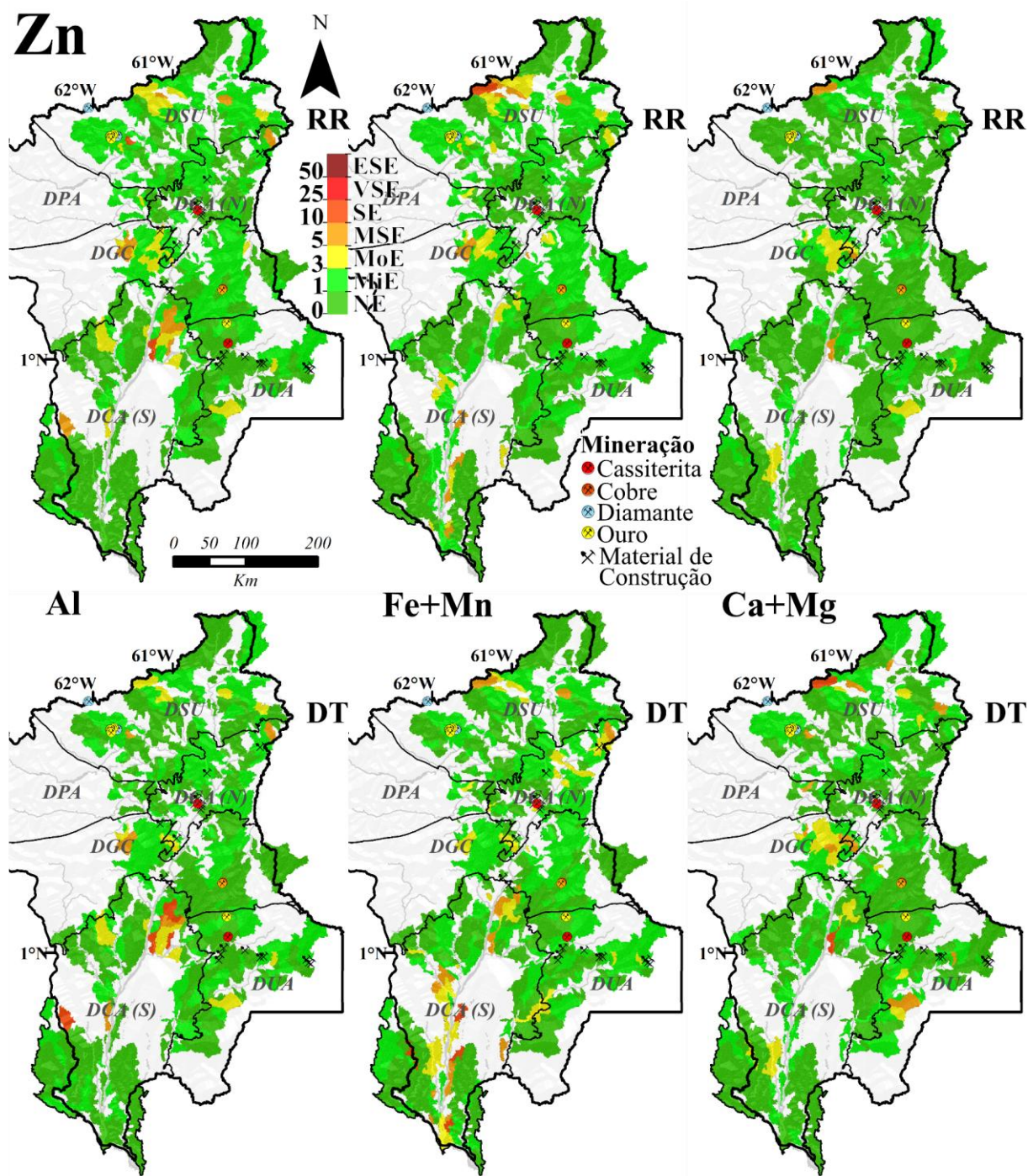


Figura 40 - Mapas do Fator de Enriquecimento para Zn, normalizados utilizando Al, Fe+Mn e Ca+Mg. Acima, calculado com base em todas as amostras de Roraima (RR) e, abaixo, os cálculos realizados com base nos Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Siglas: Sem enriquecimento (NE), Enriquecimento menor (MiE), Enriquecimento moderado (MoE), Enriquecimento moderadamente severo (MSE), Enriquecimento severo (SE), Enriquecimento muito severo (VSE), Enriquecimento extremamente severo (ESE). Fonte: Autor

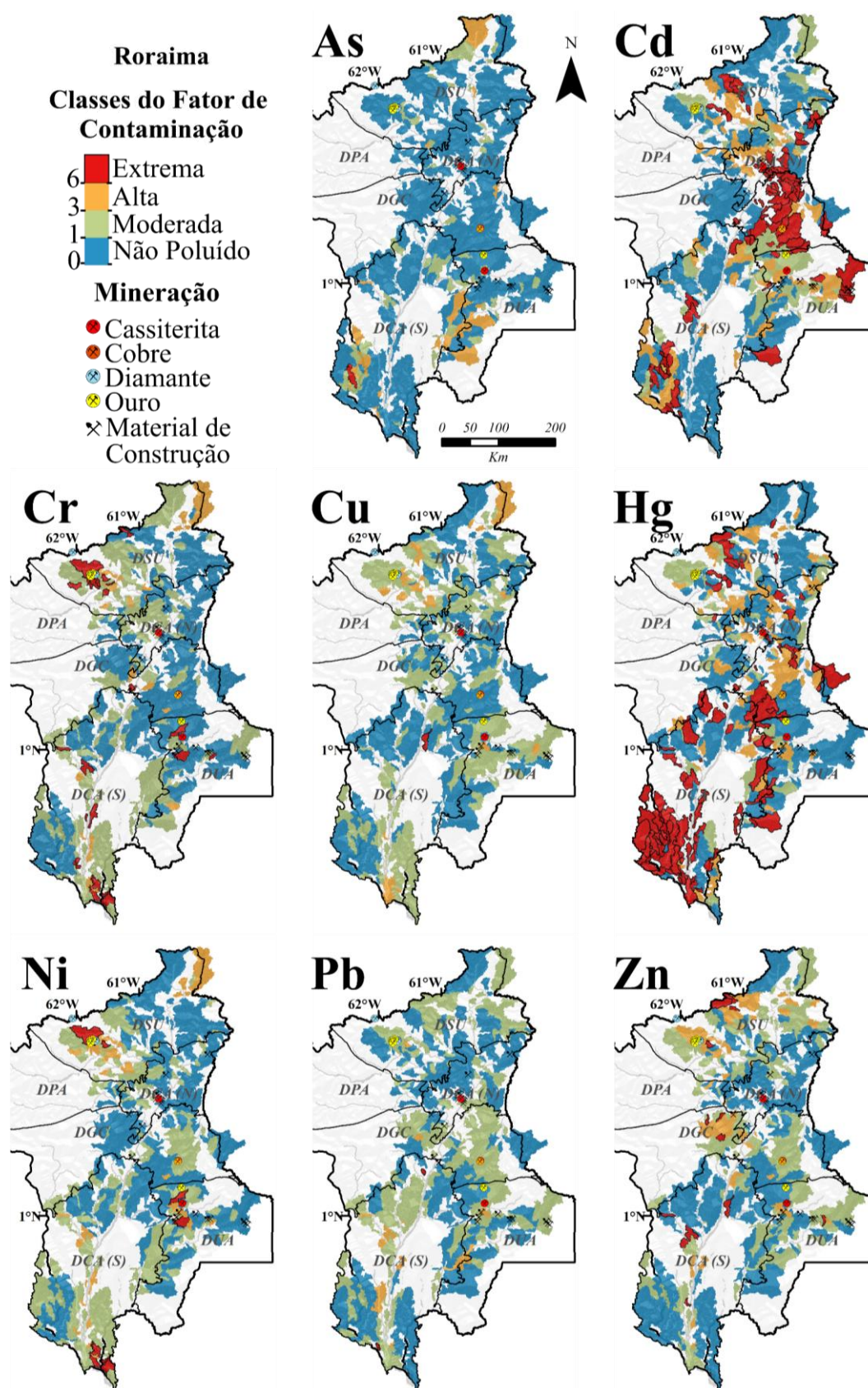


Figura 41 - Mapas do fator de contaminação para As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn. Fonte: Autor

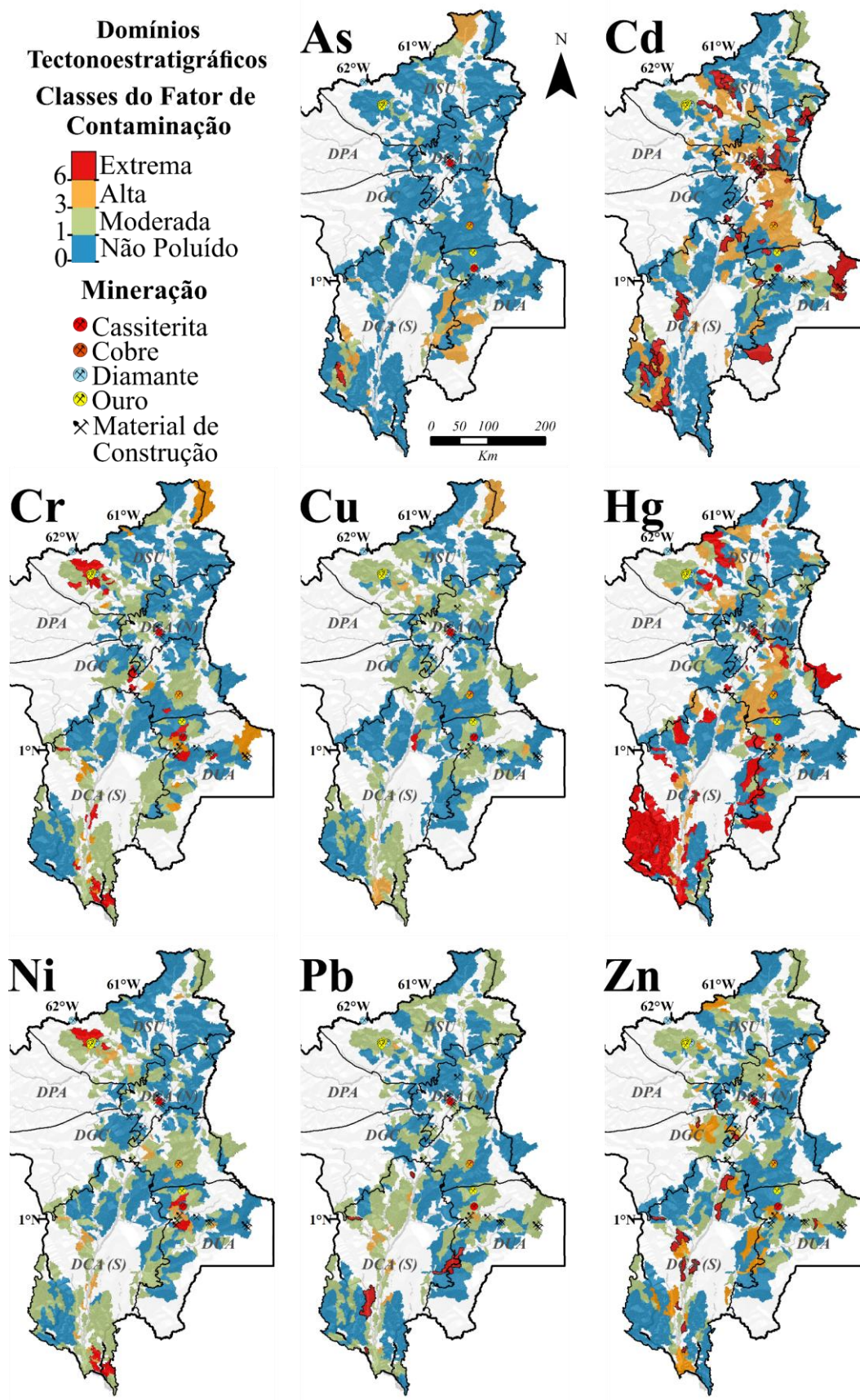


Figura 42 - Mapas do fator de contaminação para As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn em função dos domínios tectonoestratigráficos. Fonte: Autor

O IP apresentou variações sutis nos cálculos gerais e segmentados, mas não oferece a possibilidade de estabelecer padrões claros devido ao seu baixo número de classes (2). No DCA, ao norte, a segmentação revelou áreas em vermelho que não foram destacadas por outros índices.

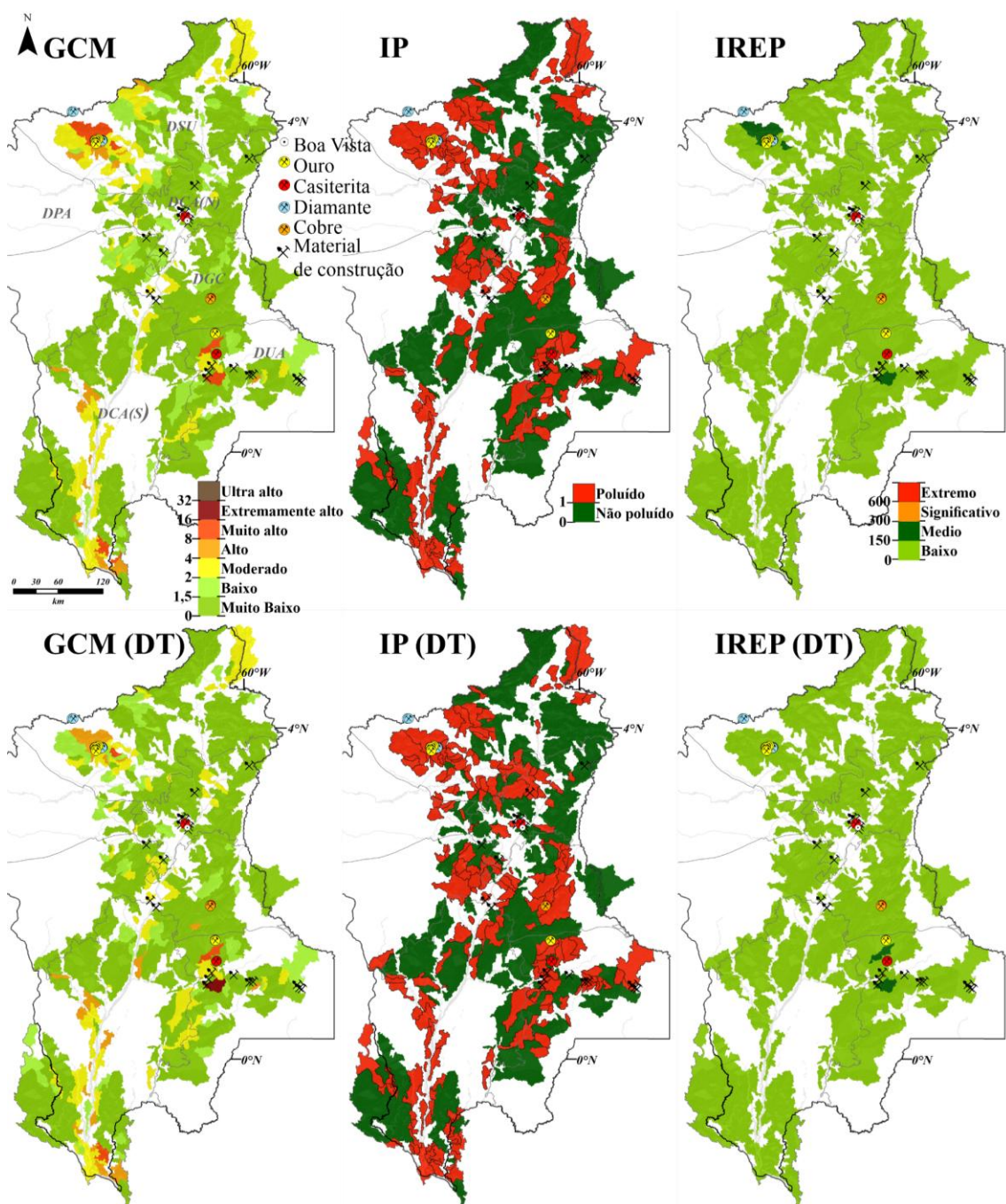


Figura 43 - Mapas de índices multielementares (Cr, Cu, Ni, Pb e Zn). Siglas: Grau de Contaminação Modificado (GCM), Índice de Poluição (IP), Índice de Risco Ecológico Potencial (IREP) e Domínios Tectonoestratigráficos (DT). Fonte: Autor

Apesar disso, no DCA Sul, os resultados mostraram um padrão de contaminação

moderada e alta ao longo do rio Branco, semelhante ao GCM. É importante ressaltar que o uso conjunto de índices, mais do que avaliar o desempenho de cada um, é essencial para considerar as vantagens e limitações, dependendo da natureza das amostras e dos cálculos empregados.

5.6 CONCLUSÕES

O mapeamento geoquímico utilizando sedimentos de corrente é uma ferramenta valiosa, pois contém informações relacionadas à composição das rochas. A aplicação de processamento de dados permite reconhecer as qualidades dos dados utilizados e a forma de proceder para obter resultados significativos. Os métodos de exploração de dados e a interpretação de parâmetros estatísticos são a base fundamental para definir as variáveis mais confiáveis a serem utilizadas.

Levando em consideração as informações fornecidas pelas primeiras etapas, é necessário ressaltar que, nos métodos de derivação do Background/Baseline, a mediana é a melhor medida de tendência central, sendo menos influenciada por valores atípicos. Isso, aliado aos métodos de normalização estatística, constitui uma estratégia que, em conjunto, torna o mMAD um método superior aos percentis ou ao TIF. Os dados geoquímicos, em sua maioria não paramétricos, apresentaram um melhor desempenho ao serem tratados com métodos de correlação não linear, aumentando ainda mais sua eficiência com o uso de transformações de razão logarítmica centrada (neste caso, CLR). A aplicação de estatística multivariada junto com dados transformados permite uma compreensão global do contexto da área de estudo, enquadrada nos processos evolutivos do Escudo das Guianas.

Os limiares e as associações definidas neste estudo demonstraram estar intrinsecamente ligados à geologia de rochas ígneas básicas. Por outro lado, os metais e metaloides de interesse possuem correlações espaciais e associativas com rochas máficas e ultramáficas. Fatores ambientais, como o intenso retrabalhamento devido às diferenças de relevo, são variáveis a serem consideradas. O rio Branco, de norte a sul, mostrou ser uma via para o deslocamento de sedimentos enriquecidos em metais como Cr e Ni, depositados no sul do Estado. A localização das anomalias, juntamente com a aplicação de índices ambientais unielementares e multielementares, como GCM e IREP, permitiu identificar áreas que, no futuro, podem se tornar alvos de campanhas de amostragem

focadas, possibilitando estudos comparativos e a observação de como as tendências no uso e cobertura do solo podem estar afetando os registros nos sedimentos.

É necessário considerar estudos futuros nas bacias onde foram encontradas concentrações de As, Cd e Hg que superaram estudos semelhantes, já que, embora possam estar relacionadas com rochas ultramáficas, existe uma tendência de acumulação na bacia transfronteiriça do rio Jufari, no Sudoeste do Estado. Espera-se que, novos estudos acompanhem as áreas críticas delimitadas nos mapas unielementares e sejam comparados com os limiares mMAD, para aproveitar uma das vantagens do mapeamento geoquímico em escalas multitemporais. É essencial desenvolver índices ambientais que reconheçam a variabilidade elementar apresentada pelos ecossistemas da Amazônia, uma vez que sua ampla diversidade não se restringe apenas à flora e fauna, mas também aos seus recursos naturais.

REFERÊNCIAS

- Abraham G.M.S. 2005. *Holocene sediments of Tamaki estuary: characterisation and impact of recent human activity on an urban estuary in Auckland, New Zealand*. PhD Thesis, University of Auckland. <http://hdl.handle.net/2292/1419>.
- Adiotomre E. 2014. Enhancing stream sediment geochemical anomalies using spatial imaging: case study from dagbala and its environs. *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics*, **2**(2): 85–96. <https://doi.org/10.9790/0990-02228596>.
- Aduwo A.I. & Adeniyi I.F. 2018. The heavy metals/trace elements contents of sediments from Owalla reservoir, Osun State, Southwest Nigeria. *Advances in Oceanography and Limnology*, **9**(2). <https://doi.org/10.4081/aiol.2018.7576>.
- Afzal P., Khakzad A., Moarefvand P., Omran N.R., Esfandiari B., Alghalandis Y.F. 2010. Geochemical anomaly separation by multifractal modeling in Kahang (Gor Gor) porphyry system, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, **104**(1–2): 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2009.11.003>
- Ahn J. S., Youm S.J., Cho Y.C., Yim G.J., Ji S.W. 2022. Establishment of geochemical thresholds for vanadium throughout Korea and at potential development sites using geochemical map data. *Environmental Geochemistry and Health*, **44**(11): 4111–4128. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01159-8>
- Albanese S., Vivo B. de, Lima A., Cicchella D. 2007. Geochemical background and baseline values of toxic elements in stream sediments of Campania region (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, **93**(1): 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2006.07.006>
- Albert J.S., Val P., Hoorn C. 2018. The changing course of the Amazon River in the Neogene: center stage for Neotropical diversification. *Neotropical Ichthyology*, **16**(3): e180033. <https://doi.org/10.1590/1982-0224-20180033>
- Albuquerque J. de A.A. de, Oliva L.S. de C., Alves J.M.A., Uchôa S.C.P., Melo D. A. de. 2015. Cultivation of cassava and cowpea in intercropping systems held in Roraima's savannah, Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, **46**(2): 388–395. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20150018>
- Aldila H., Indriawati A., Putro P.A. 2024. Purification and Characterization of Monazite from Bangka using Mechanical-Magnetic Separation Method. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, **10**(5): 2745–2751. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i5.6644>
- Aldis M. & Aherne J. 2021. Exploratory Analysis of Geochemical Data and Inference of Soil Minerals at Sites Across Canada. *Mathematical Geosciences*, **53**(6): 1201–1221. <https://doi.org/10.1007/s11004-020-09912-y>
- Aleksander-Kwaterczak U., Kostka A., Leśniak A. 2021. Multiparameter assessment of select metal distribution in lacustrine sediments. *Journal of Soils and Sediments*, **21**(1): 512–529. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02732-x>
- Ali M., Hossain D., Al-Imran Suzan Khan M., Begum M., Osman M. Hasan. 2021. Environmental pollution with heavy metals: a public health concern. *Heavy Metals - Their Environmental Impacts and Mitigation*. IntechOpen, **1**. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96805>
- Alkmim F.F. 2015. Geological Background: a tectonic panorama of Brazil. *World*

Geomorphological Landscapes ((WGLC)) **1**(1): 9–17. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0_2

Allaway W.H. 1968. Agronomic Controls Over the Environmental Cycling of Trace Elements, *Advances in Agronomy*, **20**: 235–274. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60858-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60858-5)

Almeida M.E. & Macambira M.J.B. 2007. Geology and petrography of paleoproterozoic granitoid rocks from Uatumã- Anauá Domain, central region of Guyana Shield, southeastern Roraima, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**(2): 237–256. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2007373237256>

Almeida M.E., Macambira M.J.B., Oliveira E. C. 2007. Geochemistry and zircon geochronology of the I-type high-K calc-alkaline and S-type granitoid rocks from southeastern Roraima, Brazil: Orosirian collisional magmatism evidence (1.97–1.96Ga) in central portion of Guyana Shield. *Precambrian Research*, **155**(1–2): 69–97. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.01.004>

Almeida M.E., Macambira M.J.B., Valente S. de C. 2008. New geological and single-zircon Pb evaporation data from the Central Guyana Domain, southeastern Roraima, Brazil: Tectonic implications for the central region of the Guyana Shield. *Journal of South American Earth Sciences*, **26**(3): 318–328. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2008.08.003>

Alozie N., Heaney N., Lin C. 2018. Biochar immobilizes soil-borne arsenic but not cationic metals in the presence of low-molecular-weight organic acids. *Science of The Total Environment*, **630**: 1188–1194. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.319>

Alvares C.A., Stape J.L., Sentelhas P.C., Gonçalves J. L.de M., Sparovek G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, **22**(6): 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Ambrosino, M., Palarea-Albaladejo, J., Albanese, S., Cicchella, D. 2024. Mapping geochemical domains using stream sediment geochemistry: An approach based on compositional indicators in the Volturno River basin (South Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, **265**: 107545. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107545>

Appleton J.D., Rawlins B.G., Thornton I. 2008. National-scale estimation of potentially harmful element ambient background concentrations in topsoil using parent material classified soil:stream–sediment relationships. *Applied Geochemistry*, **23**(9): 2596–2611. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.05.010>

Araújo M. A., Rocha A.E., Miranda I., Barbosa R. 2017. Hydro-edaphic conditions defining richness and species composition in savanna areas of the northern Brazilian Amazonia. *Biodiversity Data Journal*, **5**: e13826. <https://doi.org/10.3897/BDJ.5.e13829>

Araújo T. M., Silva K. da, Pereira G. M. D., Curcino A., Stürmer S. L., Gomide P. H. O. 2019. Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Agroforestry, Conventional Plantations and Native Forests in Roraima State, Northern Brazil. *Journal of Agricultural Science*, **11**(14): 282. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n14p282>

Araujo W.F., Monteiro Neto, J.L., Sander C., Albuquerque J. de A.A., Viana T.V. de A., Valero M.A.M. 2024. Atualização da classificação climática de Boa Vista, Roraima, Brasil. *Pesquisas Agrárias e Ambientais*, **12**(2): 236–240. <https://doi.org/10.31413/nativa.v12i2.16202>

- Arruda-Barbosa L. de, Sales A.F.G., Torres M. E. M. 2020. Impacto da migração venezuelana na rotina de um hospital de referência em Roraima, Brasil. *Interface - Comunicação, Saúde, Educação*, **24**: e190807. <https://doi.org/10.1590/interface.190807>
- Arslan Kaya T.N., Sarı E., Gül M., Özen Ç. 2024. Health risk assessment in sediment cores: A preliminary study in Erdek and Bandırma Bays, Türkiye. *Regional Studies in Marine Science*, **75**: 103571. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103571>
- Augustsson C., Willner A.P., Rüsing T., Niemeyer H., Gerdes A., Adams C. J., Miller H. 2016. The crustal evolution of South America from a zircon Hf-isotope perspective. *Terra Nova*, **28**(2): 128–137. <https://doi.org/10.1111/ter.12200>
- Austin B. J. & Strauss E. A. 2011. Nitrification and denitrification response to varying periods of desiccation and inundation in a western Kansas stream. *Hydrobiologia*, **658**(1): 183–195. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0462-x>
- Bai Y., Su B.-X., Xiao Y., Chen C., Cui M.-M., He X.-Q., Qin L.-P., Charlier B. 2019. Diffusion-driven chromium isotope fractionation in ultramafic cumulate minerals: Elemental and isotopic evidence from the Stillwater Complex. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **263**: 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.07.052>
- Balaram V. 2021. Strategies to overcome interferences in elemental and isotopic geochemical analysis by quadrupole inductively coupled plasma mass spectrometry: A critical evaluation of the recent developments. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **35**(10): e9065 <https://doi.org/10.1002/rcm.9065>
- Ballesteros-Camaro C. A. & Ríos-Guerrero J. 2019. Química mineral de biotitas en neises de la Suite Metamórfica Rio Urubú aflorantes en la Serra Repartimento, Dominio Guiana Central en el Cratón Amazónico, Brasil: implicaciones petrogenéticas. *Boletín de Geología*, **41**(1): 97–116. <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n1-2019005>
- Bambi A. C.J.M., Costanzo A., Gonçalves A.O., Melgarejo J.C. 2012. Tracing the chemical evolution of primary pyrochlore from plutonic to volcanic carbonatites: the role of fluorine. *Mineralogical Magazine*, **76**(2): 377–392. <https://doi.org/10.1180/minmag.2012.076.2.07>
- Bamuwanye M., Ogwok P., Tumuhairwe V., Eragu R., Nakisozi H., Ogwang P.E. 2017. Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Kampala (Uganda) Drinking Water. *Journal of Food Research*, **6**(4): 6. <https://doi.org/10.5539/jfr.v6n4p6>
- Barbosa R. I. & Fearnside P.M. 2005. Fire frequency and area burned in the Roraima savannas of Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, **204**(2–3): 371–384. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.09.011>
- Barbosa R.I. & Fearnside P.M. 1999. Incêndios na Amazônia Brasileira: estimativa da emissão de gases do efeito estufa pela queima de diferentes ecossistemas de Roraima na passagem do evento “El Nino” (1997/98). *Acta Amazonica*, **29**(4): 513–534. <https://doi.org/10.1590/1809-43921999294534>
- Barbosa R.I., Ramirez Narvaez P.N., Fearnside P.M., Villacorta C.D.A., Carvalho L.C. da S. 2019. Allometric models to estimate tree height in northern Amazonian ecotone forests. *Acta Amazonica*, **49**(2): 81–90. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201801642>
- Barbosa R. I., Souza C. C. de, Pinto F. dos S., Fearnside P. M. 2007. The Lavrados of Roraima: Biodiversity and Conservation of Brazil’s Amazonian Savannas. *Functional Ecosystems & Communities*, **1**(1): 30–42. Disponível em:

[http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/0706/FEC_1\(1\)/FEC_1\(1\)29-41o.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/0706/FEC_1(1)/FEC_1(1)29-41o.pdf)

Barni P.E., Barbosa R.I., Xaud H.A.M., Xaud M.R., Fearnside P.M. 2020. Precipitação no extremo norte da Amazônia: distribuição espacial no estado de Roraima, Brasil. *Sociedade & Natureza*, **32**: 439–456. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-52769>

Barni P.E., Fearnside P.M., Graça P.M.L. de A. 2012. Desmatamento no sul do estado de Roraima: padrões de distribuição em função de projetos de assentamento do INCRA e da distância das principais rodovias (BR-174 e BR-210). *Acta Amazonica*, **42**(2): 195–204. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000200003>

Barreto C.J.S., Lafon J.M., Costa L.T. da R., Lima E. F. 2013. Vulcanismo félsico paleoproterozoico do Grupo Iricoumé, Domínio Erepecuru-Trombetas, Província Amazônia Central: dados de campo, caracterização petrográfica e geocronologia Pb-Pb em zircão. *Geologia USP. Série Científica*, **13**(1): 47–72. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2013000100004>

Bassoo R. & Befus K. S. 2021. Composition of the Sub-Cratonic Mantle of the Guiana Shield Inferred From Diamond-Hosted Inclusions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **22**(6): e2021GC009841. <https://doi.org/10.1029/2021GC009841>

Bat L., Şahin F., Öztekin A., Özsandıkçı U., Özkan E. Y. 2024. Comprehensive risk assessment of metals in surface sediments of the Southern Black Sea coastal and transition waters. *Regional Studies in Marine Science*, **75**: 103561. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103561>

Benedetti U. G., Vale Júnior J. F. do, Schaefer C. E. G. R., Melo V. F., Uchôa S. C. P. 2011. Gênese, química e mineralogia de solos derivados de sedimentos pliopleistocênicos e de rochas vulcânicas básicas em Roraima, Norte Amazônico. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, **35**(2): 299–312. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200002>

Benevides Filho P. R. R., Blaskowski A. E., Ramos M. N., Lessa L. G. F., Zamunér Filho A. N., Abreu-Junior C. H., Jani A. D., Capra G. F., Nogueira T. A. R. 2023. Potential Soil Remineralizers from Silicate Rock Powders (SRP) as Alternative Sources of Nutrients for Agricultural Production (Amazon Region). *Minerals*, **13**(10): 1255. <https://doi.org/10.3390/min13101255>

Beserra Neta L.C. & Tavares Júnior S.S. 2020. *Relatório executivo de geomorfologia para o zoneamento ecológico econômico do Estado de Roraima (ZEE-RR)*. Disponível em: <https://zee-rr.institutopiatam.org.br/wp-content/uploads/2022/03/Geomorfologia.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2023.

Bereş I., Maftai A. E., Dill H. G., Buzatu A., Damian G. 2024. Contamination Assessment of Toxic Elements in River Sediments from Baia Mare, Romania—Extreme Pollution from Mining Activities. *Minerals*, **14**(2): 135. <https://doi.org/10.3390/min14020135>

Beyer H. 1981. Tukey, John W. Exploratory data analysis. Addison-Wesley Publishing Company Reading, Mass. — Menlo Park, Cal., London, Amsterdam, Don Mills, Ontario, Sydney 1977, XVI, 688 S. *Biometrical Journal*, **23**(4): 413–414. <https://doi.org/10.1002/bimj.4710230408>.

Beyer S.R., Hiatt E.E., Kyser K., Drever G.L., Marlatt J. 2015. Stratigraphy, diagenesis and geological evolution of the Paleoproterozoic Roraima Basin, Guyana: Links to tectonic events on the Amazon Craton and assessment for uranium mineralization potential. *Precambrian*

Research, **267**: 227–249. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.06.017>.

Bhattacharjee J., Ghosh K.K., Bhattacharya B. 2018. Petrography and geochemistry of sandstone–mudstone from Barakar Formation (early Permian), Raniganj Basin, India: Implications for provenance, weathering and marine depositional conditions during Lower Gondwana sedimentation. *Geological Journal*, **53**(3): 1102–1122. <https://doi.org/10.1002/gj.2946>.

Bhattacharya S., Sharma S., Agrawal V., Dix M. C., Zaroni G., Birdwell J. E., Wylie A.S., Wagner T. 2024. Influence of organic matter thermal maturity on rare earth element distribution: a study of middle devonian black shales from the appalachian basin, USA. *Energies*, **17**(9): 2107. <https://doi.org/10.3390/en17092107>.

Birke M., Rauch U., Stummeyer J. 2015. How robust are geochemical patterns? A comparison of low and high sample density geochemical mapping in Germany. *Journal of Geochemical Exploration*, **154**: 105–128. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.12.005>.

Blair T. C. & McPherson J. G. 1999. Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, **69**(1): 6–19. <https://doi.org/10.2110/jsr.69.6>.

Blank Chaves G., Malta Feitoza L., Farias E. E., Coimbra dos Santos C. I., Farias Rocha S. 2020. Caracterização física e aplicação da Espectroscopia de Emissão Óptica com Plasma Induzido por Laser (LIBS) para a determinação de contaminantes provenientes do depósito tecnogênico do bairro São Bento, Boa Vista – RR. *Acta Geográfica*, **14**(34): 182–200. <https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v14i34.6067>.

Brabosa M. de O. V. & Buenafuente S. M. F. 2019. Setor madeireiro: uma análise de sua contribuição à balança comercial e à economia de Roraima. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, **10**(5): 22–36. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.005.0003>.

Breward N., Kemp S.J., Ambrose K., Powell J.H., Morigi A., Wagner D. 2015. Anomalous enrichment of molybdenum and associated metals in Lower Jurassic (Lias Group) black shales of central England, as revealed by systematic geochemical surveys. *Proceedings of the Geologists' Association*, **126**(3): 346–366. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2015.03.007>.

Briffa J., Sinagra E., Blundell R. 2020. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, **6**(9): e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>.

Bucholz C.E. & Spencer C.J. 2019. Strongly peraluminous granites across the Archean–Proterozoic Transition. *Journal of Petrology*, **60**(7): 1299–1348. <https://doi.org/10.1093/petrology/egz033>

Burdon F.J., McIntosh A.R., Harding J.S. 2013. Habitat loss drives threshold response of benthic invertebrate communities to deposited sediment in agricultural streams. *Ecological Applications*, **23**(5): 1036–1047. <https://doi.org/10.1890/12-1190.1>

Burns E.E., Csiszar S.A., Roush K.S., Davies I.A. 2021. National scale down-the-drain environmental risk assessment of oxybenzone in the United States. *Integrated Environmental Assessment and Management*, **17**(5): 951–960. <https://doi.org/10.1002/ieam.4430>

Buzatti R.S. de O., Pfeilsticker T. R., de Magalhães, R.F., Bueno, M.L., Lemos-Filho, J.P., Lovato, M.B. 2018. Genetic and Historical Colonization Analyses of an Endemic Savanna Tree, *Qualea grandiflora*, Reveal Ancient Connections Between Amazonian Savannas and

Cerrado Core. *Frontiers in Plant Science*, **9**: 1-16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00981>

Caitano T.B. dos S., Ribeiro M.M., Morales G.P., Pontes A.N. 2021. Um panorama das receitas de direitos de mineração na amazônia brasileira e reflexões sobre indicadores socioeconômicos. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, **17**(1): 1-11. <https://doi.org/10.54399/rbgdr.v17i1.6168>

Cannon H., Connally G., Epstein J., Parker J., Thornton I., Wixson G. 1978. Rocks: geological sources of most trace elements. *Geochem Environ*, **3**: 17–31. Report to the workshop at south seas plantation, Captiva Island, FL, US. *Geochem. Environ.* In Overview and regional and temporal differences of heavy metals in Arctic whales and ringed seals in the Canadian Arctic. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(96\)05085-1](https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05085-1)

Caritat P. & 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. <https://doi.org/10.1144/geochem2014-322>.

Carvalho T.M. de. 2015. Sistemas e ambientes denudacionais e agradacionais, uma primeira aproximação para o estado de Roraima, norte da Amazônia. *Acta Geográfica*, **8**(16): 77–98. <https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v8i16.2452>

Carvalho T.M. & Carvalho C.M. 2012. Interrelation of geomorphology and fauna of Lavrado region in Roraima, Brazil – suggestions for future studies. *E&G Quaternary Science Journal*, **61**(2): 146–155. <https://doi.org/10.3285/eg.61.2.03>

Carvalho T.M., Carvalho C.M., Morais R.P. 2016. Fisiografia da paisagem e aspectos biogeomorfológicos do lavrado, Roraima, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, **17**(1): 1-15. <https://doi.org/10.20502/rbg.v17i1.669>

Carvalho W.D., Meyer C.F.J., Xavier B. da S., Mustin K., Castro I.J. de, Silvestre S.M., Pathek D.B., Capaverde U.D., Hilário R., Toledo J.J. de. 2020. Consequences of Replacing Native Savannahs With Acacia Plantations for the Taxonomic, Functional, and Phylogenetic α - and β -Diversity of Bats in the Northern Brazilian Amazon. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **8**: 1-12. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.609214>

Castro G.S.A., Magalhães L.A., Fonseca M.F., Homma A.K.O., Miranda E.E. de. 2018. Inteligência territorial para o desenvolvimento agropecuário de Roraima. *Pesquisa Brasileira em ciência da informação e Biblioteconomia*, **13**(1): 76-95. <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-0695.2018v13n1.39269>

Cembranel A.S., Sampaio S.C., Remor M.B., Gotardo J.T., Rosa P.M.D. 2017. Geochemical background in an oxisol. *Engenharia Agrícola*, **37**(3): 565–573. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n3p565-573/2017>

Chaves A.D.O. & Fonseca W.M. 2017. Províncias Ígneas Gigantes e o reposicionamento dos proto-crátons sul-americanos em Columbia, na transição Orosiriano-Estateriano. *Boletim Do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais*, **11**(2): 263–280. <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v11i2.432>

Chelle-Michou C., Rottier B., Caricchi L., Simpson G. 2017. Tempo of magma degassing and the genesis of porphyry copper deposits. *Scientific Reports*, **7**(1): 40566. <https://doi.org/10.1038/srep40566>

Chen H., Wu W., Cao L., Zhou X., Guo R., Nie L., Shang W. 2022. Source Analysis and

Contamination Assessment of Potentially Toxic Element in Soil of Small Watershed in Mountainous Area of Southern Henan, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**(20): 13324. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013324>

Chen H., Xu Z., Lim D., Clift P. D., Chang F., Li T., Cai M., Wang W., Yu Z., Sun R. 2020. Geochemical Records of the Provenance and Silicate Weathering/Erosion From the Eastern Arabian Sea and Their Responses to the Indian Summer Monsoon Since the Mid-Pleistocene. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, **35**(4): 1-18. <https://doi.org/10.1029/2019PA003732>

Chen L., Guan Q., Feng B., Yue H., Wang J., Zhang, F. 2019. A Multi-Convolutional Autoencoder Approach to Multivariate Geochemical Anomaly Recognition. *Minerals*, **9**(5): 270. <https://doi.org/10.3390/min9050270>

Chris D. I. & Anyanwu B. O. 2022. Pollution and potential ecological risk evaluation associated with toxic metals in an impacted mangrove swamp in Niger Delta, Nigeria. *Toxics*, **11**(1): 6. <https://doi.org/10.3390/toxics11010006>

Ciardelli C., Assumpção M., Bozdağ E., van der Lee S. 2022. Adjoint Waveform Tomography of South America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **127**(2): 1-36. <https://doi.org/10.1029/2021JB022575>

Cicchella D., Ambrosino M., Gramazio A., Coraggio F., Musto M.A., Caputi A., Avagliano D., Albanese S. 2022. Using multivariate compositional data analysis (CoDA) and clustering to establish geochemical backgrounds in stream sediments of an onshore oil deposits area. The Agri River basin (Italy) case study. *Journal of Geochemical Exploration*, **238**: 107012. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107012>

Cierner C., Winkelmann R., Kurths J., Boers N. 2021. Impact of an AMOC weakening on the stability of the southern Amazon rainforest. *The European Physical Journal Special Topics*, **230**(14–15): 3065–3073. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-021-00186-x>

Coe M. T., Costa M. H., Botta A., Birkett C. 2002. Long-term simulations of discharge and floods in the Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **107**(D20): 1-17. <https://doi.org/10.1029/2001JD000740>

Condé T., Higuchi N., Lima J. N.A. 2019. Illegal Selective Logging and Forest Fires in the Northern Brazilian Amazon. *Forests*, **10**(1): 61. <https://doi.org/10.3390/f10010061>

Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. 2012. *Resolução Conama N° 454*, de 1º de Novembro de 2012. ICMBIO. Retificada pelo Dou 10/01/2013 – Seção 1, p. 61.

Copat C., Bella F., Castaing M., Fallico R., Sciacca S., Ferrante M. 2012. Heavy Metals Concentrations in Fish from Sicily (Mediterranean Sea) and Evaluation of Possible Health Risks to Consumers. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **88**(1): 78–83. <https://doi.org/10.1007/s00128-011-0433-6>

Cordani U.G., Fraga L.M., Reis N., Tassinari C.C.G., Brito-Neves B.B. 2010. On the origin and tectonic significance of the intra-plate events of Grenvillian-type age in South America: A discussion. *Journal of South American Earth Sciences*, **29**(1): 143–159. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.002>

Cordani U. G., Ramos V. A., Fraga L. M., Cegarra M., Delgado I., Souza K. G., Gomes F. E., Schobbenhaus C. 2016. Tectonic Map of South America. *Commission de la carte géologique du monde / commission for the geological map of the world*, **2**: 2–16.

- Cordani U. G., Sato K., Sproessner W., Fernandes F. S. 2016. U-Pb zircon ages of rocks from the Amazonas Territory of Colombia and their bearing on the tectonic history of the NW sector of the Amazonian Craton. *Brazilian Journal of Geology*, **46**(1): 5–35. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150012>
- Cordani U.G. & Teixeira W. 2007. Proterozoic accretionary belts in the Amazonian Craton. *Framework of Continental Crust: Geological Society of America Memoir 200*. (pp. 297–320). [https://doi.org/10.1130/2007.1200\(14\)](https://doi.org/10.1130/2007.1200(14))
- Correa-Burrows J. P., Navarrete-Calvo Á., Valenzuela-Díaz M. J., Zapata-Aguiló V. A., Montserrat S., Navarro-Valdivia L., McPhee J., Caraballo M. A. 2021. The role of local geochemical and mineralogical backgrounds as essential information to build efficient sediment quality guidelines at high-mountainous hydrothermally-altered basins (Mapocho basin, Chile). *Science of The Total Environment*, **785**: 147266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147266>
- Costi H.T., Dall’agnol R., Moura C.A.V. 2000. Geology and Pb-Pb Geochronology of Paleoproterozoic Volcanic and Granitic Rocks of Pitinga Province, Amazonian Craton, Northern Brazil. *International Geology Review*, **42**(9): 832–849. <https://doi.org/10.1080/00206810009465114>
- Cotta A.J.B. & Enzweiler J. 2012. Classical and new procedures of whole rock dissolution for trace element determination by ICP-MS. *Geostandards and Geoanalytical Research*, **36**(1): 27–50. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2011.00115.x>
- Crivelli B.R. de S., Gomes J.P., Morais W.W.C., Condé T.M., Santos R.deL., Bonfim Filho O. S. 2017. Caracterização do setor madeireiro de Rorainópolis, sul de Roraima. *Revista Ciência da Madeira - RCM*, **8**(3): 142–150. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n3p142-150>
- Cruz A.B.deS., Rocha P.R.R., Albuquerque J.A.A., Alves J.M.A., Cruz D.L. de S., Finoto E. L., Santos G.X.L. dos. 2018. Seletividade de herbicidas aplicados em pré e pós-emergência na cultura do feijão-caupi na savana Amazônica. *Nativa*, **6**(6): 625–630. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i6.5732>
- Cruz D.L.de S., Vale Júnior J.F.do, Cruz P.L.de S., Cruz A.B.de S., Nascimento P.P.R.R. 2014. Atributos físico-hídricos de um Argissolo amarelo sob floresta e savana naturais convertidas para pastagem em Roraima. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, **38**(1): 307–314. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100031>
- Cunha L.D., Carvalho T.M.de, Silva E.V.da. 2016. Caracterização dos aspectos fisiográficos do parque nacional do Viruá – RR. *Revista Equador*, **5**(4): 235–249. <https://doi.org/10.26694/equador.v5i4.5206>
- D’Agrella Filho M.S., Rapalini A.E., Trindade R.I.F. 2022. Paleomagnetism of the Main South American Precambrian Cratons. *Brazilian Journal of Geophysics*, **40**(6): 77-114. <https://doi.org/10.22564/brjg.v40i6.2204>
- Damak F., Asano M., Baba K., Ksibi M., Tamura K. 2019. Comparison of Sample Preparation Methods for Multielements Analysis of Olive Oil by ICP-MS. *Methods and Protocols*, **2**(3): 72. <https://doi.org/10.3390/mps2030072>
- D’Antonio M. & Arienzo I. 2022. Editorial for the Special Issue “Minerals of Alkaline Igneous Rocks: Chemical and Isotopic Features as Tracers of Magmatic Processes.” *Minerals*, **13**(1): 7. <https://doi.org/10.3390/min13010007>

- Demarchi L.O., Struwe L., Ferreira M. J., Schöngart J., Wittmann F., Piedade M.T.F. 2023. New records and range extension of a Brazilian Amazon white-sand endemic species: *Roraimaea aurantiaca* Struwe, S.Nilsson & V.A.Albert (Gentianaceae). *Check List*, **19**(4): 573–580. <https://doi.org/10.15560/19.4.573>
- Demetriades 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**(2): 136–179. <https://doi.org/10.21715/GB2358-2812.2018322136>
- Derycke A., Gautheron C., Barbarand J., Bourbon P., Aertgeerts G., Simon-Labric T., Sarda Pinna-Jamme R., Boukari C., Haurine F. 2021. French Guiana margin evolution: from Gondwana break-up to Atlantic opening. *Terra Nova*, **33**(4): 415–422. <https://doi.org/10.1111/ter.12526>
- Devanesan E., Suresh Gandhi M., Selvapandiyan M., Senthilkumar G., Ravisankar R. 2017. Heavy metal and potential ecological risk assessment in sediments collected from Poombuhar to Karaikal Coast of Tamilnadu using Energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) technique. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, **6**(3): 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2017.04.011>
- Doherty M.E., Arndt K., Chang Z., Kelley K., Lavin O. 2023. Stream sediment geochemistry in mineral exploration: a review of fine-fraction, clay-fraction, bulk leach gold, heavy mineral concentrate and indicator mineral chemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **23**(4): 3–35. <https://doi.org/10.1144/geochem2022-039>
- Dominech S., Yang S., Aruta A., Gramazio A., Albanese S. 2022. Multivariate analysis of dilution-corrected residuals to improve the interpretation of geochemical anomalies and determine their potential sources: The Mingardo River case study (Southern Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, **232**: 106890. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106890>
- Dórea J. G., Barbosa A. C., Ferrari Í., Souza J. R.de. 2005. Fish consumption (Hair Mercury) and nutritional status of Amazonian Amer-Indian Children. *American Journal of Human Biology*, **17**(4): 507–514. <https://doi.org/10.1002/ajhb.20410>
- Dostal J., Svojtka M., Gerel O., Corney R. 2020. Early Jurassic Rare Metal Granitic Pluton of the Central Asian Orogenic Belt in North-Central Mongolia: Tungsten Mineralization, Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Implications. *Frontiers in Earth Science*, **8**: 1–17. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00242>
- Doucet L.S., Laurent O., Ionov D. A., Mattielli N., Debaille V., Debouge W. 2020. Archean lithospheric differentiation: Insights from Fe and Zn isotopes. *Geological Society of America -Geology*, **48**(10): 1028–1032. <https://doi.org/10.1130/G47647.1>
- Doufexi M., Gamvroula D. E., Alexakis D. E. 2022. Elements Content in Stream Sediment and Wildfire Ash of Suburban Areas in West Attica (Greece). *Water*, **14**(3): 310. <https://doi.org/10.3390/w14030310>
- Duarte E.D.R.S., Melo V.F., Novotny E.H., Uchôa S.C.P., Farias H.L.S., Veloso G.V., Amorim R.J.P., Matias T.M. de L.C., Cabral J.V.deP. 2018. Chemical of Soils With Histic Horizon of Lakes and Riparian of the Savanna, Northern Amazonia, Brazil. *Journal of Agricultural Science*, **11**(1): 159. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n1p159>
- Dung T.T.T., Cappuyns V., Swennen R., Phung N.K. 2013. From geochemical background determination to pollution assessment of heavy metals in sediments and soils. *Reviews in*

Environmental Science and Bio/Technology, **12**(4): 335–353. <https://doi.org/10.1007/s11157-013-9315-1>

Dyachenko V., Turkin V., Matasova I. 2024. Development of ecosystem principles for optimising differentiated land use management. *Bio Web of Conferences*, **103**: 00049. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410300049>

Egozcue J. J., Pawlowsky-Glahn V., Mateu-Figueras G., Barceló-Vidal C. 2003. Isometric Logratio Transformations for Compositional Data Analysis. *Mathematical Geology*, **35**(3): 279–300. <https://doi.org/10.1023/A:1023818214614>

Elias M.S., Azman M.A., Daung J.A.D., Hashim A., Laili Z., Omar S.A., Shukor S. 2022. Assessment of rare earth and actinides (U and Th) elements in soil samples from Kapar industrial area, Selangor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **1231**(1): 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1231/1/012017>

Eliopoulos I.P.D. & Eliopoulos G.D. 2019. Factors Controlling the Gallium Preference in High-Al Chromitites. *Minerals*, **9**(10): 623. <https://doi.org/10.3390/min9100623>

Elomaa H., Seisko S., Junnila T., Sirviö T., Wilson B., Aromaa J., Lundström M. 2017. The Effect of the Redox Potential of Aqua Regia and Temperature on the Au, Cu, and Fe Dissolution from WPCBs. *Recycling*, **2**(3): 14. <https://doi.org/10.3390/recycling2030014>

Ernst R. E. 2007. Mafic-Ultramafic Large Igneous Provinces (LIPs): importance of the Pre-Mesozoic record. *Episodes*, **30**(2): 108–114. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2007/v30i2/005>

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**(6): 1-49. <https://doi.org/10.1029/2023WR034519>

Falcão M. 2022. Geodiversity of the municipality of Uiramutá, Roraima and the potential for geotourism geodiversidade do município do Uiramutã, Roraima e o potencial para o geoturismo. *William Morris Davis - Revista de Geomorfologia*, **3**(1): 1–9. <https://doi.org/10.48025/ISSN2675-6900.v3n1.2022.149>

Falcão M.T. & Costa J.A.V. 2019. Fisiografia da paisagem e suas implicações na geomorfologia da terra indígena Raposa Serra do Sol – Uiramutã/roraima/Brasil (landscape physiology and its implications in the geomorphology of indigenous land Raposa Serra do Sol - Uiramutã/Roraima/Brazil). *Revista GeoNordeste*, **1**: 43–59. <https://doi.org/10.33360/RGN.2318-2695.2019.i1p43-59>

Faria M.S.G., Luzardo R., Oliveira M.J., Haddad R., Reis N.J., Millioti C., Pinheiro S.daS., Riker S.L. 2000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Caracará, Folhas NA.20-Z-B e NA.20-Z-D inteiras e parte das folhas NA.20-Z-A, NA.20-Z-C, NA.21-Y-C e NA.21-Y-A. Estado de Roraima. Escala 1:500.00. SGB, 78–169. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/5308>

Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, **45**(2): <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

Feitosa K.K.A., Vale Júnior J.F.do, Schaefer C.E.G.R., Sousa M.I.L. de, Nascimento P.P.R.R. 2016. Relações solos–vegetação em “ilhas” florestais e savanas adjacentes, no nordeste de

- Roraima. *Ciência Florestal*, **26**(1): 135–146. <https://doi.org/10.5902/1980509821098>
- Fernandes F.R.C., Matos G.M.M. de, Castilhos Z.C., Luz A.B. 2015. Geociências e Tecnologia Mineral. *Geociências e Tecnologia Mineral*, **1**: 380. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/453/1/ten_tecno_brasil.pdf
- Ferreira M.daS., Fontes M.P.F., Bellato C.R., Marques Neto J.de O., Lima H.N., Fendorf S. 2021. Geochemical signatures and natural background values of rare earth elements in soils of Brazilian Amazon. *Environmental Pollution*, **277**: 116743. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116743>
- Ferreira S.L.C., Silva J.B.da, Santos I.F.dos, Oliveira O.M.C.de, Cerda V., Queiroz A.F.S. 2022. Use of pollution indices and ecological risk in the assessment of contamination from chemical elements in soils and sediments – practical aspects. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, **35**: e00169. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2022.e00169>
- Ferreira S.N.D., Teixeira E.C., Silva G.D. 2019. Infraestrutura de transporte rodoviário e crescimento econômico no Brasil. *Revista Baru - Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos*, **5**(2): 251. <https://doi.org/10.18224/baru.v5i2.7570>
- Ferron J.M.T.M., Bastos Neto A.C., Lima E.F., Nardi L.V.S., Costi H.T., Pierosan R., Prado M. 2010. Petrology, geochemistry, and geochronology of Paleoproterozoic volcanic and granitic rocks (1.89–1.88Ga) of the Pitinga Province, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **29**(2): 483–497. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.05.001>
- Figas A., Tomaszewska-Sowa M., Kobierski M., Sawilska A.K., Klimkowska K. 2021. Hazard of Contamination with Heavy Metals in *Thymus serpyllum* L. Herbs from Rural Areas. *Agriculture*, **11**(4): 375. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040375>
- Filippini-Alba J.M. 2022. Geochemical stream sediment signatures from Precambrian terrains of Uruguay. *Geochimica Brasiliensis*, **36**: 1-14. <https://doi.org/10.21715/GB2358-2812.202236004>
- Finger N.P., Kaban M.K., Tesauro M., Haeger C., Mooney W.D., Thomas M. 2021. A Thermo-Compositional Model of the Cratonic Lithosphere of South America. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **22**(4): 1-26. <https://doi.org/10.1029/2020GC009307>
- Fiúza A., Futuro A., Gois J., Dinis M.L., Vila C., Carvalho S., Fernandes A. 2023. The Legacy of Potential Environmental Soil Contamination in an Antimony Mining Heritage Area. *Minerals*, **13**(2): 1-19. <https://doi.org/10.3390/min13020257>
- Flament N., Gurnis M., Müller R. D., Bower D. J., Husson L. 2015. Influence of subduction history on South American topography. *Earth and Planetary Science Letters*, **430**: 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.08.006>
- Fleischmann A. S., Paiva R.C.D., Collischonn W., Siqueira V.A., Paris A., Moreira D.M., Papa F., Bitar A.A., Parrens M., Aires F., Garambois P. A. 2020. Trade-Offs Between 1-D and 2-D Regional River Hydrodynamic Models. *Water Resources Research*, **56**(8): 1-30. <https://doi.org/10.1029/2019WR026812>
- Flores B.M., Holmgren M., Xu C., Van Nes E.H., Jakovac C.C., Mesquita R.C.G., Scheffer M. 2017. Floodplains as an Achilles' heel of Amazonian forest resilience. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **114**(17): 4442–4446. <https://doi.org/10.1073/pnas.1617988114>

- Fonseca A., Nachtergaele S., Bonilla A., Dewaele S., De Grave J. 2024. Extensional exhumation of cratons: insights from the Early Cretaceous Rio Negro–Juruena belt (Amazonian Craton, Colombia). *Solid Earth*, **15**(2): 329–352. <https://doi.org/10.5194/se-15-329-2024>
- Fonseca M.G., Anderson L.O., Arai E., Shimabukuro Y.E., Xaud H.A.M., Xaud M.R., Madani N., Wagner F.H., Aragão L.E.O.C. 2017. Climatic and anthropogenic drivers of northern Amazon fires during the 2015–2016 El Niño event. *Ecological Applications*, **27**(8): 2514–2527. <https://doi.org/10.1002/eap.1628>
- Fordyce F., Plant J., Klaver G., Locutura J., Salminen R., Vrana K. 2020. Geochemical Mapping in Europe. *Geochemistry*, **1**: 111–125. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003079576-11>
- Fraga L.M., Cordani U., Maria Dreher A., Sato K., Joaquim Reis N., Nadeau S., De Roeever E., Kroonenberg S., Camara Maurer V. 2024. Early Orosirian belts of the central Guiana Shield, northern Amazonian Craton: U-Pb geochronology and tectonic implications. *Precambrian Research*, **407**: 107362. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2024.107362>
- Fraga L.M.B., Dall’Agnol R., Costa J.B.S., Macambira M.J.B. 2009a. The Mesoproterozoic Mucajai Anorthosite - Mangerite - Rapakivi Granite complex, Amazonian craton, Brazil. *The Canadian Mineralogist*, **47**(6): 1469–1492. <https://doi.org/10.3749/canmin.47.6.1469>
- Fraga L.M.B., Dreher A.M., Reis N.J., Betiollo L.M., Scandolaro J.E. 2017. Geologia e recursos minerais da Folha Ilha De Maracá-NA.20-X-A Escala: 1:250.000 2017 Força Aérea Brasileira Cartografia da Amazônia Levantamentos Geológicos Básicos Projeto Ilha de Maracá, **1**: 1-95. Disponível em: <https://doi.org/https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/21205>
- Fraga L.M., Haddad R.C., Reis, N.J. 1996. Geoquímica das rochas granitóides da suíte intrusiva pedra pintada: norte do estado de Roraima. *Boletim IG-USP. Publicação Especial*, **18**: 1-3. <https://doi.org/10.11606/issn.2317-8078.v0i18p37-39>
- Fraga L.M., Macambira M.J.B., Dall’Agnol R., Costa J.B.S. 2009b. 1.94–1.93 Ga charnockitic magmatism from the central part of the Guyana Shield, Roraima, Brazil: Single-zircon evaporation data and tectonic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, **27**(4): 247–257. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.02.007>
- Franqui N.O., Choi S.H., Lee D.C. 2017. Peridotites and basaltic rocks within an ophiolitic mélange from the SW igneous province of Puerto Rico: relation to the evolution of the Caribbean Plate. *Geological Magazine*, **154**(1): 96–118. <https://doi.org/10.1017/S001675681500093X>
- Freitas A.F. & Marmos J.L. 2017. Atlas geoquímico do estado de Roraima: projeto levantamento geoquímico de baixa densidade do estado de Roraima. In *SGB - RIGeo* (Vol. 1). CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/19822>
- Ferreira Neto G.deS., Baccaro F.B., Quesada C.A.N., Figueiredo A.S., Oliveira R., Gomes E., Spironello W.R., Barnett A.P.A. 2021. Soil fertility of fluvial islands increases with proximity to an Amazonian white-water river. *Sedimental Journey - Wetland Soils*, **41**(8): 21. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-340662/v1>
- Gama Neto J.deL., Baima J.M., Freitas R.A. de, Passos M.A.B. 2012. Fauna flebotomínica (Diptera: Psychodidae) em floresta preservada e alterada do município de Caroebe, Estado de Roraima, Brasil. *Revista Pan-Amazônica de Saúde*, **3**(2): 41–46.

<https://doi.org/10.5123/S2176-62232012000200006>

Galán E., Fernández-Caliani J. C., González I., Aparicio P., Romero A. 2008. Influence of geological setting on geochemical baselines of trace elements in soils. Application to soils of South–West Spain. *Journal of Geochemical Exploration*, **98**(3): 89–106. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.01.001>

Galindo-Manrique A., Lambretón-Torres V., Rodríguez-García M. 2019. Estimación de niveles óptimos de cobertura para portafolios de inversión estáticos, dinámicos y con varianza condicional. Evidencia en países emergentes. *Vinculatégica EFAN*, **5**(1): 43–59. <https://doi.org/10.29105/vtga5.1-776>

Gałaszka A. & Migaszewski Z. 2011. Geochemical background - an environmental perspective. *Polskie Towarzystwo Mineralogiczne-Mineralogia*, **42**(1): 7–17. <https://doi.org/10.2478/v10002-011-0002-y>

Gao M., Xiong X., Huang F., Wang J., Wei C. 2023. Key Factors Controlling Biotite–Silicate Melt Nb and Ta Partitioning: Implications for Nb–Ta Enrichment and Fractionation in Granites. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **128**(7): 24. <https://doi.org/10.1029/2022JB025889>

Garate-Olave I., Roda-Robles E., Gil-Crespo P.P., Pesquera A., Errandonea-Martin J. 2020. The Tres Arroyos Granitic Aplite-Pegmatite Field (Central Iberian Zone, Spain): Petrogenetic Constraints from Evolution of Nb-Ta-Sn Oxides, Whole-Rock Geochemistry and U-Pb Geochronology. *Minerals*, **10**(11): 1008. <https://doi.org/10.3390/min10111008>

Garçon M. & Chauvel C. 2014. Where is basalt in river sediments, and why does it matter? *Earth and Planetary Science Letters*, **407**: 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.09.033>

Garrett R. G. 2019. Why Minus 80 Mesh?. *Association of Applied Geochemists Explore Newsletter*, **185**, 1–10. <https://doi.org/10.70499/OCQD4307>

Gauthier T.D. 2001. Detecting Trends Using Spearman's Rank Correlation Coefficient. *Environmental Forensics*, **2**(4): 359–362. <https://doi.org/10.1080/713848278>

Gomes M.E.P., Neves L.J.P.F., Coelho F., Carvalho A., Sousa M., Pereira A.J.S.C. 2011. Geochemistry of granites and metasediments of the urban area of Vila Real (northern Portugal) and correlative radon risk. *Environmental Earth Sciences*, **64**(2): 497–502. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0873-z>

Goulart L.E.A., Almeida M.E., Oliveira A.C.daS., Chemale L.T. 2023. Geologia e Avaliação do Potencial para Fosfato e Elementos Terras-Raras da Região de Campos Novos, Roraima. *Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Avaliação Dos Recursos Minerais Do Brasil*, **7**: 11–99. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/24598>

Goullé J.P., Saussereau E., Mahieu L., Guerbet M. 2014. Current Role of ICP–MS in Clinical Toxicology and Forensic Toxicology: A Metallic Profile. *Bioanalysis*, **6**(17): 2245–2259. <https://doi.org/10.4155/bio.14.190>

Guo J., Wu K., Seltmann R., Zhang R., Ling M., Li C., Sun W. 2022. Unraveling the link between mantle upwelling and formation of Sn-bearing granitic rocks in the world-class Dachang tin district, South China. *GSA Bulletin*, **134**(3–4): 1043–1064. <https://doi.org/10.1130/B35492.1>

Gurumurthy G. P. 2024. Geochemical split among the suspended and mud sediments in the Nethravati river: insights to compositional similarity of Peninsular Gneiss and the Deccan

basalt derived sediments, and its implications on tracing the provenance in the Indian Ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **25**(7): 1-17. <https://doi.org/10.1029/2024GC011642>

Gysi A.P., Williams-Jones A.E., Collins P. 2016. Lithogeochemical Vectors for Hydrothermal Processes in the Strange Lake Peralkaline Granitic REE-Zr-Nb Deposit. *Economic Geology*, **111**(5): 1241–1276. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.5.1241>

Habib K., Hamelin L., Wenzel H. 2016. A dynamic perspective of the geopolitical supply risk of metals. *Journal of Cleaner Production*, **133**: 850–858. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.118>

Habibnia A., Rahimipour Gh. R., Ranjbar H. 2021. Introducing Improved Performance of Boxplot (New Method) in Estimating the Threshold (Separating Anomalies from the Background). *Geochemistry International*, **59**(13): 1341–1353. <https://doi.org/10.1134/S00167029211130036>

Hacon S. de S., Oliveira-da-Costa M., Gama C.deS., Ferreira R., Basta P.C., Schramm A., Yokota D. 2020. Mercury Exposure through Fish Consumption in Traditional Communities in the Brazilian Northern Amazon. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**(15): 5269. <https://doi.org/10.3390/ijerph17155269>

Hacon S.S., Mourão D.S., Oliveira B., Silva, G.P., Freitas M.F., Vega C., Gonçalves R., Mariani C.F., Gomes N., Souza A.V., Bastos W. 2013. Intake of predatory fish in Amazonia is a driver of toxicological risk for susceptible exposure groups. *E3S Web of Conferences*, **1**: 41009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20130141009>

Haeruddin H., Supriharyono S., Ghofar A., Rahman A. 2019. The Integrated Quality Analysis of Sediment on BanjirKanal Barat River as the Basis of River Environment Management. *Current World Environment*, **14**(3): 463–475. <https://doi.org/10.12944/CWE.14.3.14>

Hafeezallah A., Al-Dhamari A., Abu-Bakar S.A.R. 2024. Motion segmentation using Ward's hierarchical agglomerative clustering for crowd disaster risk mitigation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **102**: 104262. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104262>

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

Harsha P.V., Nandagopan S., Vineethkumar V., Nath M.R., Nair H.T., Vaishnav Raj K., Krishnan A., Prakash V. 2023. Heavy metal contamination and ecological risk assessment in peruvamaba river, Kannur District, Kerala. *Materials Today: Proceedings*, **12**: 2214-7853 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.096>

Hebeda E.H., Boelrijk N.A.I.M., Priem H.N.A., Verdurmen E.A.T., Verschure R.H. 1973. Excess radiogenic argon in the Precambrian Avanavero Dolerite in western Suriname (South America). *Earth and Planetary Science Letters*, **20**(2): 189–200. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90157-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90157-X)

Hosen J.D., Febria C.M., Crump B.C., Palmer M.A. 2017. Watershed Urbanization Linked to Differences in Stream Bacterial Community Composition. *Frontiers in Microbiology*, **8**(1452): 1-17. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01452>

Hosseini M. & Sajjadi N. 2018. The comparison of selenium and lead accumulation between contaminated muddy and sandy sediments from four estuaries along the Persian Gulf: effect of grain size. *Environmental Geochemistry and Health*, **40**(4): 1645–1656. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0078-z>

- Huang J.H., Huang F., Evans L., Glasauer S. 2015. Vanadium: Global (bio)geochemistry. *Chemical Geology*, **417**: 68–89. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.09.019>
- Huang Z., Lin J., Fang Y. 2010. Effectively Modeling Environmental Pollution by Using the GIS Database. *2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, **1**:1–3. <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2010.5516552>
- Hung K.T., Sang P.N., Phuong N., Linh V.T., Sang B.V. 2020. Statistical evaluation of the geochemical data for prospecting polymetallic mineralization in the Suoi Thau – Sang Than region, Northeast Vietnam. *Geology, Geophysics and Environment*, **46**(4): 285–299. <https://doi.org/10.7494/geol.2020.46.4.285>
- Hung Phu L., Hong Ngoc P., Trong Dung L., Hong Thu N., Van The H., Tuan Linh V.T., Minh Hieu N., Minh Thu P. 2024. Heavy metals assessment for sustainable management in estuaries of Ba Ria - Vung Tau province. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, **24**(1): 17–31. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/18976>
- Ibañez-Mejia M. 2019. *The putumayo orogen of Amazonia: a synthesis*. Chapter 6. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.06>
- Ibañez-Mejia M. & Cordani U. 2019. Zircon U–Pb Geochronology and Hf–Nd–O Isotope Geochemistry of the Paleoproterozoic to Mesoproterozoic Basement in the Westernmost. *The Geology of Colombia*, **1**(4): 65–90. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.04>
- Ibe C. 2020. Geochemical characteristics of precambrian basement rocks from southeastern Nigeria: an approach to their petrogenesis and tectonic setting. *Geologica Acta*, **18**: 1–13. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2020.18.19>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. 2023. *Censo demográfico 2022: população e domicílios – primeiros resultados*. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102011.pdf>
- Inverno C.M.C. & Hutchinson R.W. 2006. Petrochemical discrimination of evolved granitic intrusions associated with Mount Pleasant deposits, New Brunswick, Canada. *Applied Earth Science*, **115**(1): 23–39. <https://doi.org/10.1179/174327506X113037>
- Islam Md.S., Islam, Md.T., Ismail Z., Shahid S., I, A.R.Md.T., Ali M.M., Idris A.M. 2023. Contamination and ecological risk assessment of Cr, As, Cd and Pb in water and sediment of an urban river in a developing country. *Marine Pollution Bulletin*, **197**: 1–14 <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2942911/v1>
- Jacob A.R., Parekh D.P., Dickey M.D., Hsiao L.C. 2019. Interfacial Rheology of Gallium-Based Liquid Metals. *Langmuir*, **35**(36): 11774–11783. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b01821>
- Jacques P.D., Viglio E.P., Pinto D. D’el Rei de O. 2023. Environmental geochemical analysis in the Yanomami indigenous land, Mucajaí river basin, State of Roraima, Brazil. *Toxics*, **11**(10) e861. <https://doi.org/10.3390/toxics11100861>
- Jelecevic A., Sager M., Vollprecht D., Puschenreiter M., Liebhard P. 2021. Partitioning of heavy metals in different particle-size fractions of soils from former mining and smelting locations in Austria. *Eurasian Journal Of Soil Science (EJSS)*, **10**(2): 123–131. <https://doi.org/10.18393/ejss.837139>
- Jia X. & Wang H. 2014. Element geochemical analysis of the contribution of aeolian sand to suspended sediment in desert stream flash floods. *The Scientific World Journal*, **2014**(1): 1–

12. <https://doi.org/10.1155/2014/620610>

Jidere C., Ene J., Inem U., Uzoh I. 2015. Nutrient elements distribution in cultivated and uncultivated soils and sediments of surrounding streams of Okai and Kwanta in Aabiriba, Abia state, Southeastern Nigeria. *Agro-Science*, **11**(3): 20. <https://doi.org/10.4314/as.v11i3.3>

Johnson C.C., Breward N., Ander E.L., Ault L. 2005. G-BASE: baseline geochemical mapping of Great Britain and Northern Ireland. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **5**(4): 347–357. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/05-070>

Jones D.G., Appleton J.D., Breward N., Mackenzie A.C., Scheib C., Beresford N.A., Barnett C.L., Wood M.D., Copplestone D. 2009. Assessment of naturally occurring radionuclides around England and Wales: Application of the G-BASE dataset to estimate doses to non-human species. *Radioprotection*, **44**(5): 629–634. <https://doi.org/10.1051/radiopro/20095116>

Ju J.H., Park J.Y., Yoon Y.H. 2020. Influence of Different Types of Land Use on the Contents of Potentially Toxic Elements and De-icing Salts in Roadside Soils and Trees in Urban Areas. *Sustainability*, **12**(21): 8985. <https://doi.org/10.3390/su12218985>

Juliani C., Assis R.R.de, Monteiro L. V. S., Fernandes C.M. D., Martins J.E. Z. da S., Costa J.R.C. e. 2021. Gold in paleoproterozoic (2.1 to 1.77 Ga) Continental Magmatic Arcs at the Tapajós and Juruena Mineral Provinces (Amazonian Craton, Brazil): a new frontier for the exploration of Epithermal–Porphyry and related deposits. *Minerals*, **11**(7): 714. <https://doi.org/10.3390/min11070714>

Juliani C., Rye R.O., Nunes C.M.D., Snee L.W., Silva R.H.C., Monteiro L.V.S., Bettencourt J.S., Neumann R., Alcover Neto A. 2005. Paleoproterozoic high-sulfidation mineralization in the Tapajós gold province, Amazonian Craton, Brazil: geology, mineralogy, alunite argon age, and stable-isotope constraints. *Chemical Geology*, **215**(1–4): 95–125. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.035>

Jury S. & Tang Y. 2024. ¿Es una época dorada para el oro?. *J.P. Morgan Private Bank*. Disponible en: <https://privatebank.jpmorgan.com/latam/es/insights/markets-and-investing/es-una-epoca-dorada-para-el-oro>

Kamara S. M. 2020. Development of a Geographic Information Systems Baseline Spatial Geodatabase Template for Evaluating Potential and Predicted Environmental Impacts for Sustainable Environmental Impact Assessment of Mining in Sierra Leone. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, **08**(10): 262–284. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.810018>

Kelepertzis E., Argyraki A., Daftsis E. 2012. Geochemical signature of surface water and stream sediments of a mineralized drainage basin at NE Chalkidiki, Greece: A pre-mining survey. *Journal of Geochemical Exploration*, **114**: 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.12.006>

Khavari M., Ghadimi F., Mojeddifar S. 2020. Application of Finite Difference Method in Multifractal Techniques to Identify Pb–Zn Anomalies: a Case Study from Khomein, Iran. *Mining, Metallurgy & Exploration*, **37**(5): 1765–1777. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00215-8>

Kieu Q.L. & Van HuuTap. 2017. Using robust statistics, exploring document analysis and gis for defining and localizing geochemical anomalies-case study in sin quyen copper mine, Lao Cai Province, Viet Nam. *Current Research in Geoscience*, **7**(2): 25–31. <https://doi.org/10.3844/ajgsp.2017.25.31>

- Kim H. 2014. Factors Controlling Sediment Denitrification Rates in Grassland and Forest Streams. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **25**(3): 463. [https://doi.org/10.3319/TAO.2014.01.09.01\(Hy\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2014.01.09.01(Hy))
- Kioe-A-Sen N.M.E., Van Bergen M.J., Wong T.E., Kroonenberg S.B. 2016. Gold deposits of Suriname: geological context, production and economic significance. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie En Mijnbouw*, **95**(4): 429–445. <https://doi.org/10.1017/njg.2016.40>
- Klaver M., Roevers E.W.F., Nanne J.A.M., Mason P.R.D., Davies G.R. 2015. Charnockites and UHT metamorphism in the Bakhuis Granulite Belt, western Suriname: Evidence for two separate UHT events. *Precambrian Research*, **262**: 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.02.014>
- Klimpel F., Bau M., Graupner T. 2021. Potential of garnet sand as an unconventional resource of the critical high-technology metals scandium and rare earth elements. *Scientific Reports*, **11**(1): 5306. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84614-x>
- Kok P.J.R., Broholm T.L., Mebs D. 2021. Thriving in a hostile world: Insights from the dietary strategy of two allopatric, closely related tepui summit endemic amphibians. *Ecology and Evolution*, **11**(13): 8730–8742. <https://doi.org/10.1002/ece3.7682>
- Kompanchenko A.A., Voloshin A.V., Balagansky V.V. 2018. Vanadium Mineralization in the Kola Region, Fennoscandian Shield. *Minerals*, **8**(11): 474. <https://doi.org/10.3390/min8110474>
- Konstantinova E., Minkina T., Nevidomskaya D., Bauer T., Fedorov Y., Zamulina I., Mandzhieva S., Kravtsova N., Voloshina M., Dudnikova T., Shcherbakov A. 2021. Establishment of regional background for heavy metals in the soils of the Lower Don and the Taganrog Bay coast. *E3S Web of Conferences*, **265**: 03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126503004>
- Kroonenberg S.B. & Roevers E.W.F. 2009. Geological Evolution of the Amazonian Craton. *Amazonia, Landscape and Species Evolution* - Wiley. **17**(1): 1-29. <https://doi.org/10.1002/9781444306408.ch2>
- Kroonenberg S.B., Roevers E.W.F., Fraga L.M., Reis N.J., Faraco T., Lafon J.M., Cordani U., Wong T.E. 2016. Paleoproterozoic evolution of the Guiana Shield in Suriname: A revised model. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie En Mijnbouw*, **95**(4): 491–522. <https://doi.org/10.1017/njg.2016.10>
- Lapworth D.J., Knights K.V., Key R.M., Johnson C.C., Ayoade E., Adekanmi M.A., Arisekola T.M., Okunlola O.A., Backman B., Eklund M., Everett P.A., Lister R.T., Ridgway J., Watts M.J., Kemp S.J., Pitfield P.E.J. 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. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.02.023>
- Laudiño F.A.R., Agtong R.J.M., Jumawan J.C., Fukuyama M., Elvira M.V. 2024. Assessment of contamination and potential ecological risks of heavy metals in the bottom sediments of Lake Mainit, Philippines. *Journal of Hazardous Materials Advances*, **15**: 100443. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100443>
- Lehner B. & Grill G. 2013. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes*, **27**(15): 2171–2186. <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>

- Lehner B., Messenger M.L., Korver M.C., Linke S. 2022. Global hydro-environmental lake characteristics at high spatial resolution. *Scientific Data*, **9**(1): 351. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01425-z>
- Lemos C.E.F., Vieira M.I., Ferraz R. 2017. Compartimentação hidrográfica da bacia de drenagem do rio branco, estado de Roraima, Brasil por meio da base hidrográfica otocodificada. *Acta hidrográfica do estado de Roraima*. **11**(26): 35-53. <https://www.researchgate.net/publication/329842006>
- Levard C., Borschneck D., Grauby O., Rose J., Ambrosi J.P. 2018. Goethite, a tailor-made host for the critical metal scandium: The $\text{FeSc}(1-x)\text{OOH}$ solid solution. *Geochemical Perspectives Letters*, **9**: 16–20. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1832>
- Li F., Zheng Y.M., He J.-Z. 2009. Microbes influence the fractionation of arsenic in paddy soils with different fertilization regimes. *Science of The Total Environment*, **407**(8): 2631–2640. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.021>
- Li L. X., Su J., Rao W., Wang Y. 2017. Using geochemistry of rare earth elements to indicate sediment provenance of sand ridges in southwestern Yellow Sea. *Chinese Geographical Science*, **27**(1): 63–77. <https://doi.org/10.1007/s11769-017-0847-0>
- Li P., Liu X., Liu L. 2023. Petrogenesis of Late Cretaceous Muscovite-Bearing Peraluminous Granites in the Youjiang Basin, South China Block: Implications for Tin Mineralization. *Minerals*, **13**(9): 1206. <https://doi.org/10.3390/min13091206>
- Li R., Wang X., Zhang B., Liu Q., Chi Q., Meng Y., Xiong Y. 2022. Identifying the source of gold geochemical anomalies in Jiaodong, eastern China: tracking the occurrence of gold nanoparticles in a metallogenic system. *Frontiers in Earth Science*, **10**: 1-12. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1008133>
- Li Y., Hou Q., Xiao Y. 2021. Geochemical Compositions and Detrital Minerals of Stream Sediments around the Zijinshan Copper-Gold Orefield and Their Implications. *Minerals*, **12**(1): 32. <https://doi.org/10.3390/min12010032>
- Li Y., Zhou H., Gao B., Xu D. 2021. Improved enrichment factor model for correcting and predicting the evaluation of heavy metals in sediments. *Science of The Total Environment*, **755**: 142437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142437>
- Li Z., Deblon J., Zu Y., Colinet G., Li B., He Y. 2019. Geochemical Baseline Values Determination and Evaluation of Heavy Metal Contamination in Soils of Lanping Mining Valley (Yunnan Province, China). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16**(23): 4686. <https://doi.org/10.3390/ijerph16234686>
- Li Z., Liu J., Zhang H., Chen J., Zhang Y., Zhang G., Yang J., Fan K. 2020. Geochemistry, geochronology, and geodynamic implications of mafic-felsic dykes from the Hadamengou area, north-western North China Craton. *Geological Journal*, **55**(10): 7080–7100. <https://doi.org/10.1002/gj.3859>
- Liang Y.C., Lo M.H., Lan C.W., Seo H., Ummenhofer C. C., Yeager S., Wu R.J., Steffen J. D. 2020. Amplified seasonal cycle in hydroclimate over the Amazon river basin and its plume region. *Nature Communications*, **11**(1): 4390. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18187-0>
- Lima A.de S., Silva J.J.C., Lacerda N.M., Barros D.L.de, Gomide P H.O. 2018. Atributos físicos do solo sob diferentes manejos no Sul de Roraima. *Ambiente: Gestão e Desenvolvimento*, **11**(01): 103–119. <https://doi.org/10.24979/153>

- Lima G.F.C., Bento C.C., Horn A.H., Marques E.D., Baggio Filho H. 2021. Geochemical signature and environmental background of bottom sediments in a tropical aquatic system: the Três Marias Reservoir, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, **193**(2): 85. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08876-8>
- Lin X., Wang X., Zhou J., Chi Q., Nie L., Zhang B., Xu S., Zhao S., Liu H., Sun B., Han Z., Liu D., Wang W., Liu Q., Bai J., Fan H., Ma N., Zhang L., Xu G., Shen W. 2019. Concentrations, variations and distribution of molybdenum (Mo) in catchment outlet sediments of China: Conclusions from the China geochemical baselines project. *Applied Geochemistry*, **103**: 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.02.013>
- Lipp A., Roberts G., Gowing C., Whittaker A., Fernandes V. 2020. River sediment geochemistry as a conservative mixture of source regions: Observations and predictions from the Cairngorms, *Advancing Earth and Space Science – JGR Earth Surface*. **125**: 1-21. <https://doi.org/10.31223/OSF.IO/MF3S5>
- Lisboa J.F.K. 2018. Terra, Luta e Trans(formação) no Movimento Indígena de Roraima. *Interethnic@ - Revista de Estudos Em Relações Interétnicas*, **21**(2): 66–89. <https://doi.org/10.26512/interethnica.v21i2.12241>
- Liu B., Cui X., Wang X. 2023. The Delineation of Copper Geochemical Blocks and the Identification of Ore-Related Anomalies Using Singularity Analysis of Stream Sediment Geochemical Data in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River and Its Adjacent Areas, China. *Minerals*, **13**(11): 1397. <https://doi.org/10.3390/min13111397>
- Liu D., Jia W., Zhao F., Li R., Zhang S., Zhao J., Li N. 2024. Provenance and Paleo-Environment of the Late Carboniferous Bauxite Formations in Southern Shanxi. *Applied Sciences*, **14**(22): 10358. <https://doi.org/10.3390/app142210358>
- Liu D., Lin B., Kandasamy S., Wang H., Liu Q., Zou W., Zhu A., Zou J., Lou J.-Y., Shi X. 2019. Geochemical Appraisal of Chemical Weathering and Metal Contamination in Coastal Surface Sediments, Off Northwest Hainan Island, the Gulf of Tonkin. *Frontiers in Marine Science*, **6**(363): 1-17. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00363>
- Liu D., Wang X., Nie L., Liu H., Zhang B., Wang W. 2021. Comparison of geochemical patterns from different sampling density geochemical mapping in Altay, Xinjiang Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, **228**: 106761. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106761>
- Lobo F., Costa M., Novo E., Telmer K. 2016. Distribution of Artisanal and Small-Scale Gold Mining in the Tapajós River Basin (Brazilian Amazon) over the Past 40 Years and Relationship with Water Siltation. *Remote Sensing*, **8**(7): 579. <https://doi.org/10.3390/rs8070579>
- Lyu S., Li F., Yang W., Zhang Q., Su J., Zhao R., Lu X. 2024. Quantitative analysis of potentially toxic elements in soil by XRF based on efficient reinforcement learning and sparse partial least squares. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **39**(3): 942–953. <https://doi.org/10.1039/D3JA00406F>
- Ma L., Wang J., Zhu L. 2022. Geochemical Baseline of Heavy Metals in Topsoil on Local Scale and Its Application. *Polish Journal of Environmental Studies*, **31**(6): 5805–5813. <https://doi.org/10.15244/pjoes/152449>
- Macambira M.J.B., Vasquez M.L., Monteiro P.C., Armstrong R.A. 2022. Neoproterozoic to Rhyacian crustal records along the Middle Xingu River area, Amazonian craton. *Brazilian*

Journal of Geology, 52(4): 1-20. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202220220017>

Magdalena U.R., Gonçalves de Souza G.B., Amorim R.R. 2023. Spatial analysis guiding decision making in environmental conservation: Systematic conservation planning and ecosystem services. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 47(1): 123–139. <https://doi.org/10.1177/03091333221112409>

Mandzhieva S., Minkina T., Pinskiy D., Bauer T., Sushkova S. 2014. The role of soil's particle-size fractions in the adsorption of heavy metals. *Eurasian journal of soil science (EJSS)*, 3(3): 197. <https://doi.org/10.18393/ejss.16003>

Marques E.D., Castro C.C., de Assis Barros R., Lombello J.C., de Souza Marinho M., Araújo J.C.S., Santos E.A.M. 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: 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107232>

Martín-Méndez I., Llamas Borrajo J., Bel-lan A., Locutura J. 2023. Geochemical distribution in residual soils of Iberian Pyrite Belt (Spain). *Journal of Iberian Geology*, 49(2): 97–114. <https://doi.org/10.1007/s41513-023-00210-0>

Mbassa B.J., Njonfang E., Grégoire M., Itiga Z., Kamgang P., Benoit M., Ndjigui P.D., Ngwa C.N., Nolla J.D. 2018. Evaluation of the mineralizing potential of the Mbengwi plutonics, Northwestern Cameroon, Central Africa. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(21): 657. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4018-0>

McIlwaine R., Cox S.F., Doherty R., Palmer S., Ofterdinger U., McKinley J.M. 2014. Comparison of methods used to calculate typical threshold values for potentially toxic elements in soil. *Environmental Geochemistry and Health*, 36(5): 953–971. <https://doi.org/10.1007/s10653-014-9611-x>

Melake B.A., Endalew S.M., Alamirew T.S., Temesegen L.M. 2023. Bioaccumulation and Biota-Sediment Accumulation Factor of Metals and Metalloids in Edible Fish: A Systematic Review in Ethiopian Surface Waters. *Environmental Health Insights*, 17: 1-10. <https://doi.org/10.1177/11786302231159349>

Melo A. K. P., Albuquerque J. A.A., Siqueira R.H. da S., Silva E.E. da, Medeiros R.D.de, Souza L.T. de, Gonçalves A. C.de M. 2021. Quantificação do banco de semente de plantas daninhas sob diferentes sistemas de manejo do solo. *Nativa*, 9(4): 367–372. <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i4.11290>

Melo V. F., Francelino M.R., Uchôa S.C.P., Salamene S., Santos C.S.V.dos. 2010. Solos da área indígena Yanomami no médio rio Catrimani, Roraima. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(2): 487–496. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200022>

Mendes T., Oliveira A., Almeida M., Caxito F., Novo, T. 2022. The structural framework of the north-central Guiana Shield: a fossil fold-and-thrust belt in northeastern Roraima state, Brazil. *Journal of the Geological Survey of Brazil*, 5(1): 1-19. <https://doi.org/10.29396/jgsb.2022.v5.n1.2>

Mendes T.A., Oliveira A.C.S., Lopes P.R.S., Aguiar L., Grazziotin H.F., Almeida M.E., Benevides Filho P.R.R. 2023. *Mapa geológico do estado de Roraima*. SGB. Escala 1:1.000.000. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/23283>

Mendonça B.A.F. de, Fernandes Filho E.I., Schaefer C.E.G.R., Simas F.N.B., Vale Junior J.F.

do, Lisboa B.deA.R., Mendonça J.G.F. de. 2013. Solos e geoambientes do Parque Nacional do Viruá e entorno, Roraima: visão integrada da paisagem e serviço ambiental. *Ciência Florestal*, **23**(2): 427–442. <https://doi.org/10.5902/198050989287>

Meneses M.E., Costa M., Enters D., Behling H. 2015. Environmental changes during the last millennium based on multi-proxy palaeoecological records in a savanna-forest mosaic from the northernmost Brazilian Amazon region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **87**(3): 1623–1651. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520130074>

Mesquita G.V., Ferreira S.R.B., Elgamal V.G.S., Maranhão T. de A., Lima E.F. de, Rizzatti I.M. 2023. Determinação de mercúrio total em peixes frescos em alguns dos principais rios de Roraima por geração de vapor frio e espectrometria de fluorescência atômica (cv AFS). *Ambiente: Gestão e Desenvolvimento*, **16**(1): 45–56. <https://doi.org/10.24979/ambiente.v16i1.1170>

Messias C.G., Almeida C.A.de, Silva D.E., Soler L.S., Maurano L.E., Camilotti V.L., Alves F.C., Silva L.J.da, Reis M.S., Lima T.C.de, Renó V., Lima D.L.C., Belluzzo A.P., Quadros C.B., Barradas D.C.M., Moraes D.R.V. de, Bastos E.F.M., Cunha I.P., Souza J. J. de, Adami M. 2024. Unaccounted for nonforest vegetation loss in the Brazilian Amazon. *Communications Earth & Environment*, **5**(1): 451. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01542-0>

Mitra S., Chakraborty A.J., Tareq A.M., Emran T. Bin, Nainu F., Khusro A., Idris A.M., Khandaker M.U., Osman H., Alhumaydhi F.A., Simal-Gandara J. 2022. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University - Science*, **34**(3): 101865. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>

Mitran T., Gunnam J.R.S., Gourigari S., Kandrika S. 2024. Assessment of depth wise distribution, enrichment, contamination, ecological risk and sources of soil heavy metals over an Industrial area in Southern India. *Journal of Geochemical Exploration*, **257**: 107379. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107379>

Mondillo N., Boni M., Balassone G., Forrester N., Putzolu F., Santoro L. 2020. Mineralogy and Genesis of the Kihabe Zn-Pb-V Prospect, Aha Hills, Northwest Botswana. *Minerals*, **10**(8): 685. <https://doi.org/10.3390/min10080685>

Mou N., Wang G., Sun X. 2023. Identification of geochemical anomalies related to mineralization: A case study from porphyry copper deposits in the Qulong-Jiama mining district of Tibet, China. *Journal of Geochemical Exploration*, **244**: 107126. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107126>

Nascimento F.L. & Pacheco A. do E.S.D. 2021. Descrição dos perfis de solos em dois municípios do Estado de Roraima, Brasil. *Revista Eletrônica Casa de Makunaima*, **3**(1): 45–56. <https://doi.org/10.24979/makunaima.v3i1.535>

Négrel P., Ladenberger A., Reimann C., Birke M., Demetriades A., Sadeghi M. 2019. GEMAS: Geochemical background and mineral potential of emerging tech-critical elements in Europe revealed from low-sampling density geochemical mapping. *Applied Geochemistry*, **111**: 1-56, 104425. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104425>

Neves S.P. 2003. Proterozoic history of the Borborema province (NE Brazil): Correlations with neighboring cratons and Pan-African belts and implications for the evolution of western Gondwana. *Advancing Earth and Space Sciencies - Tectonics*, **22**(4): 5-14.

<https://doi.org/10.1029/2001TC001352>

Nforba M.T., Egbenchung K.A., Berinyuy N.L., Mimba M.E., Tangko E.T., Nono G.D.K. 2022. Statistical evaluation of stream sediment geochemical data from Tchangué-Bikoui drainage system, Southern Cameroon: a regional perspective. *Geology, Ecology, and Landscapes*, **6**(1): 1–13. <https://doi.org/10.1080/24749508.2020.1728023>

Ng V.K.Y. & Cribbie R.A. 2019. The gamma generalized linear model, log transformation, and the robust Yuen-Welch test for analyzing group means with skewed and heteroscedastic data. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, **48**(8): 2269–2286. <https://doi.org/10.1080/03610918.2018.1440301>

Nicklas R.W., Puchtel I.S., Ash R.D. 2016. High-precision determination of the oxidation state of komatiite lavas using vanadium liquid-mineral partitioning. *Chemical Geology*, **433**: 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.04.011>

Nieder R. & Benbi D.K. 2024. Potentially toxic elements in the environment – a review of sources, sinks, pathways and mitigation measures. *Reviews on Environmental Health*, **39**(3): 561–575. <https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0161>

Nomade S., Chen Y., Pouclet A., Féraud G., Théveniaut H., Daouda B. Y., Vidal M., Rigolet C. 2003. The Guiana and the West African Shield Palaeoproterozoic grouping: new palaeomagnetic data for French Guiana and the Ivory Coast. *Geophysical Journal International*, **154**(3): 677–694. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01972.x>

Odewumi S.C. & Olarewaju V.O. 2013. Petrogenesis and Geotectonic Settings of the Granitic Rocks of Idofin-osi-eruku Area, Southwestern Nigeria using Trace Element and Rare Earth Element Geochemistry. *Journal of Geology & Geosciences*, **02**(1): 1-9. <https://doi.org/10.4172/2329-6755.1000109>

Ogasawara Y. & Kon M. 2021. Two clustering methods based on the Ward's method and dendrograms with interval-valued dissimilarities for interval-valued data. *International Journal of Approximate Reasoning*, **129**: 103–121. <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2020.11.001>

Oliveira P.dos R., Van der Geest H.G., Kraak M.H.S., Verdonchot P.F.M. 2019. Land use affects lowland stream ecosystems through dissolved oxygen regimes. *Scientific Reports*, **9**(1): 19685. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56046-1>

Oliveira R., Farias H., Perdiz R., Scudeller V., Imbrozio Barbosa R. 2017. Structure and tree species composition in different habitats of savanna used by indigenous people in the Northern Brazilian Amazon. *Biodiversity Data Journal*, **5**: e20044. <https://doi.org/10.3897/BDJ.5.e20044>

Páez A. & Boisjoly G. 2022. Exploratory data analysis. In: Páez A. & Boisjoly G. (eds.). *Discrete choice analysis with R*. [S.l.], Springer International Publishing. p. 25–64. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20719-8_2

Pan L., Fang G., Wang Y., Wang L., Su B., Li D., Xiang B. 2018. Potentially Toxic Element Pollution Levels and Risk Assessment of Soils and Sediments in the Upstream River, Miyun Reservoir, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **15**(11): 2364. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112364>

Pandey M., Pandey A.K., Mishra A., Tripathi B.D. 2015. Assessment of metal species in river Ganga sediment at Varanasi, India using sequential extraction procedure and SEM–EDS. *Chemosphere*, **134**: 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.04.047>

- Pandiangan F.I. & Audah K.A. 2022. Heavy metal contamination status in the soil-water-rice system near coal-fired power plants in Cilacap, Indonesia. *Jurnal Ilmiah Pertanian*, **19**(3): 145-154. <https://doi.org/10.31849/jip.v19i3.10568>
- Papadopoulos A., Tzifas I.T., Tsikos H. 2019. The Potential for REE and Associated Critical Metals in Coastal Sand (Placer) Deposits of Greece: A Review. *Minerals*, **9**(8): 469. <https://doi.org/10.3390/min9080469>
- Parlak M., Tunçay T., Botsou F. 2022. Heavy Metals in Soil and Sand from Playgrounds of Çanakkale City (Turkey), and Related Health Risks for Children. *Sustainability*, **14**(3): 1145. <https://doi.org/10.3390/su14031145>
- Parrone D., Ghergo S., Preziosi E. 2019. A multi-method approach for the assessment of natural background levels in groundwater. *Science of The Total Environment*, **659**: 884–894. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.350>
- Pech S., Eng C., Or C., Rahim A.B., Heng R., Buth C., Sio S. 2023. Depositional Environment of Sediments in Tonle Sap Sedimentary Basin, Western Part of Cambodia: Insights from Field and Geochemical Studies. *Open Journal of Geology*, **13**(07): 651–666. <https://doi.org/10.4236/ojg.2023.137028>
- Pedreira A.J. & Bahia R.B.C. 2000. Sedimentary basins of Rondônia state, Brazil: response to the geotectonic evolution of the Amazonic craton. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**(3): 477–480. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2000303477480>
- Perini J.A., Silva M.C., Vasconcellos A.C.S. de, Viana P.V.S., Lima M.O., Jesus I.M., Kempton J. W., Oliveira R.A.A., Hacon S.S., Basta P.C. 2021. Genetic Polymorphism of Delta Aminolevulinic Acid Dehydratase (ALAD) Gene and Symptoms of Chronic Mercury Exposure in Munduruku Indigenous Children within the Brazilian Amazon. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **18**(16): 8746. <https://doi.org/10.3390/ijerph18168746>
- Pesce S., Kergoat L., Paris L., Billet L., Besse-Hoggan P., Bonnineau C. 2021. Contrasting Effects of Environmental Concentrations of Sulfonamides on Microbial Heterotrophic Activities in Freshwater Sediments. *Frontiers in Microbiology*, **12**(753647): 1-9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.753647>
- Piedade M.T.F., Parolin P., Lopes A., Wittmann F., Junk W.J., Mortati A., André T., Schöngart J. 2025. Amazonian Rivers from the Guiana Shield. *Chapter 7 - Amazonian Rivers from the Guiana Shield* (pp. 239–277). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823429-7.00003-3>
- Pinheiro S.da S., Reis N.J., Costi H.T. 1990. Geologia da Região de Caburaí. *SGB - Relatórios Técnicos*, **1**: 15–91. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/8386>
- Pinto A. F. S., Ramalho J.C.M., Borghi L., Carelli T.G., Plantz J.B., Pereira E., Terroso D., Santos W. H. dos, Geraldés M. C., Rocha F., Rodrigues M. A. D. C., Laut L., Martins M.V.A. 2019. Background concentrations of chemical elements in Sepetiba bay (SE Brazil). *Journal of Sedimentary Environments*, **4**(1): 108–123. <https://doi.org/10.12957/jse.2019.40992>
- Pinto-Hidalgo J. J. & Silva-Centeno J. A. 2022. AmazonCRIME: un conjunto de datos y punto de referencia de inteligencia artificial geoespacial para la clasificación de áreas potenciales vinculadas a crímenes ambientales transnacionales en la selva Amazónica. *Revista de Teledetección*, **59**: 1–21. <https://doi.org/10.4995/raet.2022.15710>
- Pourret O. & Bollinger J.C. 2018. “Heavy metal” - what to do now: to use or not to use?

Science of The Total Environment, **610–611**: 419–420.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.043>

Pourret O. & Hursthouse A. 2019. It's time to replace the term "Heavy Metals" with "Potentially Toxic Elements" When Reporting Environmental Research. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16**(22): 4446.
<https://doi.org/10.3390/ijerph16224446>

Poveda G., Jaramillo L., Vallejo L.F. 2014. Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers. *Water Resources Research*, **50**(1): 98–118.
<https://doi.org/10.1002/2013WR014087>

Prabhakaran N. K.P. & Cottenie A. 1971. Parent material-soil relationship in trace elements a quantitative estimation. *Geoderma*, **5**(2): 81–97. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(71\)90014-0](https://doi.org/10.1016/0016-7061(71)90014-0)

Qin Y., Zhang X., Zhao Z., Li Z., Yang C., Huang Q. 2021. Coupling Relationship Analysis of Gold Content Using Gaofen-5 (GF-5) Satellite Hyperspectral Remote Sensing Data: A Potential Method in Chahuazhai Gold Mining Area, Qiubei County, SW China. *Remote Sensing*, **14**(1): 109. <https://doi.org/10.3390/rs14010109>

Quaresma L.S., Silva G.da S. e, Sahoo P.K., Salomão G.N., Dall'Agnol R. 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): 1579.
<https://doi.org/10.3390/min12121579>

Radhakrishnan N., Taneja S., Ambastha S., Pipil H., Haritash A. K. 2023. Heavy metal profile, mobility, and source characterization in size-fractionated bed-sediments of River Ganga, India. *Marine Pollution Bulletin*, **188**: 114650.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114650>

Radovanovic V., Djekic I., Zarkovic B. 2020. Characteristics of Cadmium and Lead Accumulation and Transfer by Chenopodium Quinoa Will. *Sustainability*, **12**(9): 3789.
<https://doi.org/10.3390/su12093789>

Ramon D., Morick D., Croot P., Berzak R., Scheinin A., Tchernov D., Davidovich N., Britzi M. 2021. A survey of arsenic, mercury, cadmium, and lead residues in seafood (fish, crustaceans, and cephalopods) from the south-eastern Mediterranean Sea. *Journal of Food Science*, **86**(3): 1153–1161. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15627>

Ramos A.R.A., Oliveira K.A. de, Rodrigues F. dos S. 2020. Mercury-Based Mining in Yanomami Indigenous Lands and Accountabilities. *Ambiente & Sociedade*, **23**: 2-22.
<https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20180326r2vu202015ao>

Ramos Filho H.A., Uliana E.M., Aires U.R.V., Cruz I.F.da, Lisboa L., Silva D.D.da, Viola M.R., Duarte V.B.R. 2024. Nowcast flood predictions in the Amazon watershed based on the remotely sensed rainfall product PDIRnow and artificial neural networks. *Environmental Monitoring and Assessment*, **196**(3): 245. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12396-6>

Rashid A., Schutte B.J., Ulery A., Deyholos M.K., Sanogo S., Lehnhoff E.A., Beck L. 2023. Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. *MDPI Agronomy: Effect of Heavy Metals on Plants*, **13**(6) : 1521.
<https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>

Reimann C. 2022. Experiences from 30 years of low-density geochemical mapping at the

subcontinental to continental scale in Europe. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **22**(4) : 1-10. <https://doi.org/10.1144/geochem2022-030>

Reimann C. & Caritat P. de. 2000. Intrinsic Flaws of Element Enrichment Factors (EFs) in Environmental Geochemistry. *Environmental Science & Technology*, **34**(24) : 5084–5091. <https://doi.org/10.1021/es001339o>

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

Reimann C., Fabian K., Birke M., Filzmoser P., Demetriades A., Négrel P., Oorts K., Matschullat J., de Caritat P., Albanese S., Anderson M., Baritz R., Batista M. J., Bel-Ian A., Cicchella D., De Vivo B., De Vos W., Dinelli E., Ďuriš M., Sadeghi M. 2018. GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil. *Applied Geochemistry*, **88**: 302–318. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.01.021>

Reimann C., Filzmoser P., Garrett R. G. 2005. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of The Total Environment*, **346**(1): 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.11.023>

Reimann C. & Garrett R. G. 2005. Geochemical background—concept and reality. *Science of The Total Environment*, **350**(1–3): 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.047>

Reimann C., Ladenberger A., Birke M., Caritat P. de. 2016. Low density geochemical mapping and mineral exploration: application of the mineral system concept. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **16**(1): 48–61. <https://doi.org/10.1144/geochem2014-327>

Reis N., Cordani U., Goulart L., Almeida M., Oliveira V., Maurer V., Wahnfried I. 2021. Zircon U-Pb SHRIMP ages of the Demêni-Mocidade Domain, Roraima, southern Guiana Shield, Brazil: extension of the Uatumã Silicic Large Igneous Province. *Journal of the Geological Survey of Brazil*, **4**(1): 61–76. <https://doi.org/10.29396/jgsb.2021.v4.n1.4>

Reis N., Fraga M., Faria M., Almeida M. 2003. Geologia do Estado de Roraima, Brasil Geology of Roraima State, Brazil. *Géologie de la France -Geology of France and surrounding areas*, **2**(3-4): 121-134. Disponível em: <https://geolfrance.brgm.fr/sites/default/files/upload/documents/gf5-2-2003.pdf>

Reis N.J., Fraga L.M.B., Almeida M.E. 2014. Arcabouço geológico. In: Holanda J.L.R., Marmos J.L., Maia M.A.M. (org.). *Geodiversidade do estado de Roraima*. Manaus, CPRM, parte 2, p. 17-26. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/16775>

Reis N. J., Almeida M.E., Lopes S., Amaro R., Ferreira L. 2006. Geologia e recursos minerais do estado do Amazonas. *RIGeo-Rio de Janeiro, CPRM (Programa Geologia do Brasil)*, **1**:125. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/2967>

Reis N.J., Faria M.S.G.de, Fraga L.M., Haddad R.C. 2000. Orosirian calc-alkaline volcanism and the Orocaima event in the northern Amazonian craton, eastern Roraima state, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**(3): 380–383. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2000303380383>

Reis N.J., Fraga L.M., Araújo R. V., Riker S. R. L., Almeida M.E., Haddad R.C., Millioti C., Carvalho J.M. de A. 1999. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Roraima Central, Folhas NA.20-X-B e NA.20-X-D (inteiras), NA.20-X-A, NA.20-X-C, NA.21-V-A e

NA.21-V-C (parciais). *SGB*, **1**: 60–189. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/8510?mode=full>

Reis N.J., Nadeau S., Fraga L.M., Betiollo L.M., Faraco M.T.L., Reece J., Lachhman D., Ault R. 2017. Stratigraphy of the Roraima Supergroup along the Brazil-Guyana border in the Guiana shield, Northern Amazonian Craton - results of the Brazil-Guyana Geology and Geodiversity Mapping Project. *Brazilian Journal of Geology*, **47**(1): 43–57. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201720160139>

Reis N.J., Teixeira W., D’Agrella-Filho M.S., Bettencourt J.S., Ernst R.E., Goulart L.E.A. 2022. Large igneous provinces of the Amazonian Craton and their metallogenic potential in Proterozoic times. *Geological Society, London, Special Publications*, **518**(1): 493–529. <https://doi.org/10.1144/SP518-2021-7>

Reis N.J., Teixeira W., Hamilton M.A., Bispo-Santos F., Almeida M.E., D’Agrella-Filho M. S. 2013. Avanavero mafic magmatism, a late Paleoproterozoic LIP in the Guiana Shield, Amazonian Craton: U–Pb ID-TIMS baddeleyite, geochemical and paleomagnetic evidence. *Lithos*, **174**: 175–195. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.10.014>.

Rente A. 2023. *Comportamento e definição de valores de background do mercúrio em sedimentos da bacia hidrográfica do Rio Tapajós, Pará, Brasil*. Orientador: Vinicius Tavares Kütter; Coorientador: Eduardo Duarte Marques. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, xiii, 70 p. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/16227>

Rodrigues R.S., Perdiz R.de O., Flores A.S. 2017. Novas ocorrências de angiospermas para o estado de Roraima, Brasil. *Rodriguésia*, **68**(2): 783–790. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201768229>

Rohrmann A., Sachse D., Mulch A., Pingel H., Tofelde S., Alonso R. N., Strecker M. R. 2016. Miocene orographic uplift forces rapid hydrological change in the southern central Andes. *Scientific Reports*, **6**(1): 35678. <https://doi.org/10.1038/srep35678>

Rousseau T.C.C., Roddaz M., Moquet J.S., Handt Delgado H., Calves G., Bayon G. 2019. Controls on the geochemistry of suspended sediments from large tropical South American rivers (Amazon, Orinoco and Maroni). *Chemical Geology*, **522**: 38–54. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.05.027>

Roy M. & McDonald L.M. 2015. Metal uptake in plants and health risk assessments in metal-contaminated smelter soils. *Land Degradation & Development*, **26**(8): 785–792. <https://doi.org/10.1002/ldr.2237>

Sabbaghi H. & Tabatabaei S.H. 2023. Regimentation of geochemical indicator elements employing convolutional deep learning algorithm. *Frontiers in Environmental Science*, **11**: 1–11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1076302>

Sachithanandam V., Parthasarathy P., Sai Elangovan S., Kasilingam K., Dhivya P., Mageswaran T., Mohan P.M. 2020. A baseline study on trace metals concentration and its ecological risk assessment from the coast of South Andaman Island, India. *Regional Studies in Marine Science*, **36**: 101242. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101242>

Sahoo P.K., Dall’Agnol R., Salomão G.N., Ferreira Junior J. da S., Silva M.S., Souza Filho P.W.M., Costa M.L.da, Angélica R.S., Medeiros Filho C.A., Costa M.F. da, Guilherme L.R.G., Siqueira J.O. 2020. 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.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114504>

Salah E.A.M., Zaidan T.A., Al-Rawi A.S. 2012. Assessment of heavy metals pollution in the sediments of Euphrates river, Iraq. *Journal of Water Resource and Protection*, **04**(12): 1009–1023. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.412117>

Salier B.P., Groves D.I., McNaughton N.J., Fletcher I.R. 2005. Geochronological and Stable Isotope Evidence for Widespread Orogenic Gold Mineralization from a Deep-Seated Fluid Source at ca 2.65 Ga in the Laverton Gold Province, Western Australia. *Economic Geology*, **100**(7): 1363–1388. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.7.1363>

Salomão G.N., Dall’Agnol R., Angélica R.S., Sahoo P.K., Wang X. 2021a. 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**: 103361. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103361>

Salomão G.N., Dall’Agnol R., Sahoo P.K., Angélica R.S., Medeiros Filho C.A.de, Ferreira Júnior J.daS., Silva M.S. da, Souza Filho P.W.M. e, Nascimento Junior W.da R., da Costa M.F., Guilherme L.R.G., Siqueira J.O. de. 2020. Geochemical mapping in stream sediments of the Carajás Mineral Province: Background values for the Itacaiúnas River watershed, Brazil. *Applied Geochemistry*, **118**: 104608. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104608>

Salomão G.N., Farias D. de L., Sahoo P.K., Dall’Agnol R., Sarkar D. 2021b. Integrated Geochemical Assessment of Soils and Stream Sediments to Evaluate Source-Sink Relationships and Background Variations in the Parauapebas River Basin, Eastern Amazon. *Soil Systems*, **5**(1): 21. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5010021>

Sanaiotti T.M., Martinelli L.A., Victoria R.L., Trumbore S.E., Camargo P.B. 2002. Past Vegetation Changes in Amazon Savannas Determined Using Carbon Isotopes of Soil Organic Matter ¹. *Biotropica*, **34**(1): 2–16. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2002.tb00237.x>

Sander C., Gasparetto, N., Luiz dos Santos M., Carvalho T. M. 2014. Characteristics of sediment transport suspended in branco river basin, Roraima state. *Acta Geográfica, Boa Vista*, **8**(17): 71-85. <https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v8i17.2592>

Santos D.M.D. dos., Silva M.F.da., Lima P.A.F. 2021. Caracterização do Igarapé Chico Reis, Rorainópolis - RR e restauração de matas ciliares na Amazônia: um referencial teórico. *Research, Society and Development*, **10**(15): e341101522816. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i15.22816>

Santos J.O.S., Hartmann L.A., McNaughton N.J., Fletcher I.R. 2002. Timing of mafic magmatism in the Tapajós Province (Brazil) and implications for the evolution of the Amazon Craton: evidence from baddeleyite and zircon U–Pb SHRIMP geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, **15**(4): 409–429. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00061-5](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00061-5)

Santos J.O.S., Van Breemen O.B., Groves D.I., Hartmann L.A., Almeida M.E., McNaughton N.J., Fletcher I. R. 2004. Timing and evolution of multiple Paleoproterozoic magmatic arcs in the Tapajós Domain, Amazon Craton: constraints from SHRIMP and TIMS zircon, baddeleyite and titanite U–Pb geochronology. *Precambrian Research*, **131**(1–2): 73–109. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.01.002>

- Santos-Francés F., Martínez-Graña A., Alonso Rojo P., García Sánchez A. 2017. Geochemical Background and Baseline Values Determination and Spatial Distribution of Heavy Metal Pollution in Soils of the Andes Mountain Range (Cajamarca-Huancavelica, Peru). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **14**(8): 859. <https://doi.org/10.3390/ijerph14080859>
- Santos-Lima C. dos, Mourão D. de S., Carvalho C.F. de, Souza-Marques B., Vega C.M., Gonçalves R.A., Argollo N., Menezes-Filho J.A., Abreu N., Hacon S.deS. 2020. Neuropsychological Effects of Mercury Exposure in Children and Adolescents of the Amazon Region, Brazil. *NeuroToxicology*, **79**: 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2020.04.004>
- Scheib A.J., Lapworth D.J., Pitfield P.E.J., Ralison A.V, Randriamananjara T., Rabarimanana M., Rafahatelo J.M., Bejoma M. 2011. Geochemical signatures of stream sediments within the main geological domains and terranes of North and Central Madagascar. *Applied Earth Science*, **120**(2): 97–110. <https://doi.org/10.1179/1743275812Y.0000000001>
- Schlesinger W.H. & Bernhardt E. 2020. Biogeochemistry. *Oxford Bibliographies Online Datasets*, **1**:126-458. <https://doi.org/10.1093/obo/9780199830060-0111>
- Schober P., Boer C., Schwarte L.A. 2018. Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, **126**(5): 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Shah M.H., Iqbal J., Shaheen N., Khan N., Choudhary M.A., Akhter G. 2012. Assessment of background levels of trace metals in water and soil from a remote region of Himalaya. *Environmental Monitoring and Assessment*, **184**(3): 1243–1252. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2036-4>
- Silva A.L.F. & Miranda D.F. de. 2023. Infraestrutura de transporte, desafio logístico e a importância do Arco Norte para a competitividade agrícola regional. *Cadernos CEPEC*, **12**(2): 63-73. <https://doi.org/10.18542/cepec.v12i2.15009>
- Silva J.A. da, Silva E.M. Q.da, Nunes J. C., Moura M. A.de, Silva J. A.da, Souza A. A. de. 2018. Yield of sweet potato as a function of organic fertilization and intercropping with *Crotalaria juncea*. *REVISTA AGRO@MBIENTE ON-LINE*, **12**(2): 96. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v12i2.4664>
- Silva L.J. da, Dick D.P., Neckel D., Nóbrega G.N., Rodriguez R.deA.R., Barbosa R.I., Cordeiro R.C. 2022. Effects of fire on soil organic matter in northern Amazonian forest fragments. *Acta Amazonica*, **52**(1): 13–22. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202100133>
- Silva Junior C.H.L., Anderson L.O., Silva A.L., Almeida C.T., Dall'Agnol R., Pletsch M.A. J.S., Penha T.V., Paloschi R.A., Aragão L.E.O.C. 2019. Fire Responses to the 2010 and 2015/2016 Amazonian Droughts. *Frontiers in Earth Science*, **7**(97): 1-16. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00097>
- Silva S.R.A., Souza A.G.H., Lima R.H.C., Garcia M.daG.M. 2023. Uso turístico e educativo de sítios geológicos: estudo preliminar no baixo Rio Negro, Amazonas, Brasil. *Geologia USP. Série Científica*, **23**(2): 139–152. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v23-204678>
- Siqueira-Gay J. & Sánchez L.E. 2021. The outbreak of illegal gold mining in the Brazilian Amazon boosts deforestation. *Regional Environmental Change*, **21**(2): 28. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01761-7>
- Smith D., Demetriades A., de-Caritat P., Wang X. 2018. The history, progress, and future of

global-scale geochemical mapping. *Geochimica Brasiliensis*, **32**(2): 115–135. <https://doi.org/10.21715/GB2358-2812.2018322115>

Soares E.A., Santos S.deM.A., Custodio M.A., Castillo L.A., Dehani J., Dino R. 2021. Arcabouço estratigráfico neógeno-quaternário da porção oeste da bacia do solimões, amazônia ocidental. *Geosciences = Geociências - UNESP*, **40**(3): 611–622. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i03.15991>

Sobolev S.V. & Babeyko A.Y. 2005. What drives orogeny in the Andes?. *The Geological society of America-Geology*, **33**(8): 617–620. <https://doi.org/10.1130/G21557AR.1>

Sobrinho-Figueroa A.S. 2021. Texture and organic matter content of surface sediments from Metztitlan Lake, Mexico. *Hidrobiológica*, **31**(2): 179–191. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2021v31n2/Sobrinho>

Souza C.M., Shimbo J., Rosa M.R., Parente L.L., Alencar A., Rudorff B. F. T., Hasenack H., Matsumoto M., Ferreira L., Souza-Filho P.W.M., de Oliveira S.W., Rocha W.F., Fonseca A. V., Marques C.B., Diniz C.G., Costa D., Monteiro D., Rosa E.R., Vélez-Martin E., Azevedo T. 2020. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sensing*, **12**(17): 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>

Souza E.L., Galvão P.H.F., Pinheiro C. do S. da S., Baessa M.P.M., Demétrio J.G.A., Brito W.R.R. 2013. Síntese da hidrogeologia nas bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões: Sistemas Aquíferos Içá-Solimões e Alter do Chão. *Geologia USP. Série Científica*, **13**(1): 107–117. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2013000100007>

Souza V. da S. & Nogueira A.C.R. 2009. Seção geológica Manaus – Presidente Figueiredo (AM), borda norte da Bacia do Amazonas: um guia para excursão de campo. *Revista Brasileira de Geociências*, **39**(1): 16–29. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.20093911629>

Souza V. da S., Souza A.G.H. de., Dantas E.L., Valério C. da S. 2015. K’Mudku A-type magmatism in the southernmost Guyana Shield, central-north Amazon Craton (Brazil): the case of Pedra do Gavião syenogranite. *Brazilian Journal of Geology*, **45**(2): 293–306. <https://doi.org/10.1590/23174889201500020008>

Souza-Filho P.W.M., Sahoo P.K., Silva M.S. da., Dall’Agnol R., Medeiros Filho C.A., Leite A.S., Ferreira Júnior J. da S., Nascimento Junior W. da R., Silva G. da S. e, Salomão G.N., Sarracini F., Silva Junior R.O., Costa M.F. da. 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): 1-17. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202220220018>

Stazi S.R., Antonucci F., Pallottino F., Costa C., Marabottini R., Petruccioli M., Menesatti P. 2014. Hyperspectral Visible–Near Infrared Determination of Arsenic Concentration in Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **45**(22): 2911–2920. <https://doi.org/10.1080/00103624.2014.954716>

Su N., Yang S., Guo Y., Yue W., Wang X., Yin P., Huang X. 2017. Revisit of rare earth element fractionation during chemical weathering and river sediment transport. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **18**(3): 935–955. <https://doi.org/10.1002/2016GC006659>

Suszczyński E. 1981. Chapter 14 The Greenstone–Granitic Gneiss Shield, *Developments in Precambrian Geology*, **2**: 845–850. [https://doi.org/10.1016/S0166-2635\(08\)70208-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2635(08)70208-1)

- Tang H., Ke Z., Yan M., Wang W., Nie H., Li B., Zhang J., Xu X., Wang J. 2018. Concentrations, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Daya Bay, China. *Water*, **10**(6): 780. <https://doi.org/10.3390/w10060780>
- Tao Y., Ye G., Zhang H., Hu Y., Zuo Q., Wang X., Zhu S., Kang X., Zhang Y., Xiang X., Rong Y., Song C. 2022. Effect of Fluoride Ions on the Surface Dissolution of Vanadium-Bearing Biotite. *Separations*, **9**(12): 422. <https://doi.org/10.3390/separations9120422>
- Tarnagda A.F., Ouyi P., Sawadogo S. 2024. Identifying Areas of High Gold Potential Using Geochemical Prospecting Methods: The Tenado Area in the Boromo Birimian Belt, West-Central Burkina Faso, West Africa. *European Scientific Journal*, *ESJ*, **20**(2): 191. <https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n2p191>
- Tassinari C.C.G., Mellito K.M., Babinski M. 2003. Age and Origin of the Cu (Au-Mo-Ag) Salobo 3A Ore Deposit, Carajas Mineral Province, Amazonian Craton, Northern Brazil. *Episodes*, **26**(1): 2–9. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2003/v26i1/001>
- Tavares Júnior S. S.(coord). 2020. *Relatório executivo de geomorfologia para o zoneamento ecológico econômico do Estado de Roraima (ZEE-RR)*. Roraima, Governo do Estado de Roraima Secretaria de Estado do Planejamento e Desenvolvimento (SEPLAN) Centro de Geotecnologias, Cartografia e Planejamento Territorial de Roraima (CGPTERR). v.1, p.10–41.
- Tchaptchet T.W., Tematio P., Guimapi T.N., Happi E., Tiomo I., Momo N.M. 2021. Morphological, mineral and geochemical characterization of soil profiles in Meiganga as tools for rock weathering intensity and trend evaluation and residual ore deposit prospection in the mineralized domain of central Cameroon. *Geological Society, London, Special Publications*, **502**(1): 121–145. <https://doi.org/10.1144/SP502-2019-84>
- Teixeira A. de A., Silva A.M., Pruski F.F., Davis Jr C., Roig H.L., Diniz N.C. 2022. Improvements on the Pfafstetter basin coding system proposal. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos Brazilian Journal of Water Resources RBRH*, **27**(6): 1-15. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220210120>
- Teixeira W., Reis N.J., Bettencourt J.S., Klein E.L., Oliveira D.C. 2019. Intraplate Proterozoic Magmatism in the Amazonian Craton Reviewed: Geochronology, Crustal Tectonics and Global Barcode Matches. *Dyke Swarms of the World: A Modern Perspective -Springer Geology*, (pp. 111–154). https://doi.org/10.1007/978-981-13-1666-1_4
- Texeira A. de A. 2012. *Bacias hidrográficas Ottocodificadas (Níveis Otto 1-7)1*. Disponível em: <https://Metadados.Snirh.Gov.Br/Geonetwork/Srv/Api/Records/B228d007-6d68-46e5-B30d-A1e191b2b21f>
- Thiombane M., Di Bonito M., Albanese S., Zuzolo D., Lima A., Vivo B.de. 2019. Geogenic versus anthropogenic behaviour and geochemical footprint of Al, Na, K and P in the Campania region (Southern Italy) soils through compositional data analysis and enrichment factor. *Geoderma*, **335**: 12–26. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.008>
- 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 Meeresuntersuchungen*, **33**(1), 566–575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>
- Tukey J.W. 1977. Exploratory data analysis. *Addison-Wesley Publishing Company*. **23**(4): 413-414. <https://doi.org/10.1002/bimj.4710230408>

- Tume P., Cornejo Ó., Rubio C., Sepúlveda B., Roca N., Bech J. 2023. Analysis and Evaluation of Concentrations of Potentially Toxic Elements in Landfills in the Araucanía Region, Chile. *Minerals*, **13**(8): 1033. <https://doi.org/10.3390/min13081033>
- Ugbe F. C., Adiela U.P., Ebegbare U.C. 2016. Major and Trace Element Geochemistry of Granites in Koji, Kogi State, Nigeria. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, **8**(1): 8–12. <https://doi.org/10.19026/rjees.8.2697>
- Uhlein A., Paim P.S.G., Tassinari C.C.G., Pedreira (In memorian), A. J. 2015. Análise estratigráfica de bacias rifte paleo-mesoproterozoicas dos Crátons Amazônico e São Francisco, Brasil. *Geonomos*, **23**(2): 1-13. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v23i2.707>
- Urquiza M.A., Melo V.F., Francelino M.R., Schaefer C.E.G.R., Souza E. de, Barbosa R.I., Santiago M.M., Araújo T.H. de C., Maia S.D.S. 2018. Anthropic Processes and Land-Use Change During 33 Years in Roraima, Northern Amazonia. *Journal of Agricultural Science*, **10**(7): 426. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n7p426>
- Usesse A., Chukwu O. L., Rahman M.M., Naidu R., Islam S., Oyewo E. O. 2017. Enrichment, contamination and geo-accumulation factors for assessing arsenic contamination in sediment of a Tropical Open Lagoon, Southwest Nigeria. *Environmental Technology & Innovation*, **8**: 126–131. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.06.006>
- Valdés D. A., Aliaga G., Deckart K., Karas C., Cáceres D., Nario A. 2022. The environmental geochemical baseline, background and sources of metal and metalloids present in urban, peri-urban and rural soils in the O'Higgins region, Chile. *Environmental Geochemistry and Health*, **44**(10): 3173–3189. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01098-4>
- Vale Júnior J.F., Cruz D., Nascimento P. 2016. *Relatório executivo do estudo de solos para o zoneamento ecológico do estado de Roraima (ZEE-RR)*. [Roraima]. Secretaria de Agricultura, Desenvolvimento e Inovação, ZEE, **2**(1):21-58. Disponível em: <https://zee-rr.institutopiatam.org.br/wp-content/uploads/2022/03/Pedologia.pdf>
- Vale Junior J.F., Schaefer C.E.G.R., Sousa M.I.L., Pereira M.1.G., Campos M.C.C., Brito Filho E. G. 2022. Polycyclic soils with Bt and Bw developed on mafic rocks in a forest cerrado transition environment in Roraima, northern Amazon, Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, **17**(3): 1–9. <https://doi.org/10.5039/agraria.v17i3a505>
- Vale Júnior J.F., Sousa L.I.M., Nascimento P.P.R.R. Solo e Ambiente 2014. Geodiversidade meio ambiente planejamento territorial geologia ambiental Roraima. In: Holanda J. L. R., Marmos J. L., Maia M. A. M. (org.). *Geodiversidade do estado de Roraima*. Manaus, CPRM, p. 67–85. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/16775>.
- Valério C.da S., Macambira M.J.B., Souza V.da S., Dantas E.L., Dall'Agnol R. 2021. Orosirian I-type calc-alkaline granitoids from northern Brazil: Petrogenetic implications for evolution of the central Amazonian Craton. *Lithos*, **105914**: 380–381. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105914>
- Vasyukova O.V., Williams-Jones A.E., Blamey N.J.F. 2016. Fluid evolution in the Strange Lake granitic pluton, Canada: Implications for HFSE mobilisation. *Chemical Geology*, **444**: 83–100. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.10.009>
- Vianna A. dos S., Matos E.P.de., Jesus I.M.de., Asmus C.I.R.F., Câmara V. de M. 2019. Human exposure to mercury and its hematological effects: a systematic review. *Cadernos de Saúde Pública*, **35**(2): e00091618. <https://doi.org/10.1590/0102-311x00091618>

- Vicq R., Matschullat J., Leite M.G.P., Nalini Junior H.A., Mendonça F.P.C. 2015. Iron Quadrangle stream sediments, Brazil: geochemical maps and reference values. *Environmental Earth Sciences*, **74**(5): 4407–4417. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4508-2>
- Vieira C., Amaral W., Holanda Santos F. 2022. Petrography, geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the Siderian-Rhyacian granitoids of NW Bacajá Domain, Amazonian Craton. *Journal of the Geological Survey Of Brazil*, **5**(3): 145 - 176. <https://doi.org/10.29396/jgsb.2022.v5.n3.1>
- Voicu G., Bardoux M., Stevenson R. 2001. Lithostratigraphy, geochronology and gold metallogeny in the northern Guiana Shield, South America: a review. *Ore Geology Reviews*, **18**(3–4): 211–236. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(01\)00030-0](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(01)00030-0)
- Wankler L. F. & Sander C. 2022. Zoneamento ecológico-econômico de Roraima, Volume 2: Diagnóstico dos Recursos Naturais: Capítulo 9 Hidrologia. *Secretaria de Agricultura, Desenvolvimento e Inovação*. Governo de Roraima. p.1076-1120. Disponível em: <https://seadi.rr.gov.br/wp-content/uploads/2024/01/ZEE-RR-2022-VOLUME-02.pdf>
- Wang J. & Zuo R. 2024. Uncertainty Quantification in Geochemical Mapping: A Review and Recommendations. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **25**(3): 1-26. <https://doi.org/10.1029/2023GC011301>
- Wang J., Zuo R., Liu Q. 2024. Mapping geochemical anomalies by accounting for the uncertainty of mineralization-related elemental associations, *Solid Earth*, **15**(6):731- <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2894>
- Warren C.J., Greenwood L.V., Argles T.W., Roberts N.M.W., Parrish R.R., Harris N.B.W. 2019. Garnet–monazite rare earth element relationships in sub-solidus metapelites: a case study from Bhutan. *Geological Society, London, Special Publications*, **478**(1): 145–166. <https://doi.org/10.1144/SP478.1>
- Watari T., McLellan B.C., Giurco D., Dominish E., Yamasue E., Nansai K. 2019. Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity. *Resources, Conservation and Recycling*, **148**(13): 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.015>
- Watkins M.W. 2018. Exploratory factor analysis: a guide to best practice. *Journal of Black Psychology*, **44**(3): 219–246. <https://doi.org/10.1177/0095798418771807>
- Watson L.C., Hurtado-Gonzales J.L., Chin C.J., Persaud J. 2020. Survey of methylmercury exposures and risk factors among indigenous communities in Guyana, South America. *Journal of Health and Pollution*, **10**(26): 1-9. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.26.200604>
- Wen W., Yang F., Xie S., Wang C., Song Y., Zhang Y., Zhou W. 2024. Determination of geochemical background and baseline and research on geochemical zoning in the desert and sandy areas of China. *Applied Sciences*, **14**(22): 10612. <https://doi.org/10.3390/app142210612>
- Wentworth C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, **30**(5): 377–392. <http://www.jstor.org/stable/30063207>
- Wetzler E.A., Marchesini P., Villegas L., Canavati S. 2022. Changing transmission dynamics among migrant, indigenous and mining populations in a malaria hotspot in Northern Brazil: 2016 to 2020. *Malaria Journal*, **21**(1): 127. <https://doi.org/10.1186/s12936-022-04141-6>

- Wilkinson J.J. 2013. Triggers for the formation of porphyry ore deposits in magmatic arcs. *Nature Geoscience*, **6**(11): 917–925. <https://doi.org/10.1038/ngeo1940>
- Wu B., Wang G., Wu J., Fu Q., Liu C. 2014. Sources of heavy metals in surface sediments and an ecological risk assessment from two adjacent plateau reservoirs. *Plos One*, **9**(7): e102101. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102101>
- Wu W., Wu P., Yang F., Sun D., Zhang D.X., Zhou Y.K. 2018. Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around an electronics manufacturing facility. *Science of The Total Environment*, **630**(1): 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.183>
- Xu X., Zhang X., Riley W.J., Xue Y., Nobre C.A., Lovejoy T.E., Jia G. 2022. Deforestation triggering irreversible transition in Amazon hydrological cycle. *Environmental Research Letters*, **17**(3): 034037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4c1d>
- Xue Z., Wang Z., Tan L., Fan M. 2023. Geochemical baseline assessment and ecological risk evaluation of potentially toxic elements in soils: a case in Han River, China. *Journal of Soils and Sediments*, **23**(2): 745–764. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03339-0>
- Yaisamut O., Xie S., Charusiri P., Dong J., Wen W. 2023. Prediction of Au-Associated Minerals in Eastern Thailand Based on Stream Sediment Geochemical Data Analysis by S-A Multifractal Model. *Minerals*, **13**(10): 1297. <https://doi.org/10.3390/min13101297>
- Yang F., Xie S., Hao Z., Carranza E. J. M., Song Y., Liu Q., Xu R., Nie L., Han W., Wang C., Wang Q. 2022. Geochemical quantitative assessment of mineral resource potential in the da Hinggan Mountains in Inner Mongolia, China. *Minerals*, **12**(4): 434. <https://doi.org/10.3390/min12040434>
- Yang H. S., LaFrance D. R., Hao Y. 2021. Elemental testing using inductively coupled plasma mass spectrometry in clinical laboratories. *American Journal of Clinical Pathology*, **156**(2): 167–175. <https://doi.org/10.1093/ajcp/aqab013>
- Yao Q., Wang X., Jian H., Chen H., Yu Z. 2015. Characterization of the particle size fraction associated with heavy metals in suspended sediments of the Yellow river. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **12**(6): 6725–6744. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606725>
- Yongo E., Jin F., Mutethya E., Wu D., Zhang P., Guo Z. 2023. Sediment heavy metal pollution assessment in changwang and Wuyuan rivers in Hainan Island, China. *Water*, **15**(8): 1580. <https://doi.org/10.3390/w15081580>
- Yu Z., Liu B., Xie M., Wu Y., Kong Y., Li C., Chen G., Gao Y., Zha S., Zhang H., Wang L., Tang R. 2022. 3D mineral prospectivity mapping of Zaozigou Gold Deposit, West Qinling, China: deep learning-based mineral prediction. *Minerals*, **12**(11): 1382. <https://doi.org/10.3390/min12111382>
- Zhang B., Yu S., Liang Y., Jiang M. 2024. Electrochemical Behavior of Niobium Oxide and Titanium Oxide in NaF–Na₃AlF₆ Molten Salt. *Metals*, **14**(3): 297. <https://doi.org/10.3390/met14030297>
- Zhang D., Dyck M., Filipović L., Filipović V., Lv J., He H. 2021. Hyperaccumulators for Potentially Toxic Elements: A Scientometric Analysis. *Agronomy*, **11**(9): 1729. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091729>
- Zhang H., Yu M., Xu H., Wen H., Fan H., Wang T., Liu J. 2020. Geochemical baseline

determination and contamination of heavy metals in the urban topsoil of Fuxin City, China. *Journal of Arid Land*, **12**(6): 1001–1017. <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0029-2>

Zhang M., Li W., Zhang L., Jin H., Mu Y., Wang L. 2023. A Pearson correlation-based adaptive variable grouping method for large-scale multi-objective optimization. *Information Sciences*, **639** : 118737. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.02.055>

Zhang N., Li G., Liu Z., Chen Y., Wang S., Li C. 2022. Late Mesozoic magmatism and tectonic significance of the Kelihe Area in the northern Great Xing'an Range. *Geological Journal*, **57**(3): 1311–1336. <https://doi.org/10.1002/gj.4341>

Zhang N., Yan Y.T., Li S.R., Tong X.Y., Yan L.N. 2012. Combination Distribution Characteristics and Corresponding Material Sources of Surface Clay Minerals in Beibu Gulf, China. *Advanced Materials Research*, **616–618**: 158–161. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.616-618.158>

Zhang Q., Zhao K.D., Li W.Q., Palmer M.R., Jiang S.Y., Jiang H., Zhang W., Zhang D., Hussain A. 2022. Timing and tectonic setting of tin mineralization in southern Myanmar: constraints from cassiterite and wolframite U–Pb ages. *Mineralium Deposita*, **57**(6): 977–999. <https://doi.org/10.1007/s00126-021-01083-y>

Zhang W., Qi L., Hu Z., Zheng C., Liu Y., Chen H., Gao S., Hu S. 2016. An Investigation of Digestion Methods for Trace Elements in Bauxite and Their Determination in Ten Bauxite Reference Materials Using Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, **40**(2): 195–216. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2015.00356.x>

Zhao S., Feng C., Yang Y., Niu J., Shen Z. 2012. Risk assessment of sedimentary metals in the Yangtze estuary: new evidence of the relationships between two typical index methods. *Journal of Hazardous Materials*, **241–242**: 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.09.023>.

Zhao Z., Zhao X., Yin Y., Li C., Yang Y., Wang Y. 2024. Identification of Geochemical Anomalies Based on RPCA and Multifractal Theory: A Case Study of the Sidaowanzi Area, Chifeng, Inner Mongolia. *ACS Omega*, **9**(23): 24998–25013. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02078>

Zheng S., Zheng Y., Chen X., Yu Z., Chen L. 2023. A New Method for Processing Geochemical Exploration Data: the Geological Connotation Method (GCM). <https://doi.org/10.20944/preprints202305.1644.v1>. Submitted

Zhitkov A. S. & Vertman E. M. 2006. Uranium and thorium content of reference samples from the geological survey of Japan “Igneous Rock Series 1986.” *Geostandards and Geoanalytical Research*, **30**(2): 107–111. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2006.tb00917.x>

Zhou X., Li A., Jiang F., Lu J. 2015. Effects of grain size distribution on mineralogical and chemical compositions: a case study from size-fractional sediments of the Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River). *Geological Journal*, **50**(4): 414–433. <https://doi.org/10.1002/gj.2546>

Zhu J., Wang Q., Yu H., Li M., He N. 2016. Heavy metal deposition through rainfall in Chinese natural terrestrial ecosystems: Evidences from national-scale network monitoring. *Chemosphere*, **164**(1): 128–133. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.105>

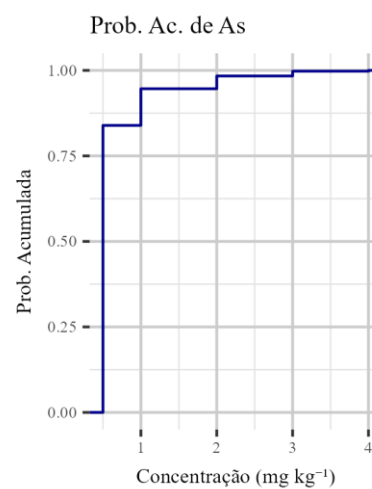
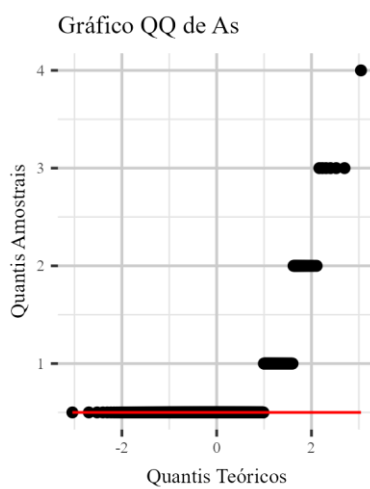
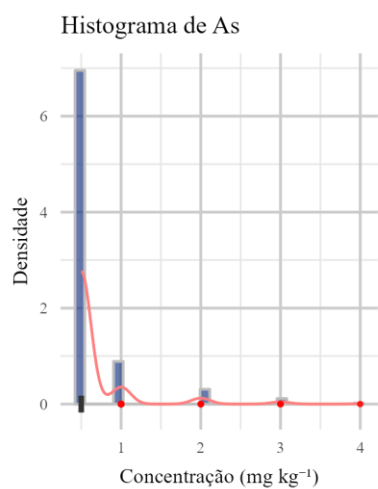
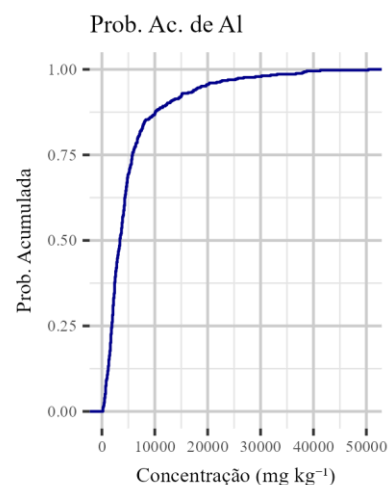
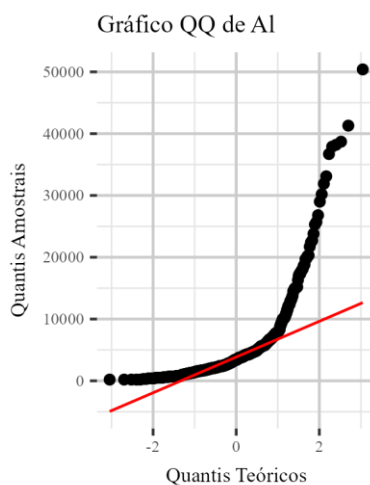
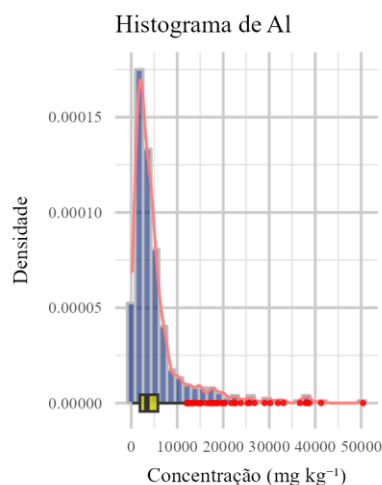
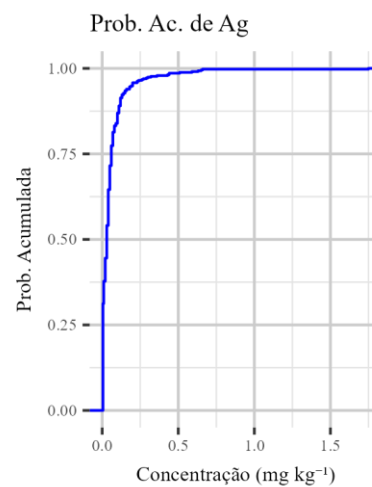
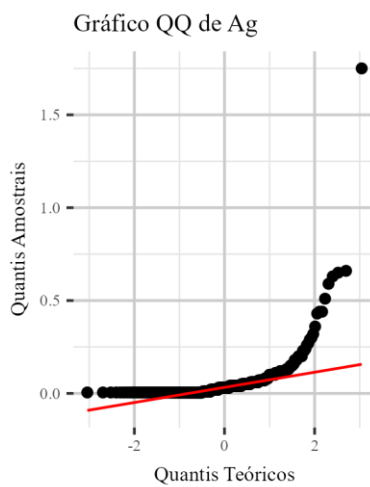
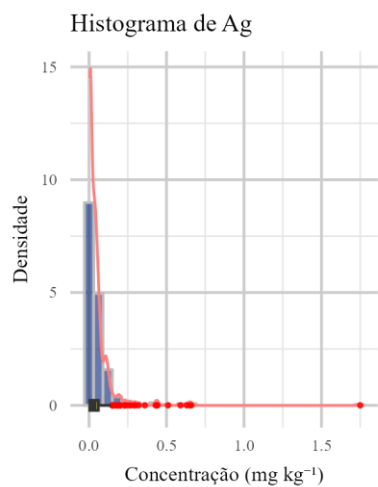
Zinicovscaia I., Hramco C., Chaligava O., Yushin N., Grozdov D., Vergel K., Duca G. 2021. Accumulation of Potentially Toxic Elements in Mosses Collected in the Republic of Moldova. *Plants*, **10**(3): 471. <https://doi.org/10.3390/plants10030471>

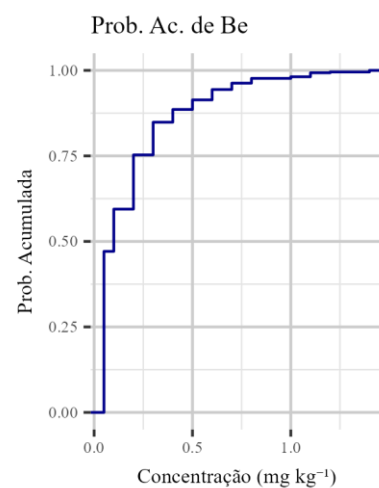
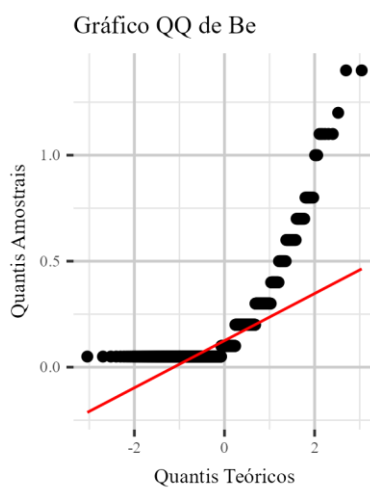
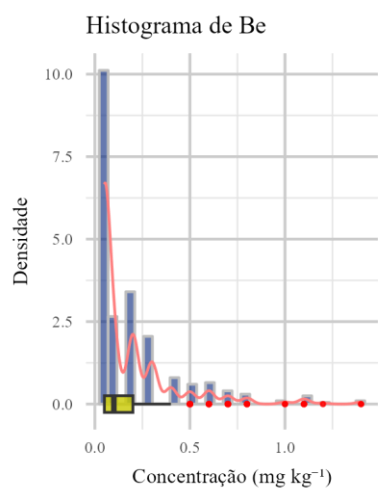
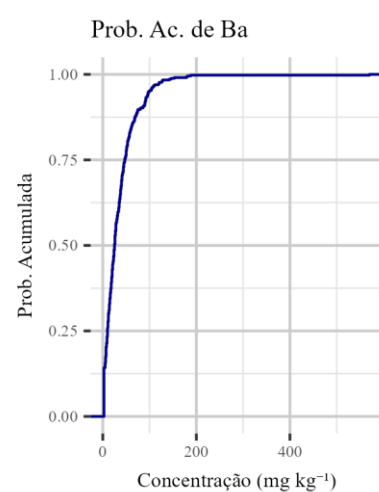
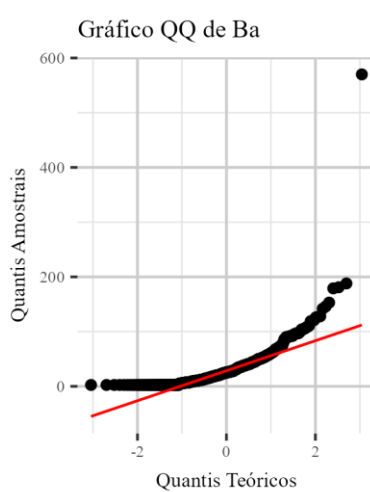
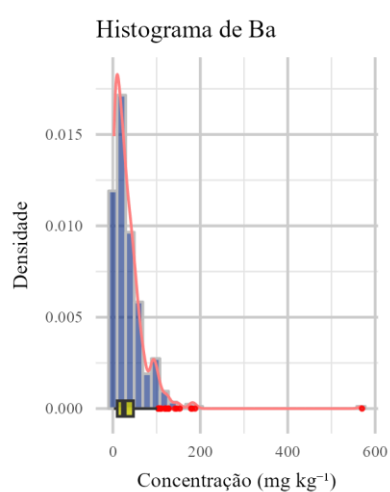
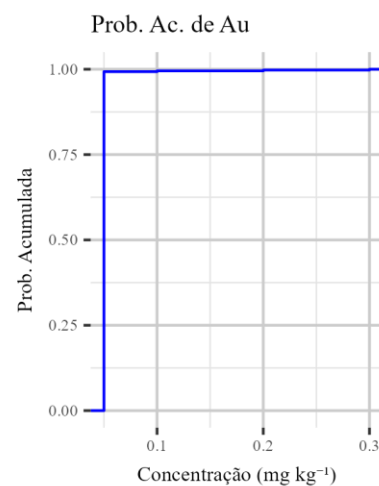
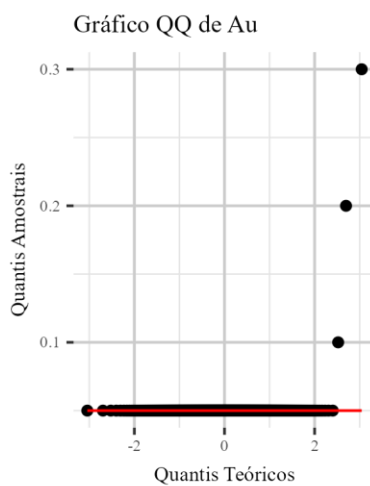
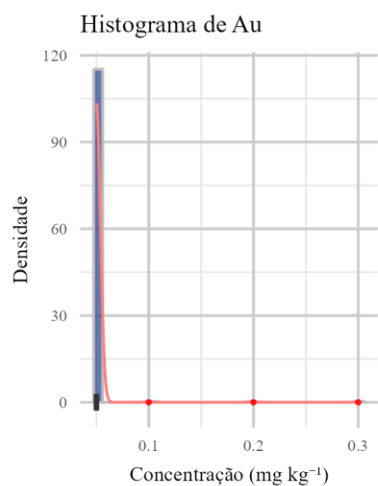
Zubir A. A., Saad F. N.M., Dahalan F. A. 2018. The study of heavy metals on sediment quality of Kuala Perlis Coastal area. *E3S Web of Conferences*, **34**(1): 1-8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183402018>.

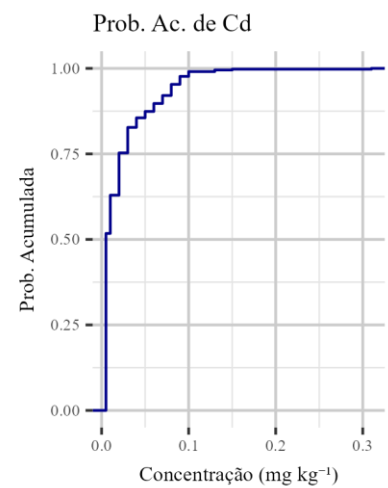
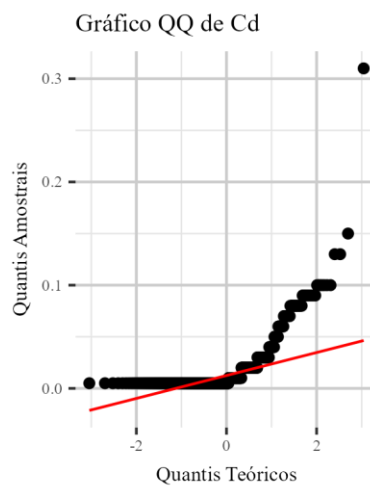
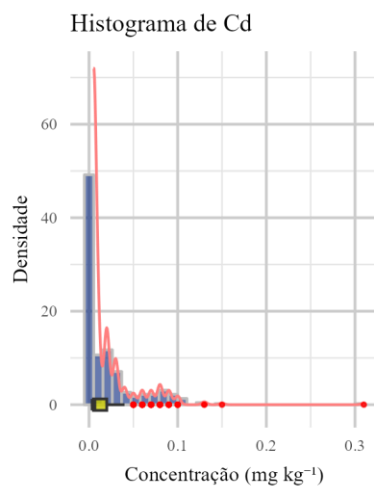
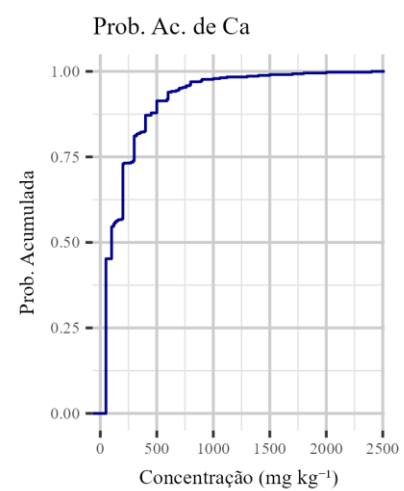
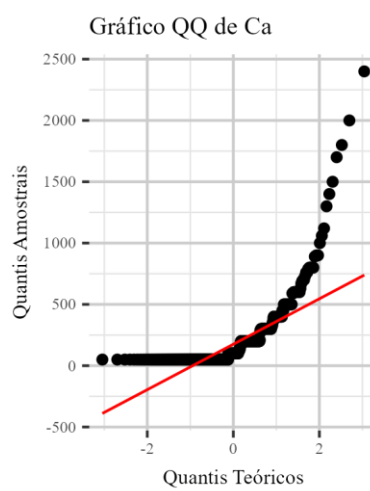
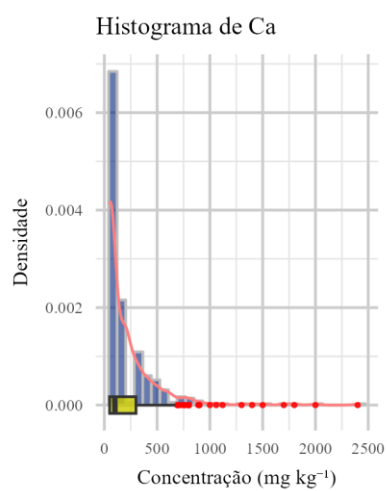
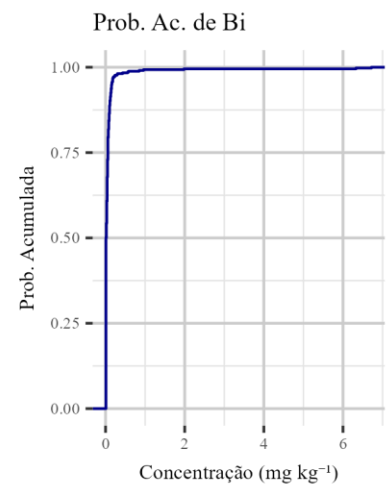
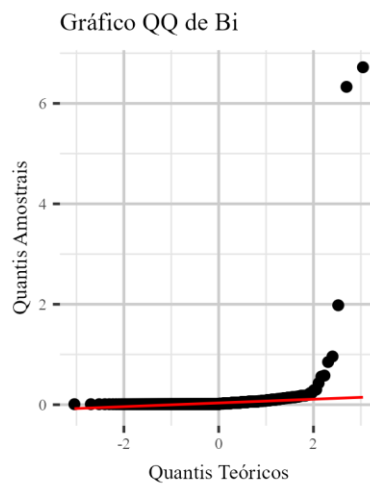
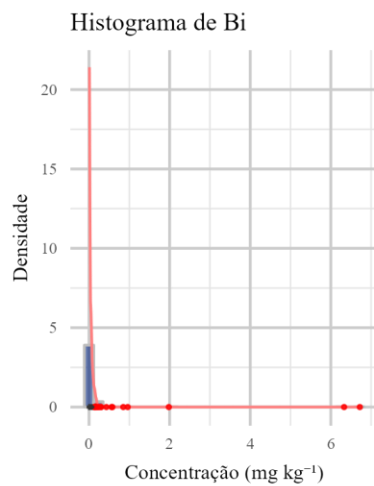
Zumlot T., Goodell P., Howari F. 2009. Geochemical mapping of New Mexico, USA, using stream sediment data. *Environmental Geology*, **58**(7): 1479–1497. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1650-0>

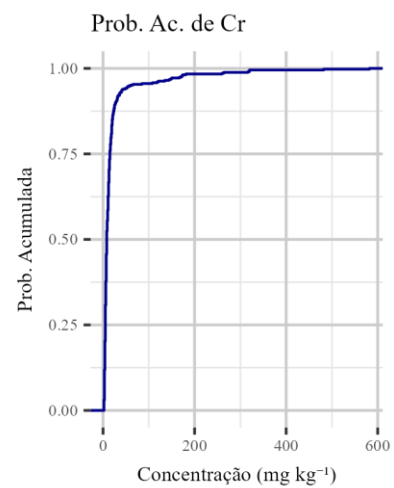
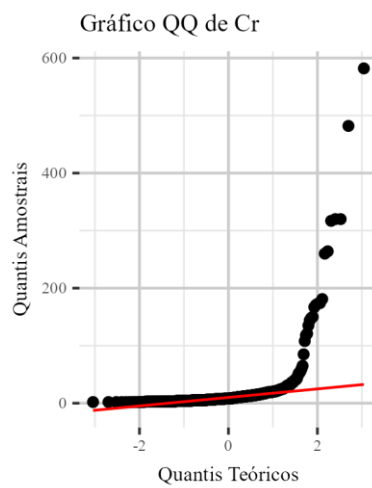
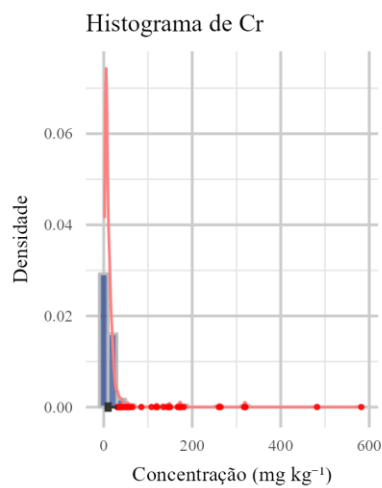
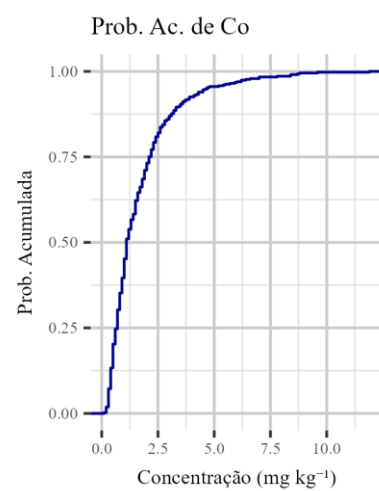
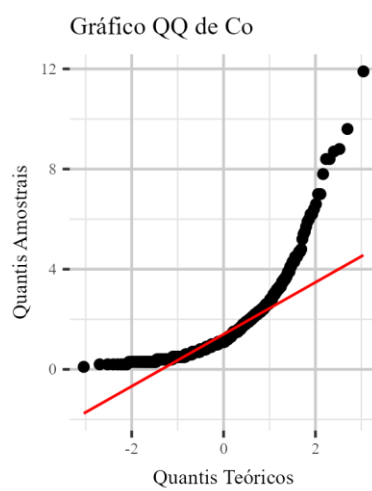
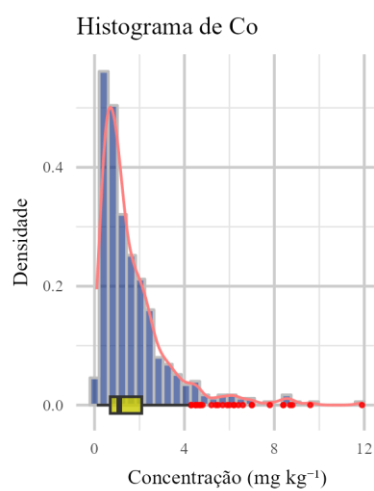
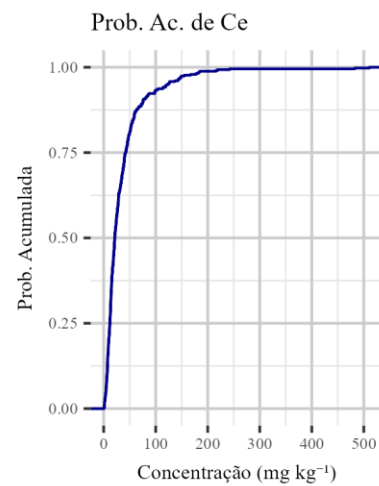
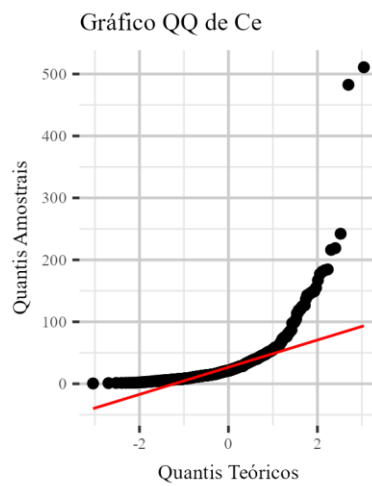
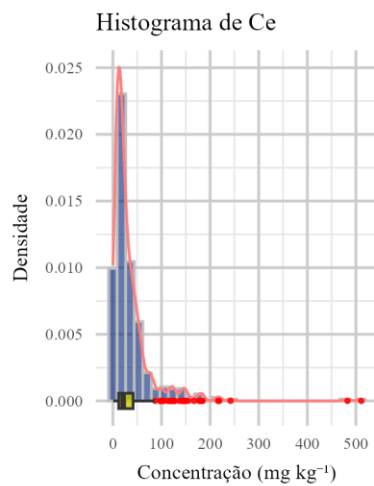
APÊNDICE A - HISTOGRAMAS, GRÁFICOS QQ E PROBABILIDADE ACUMULADA PARA DADOS TRANSFORMADOS EM LOG E CLR

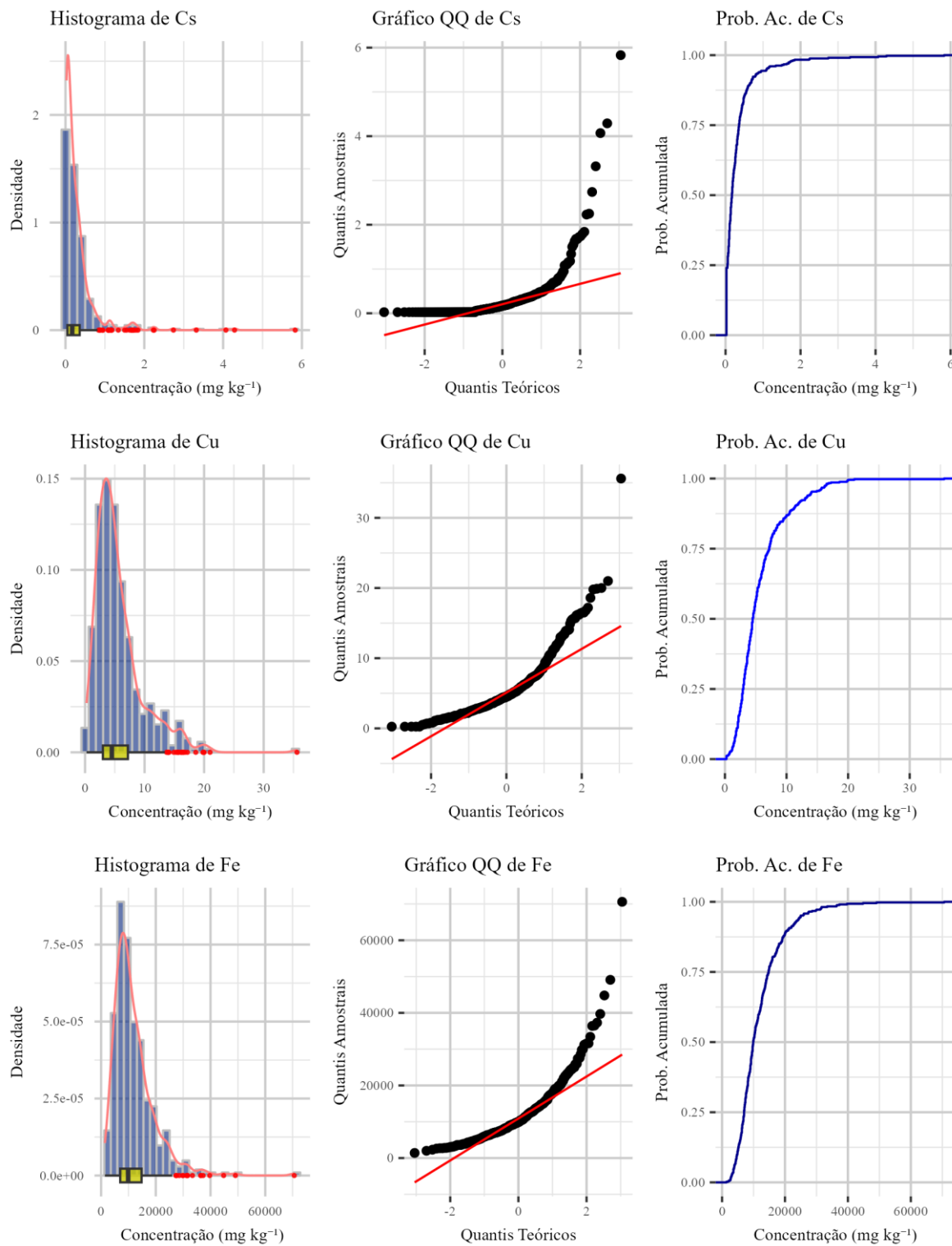
Dados brutos

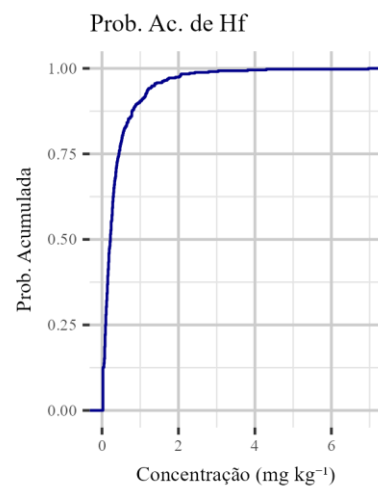
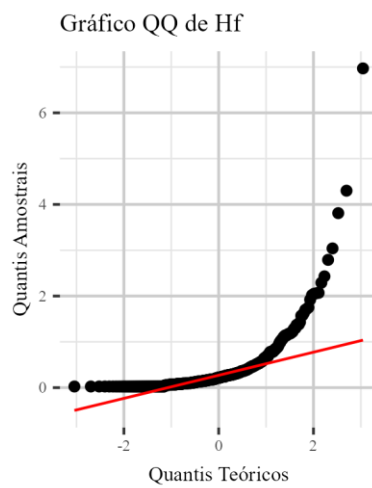
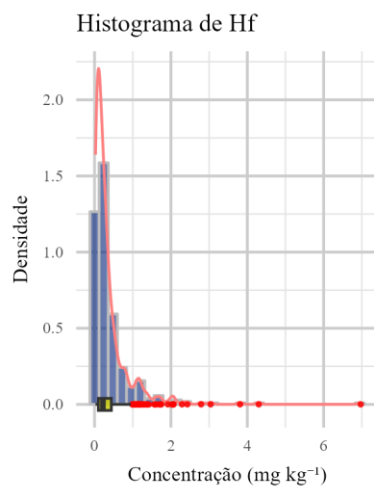
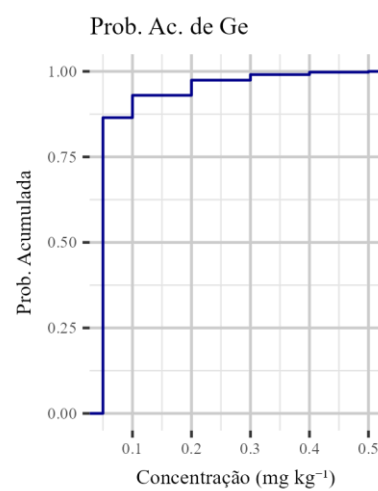
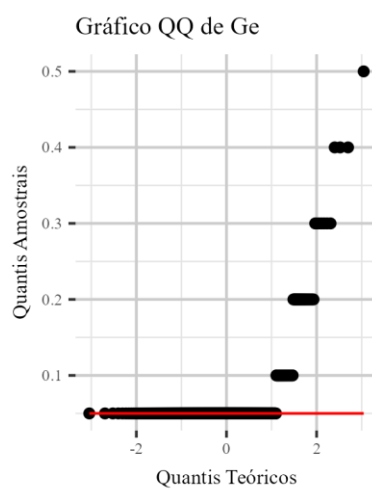
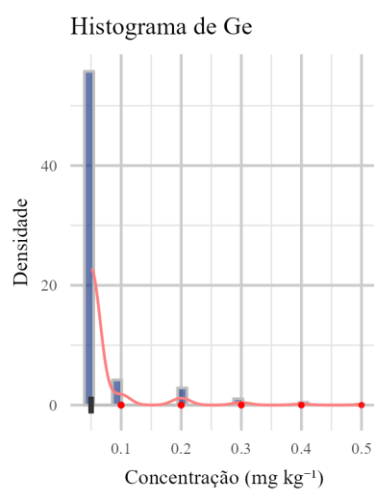
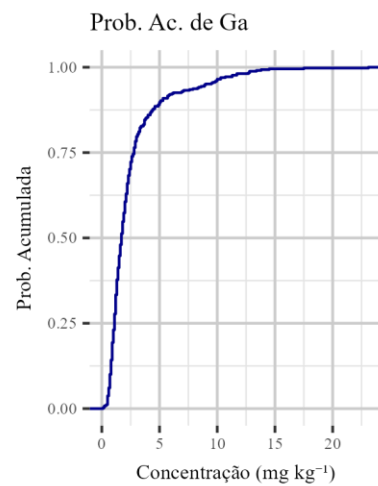
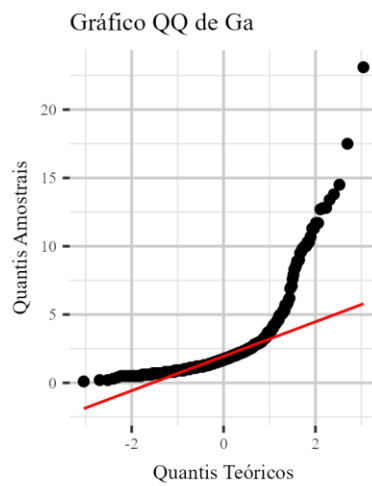
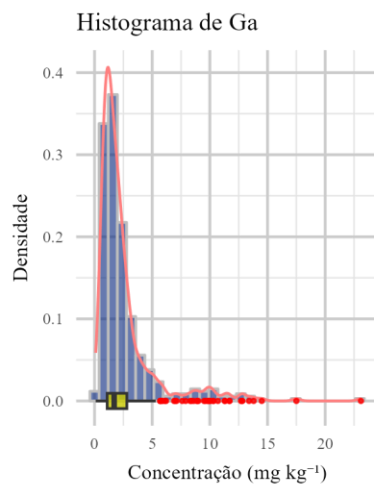


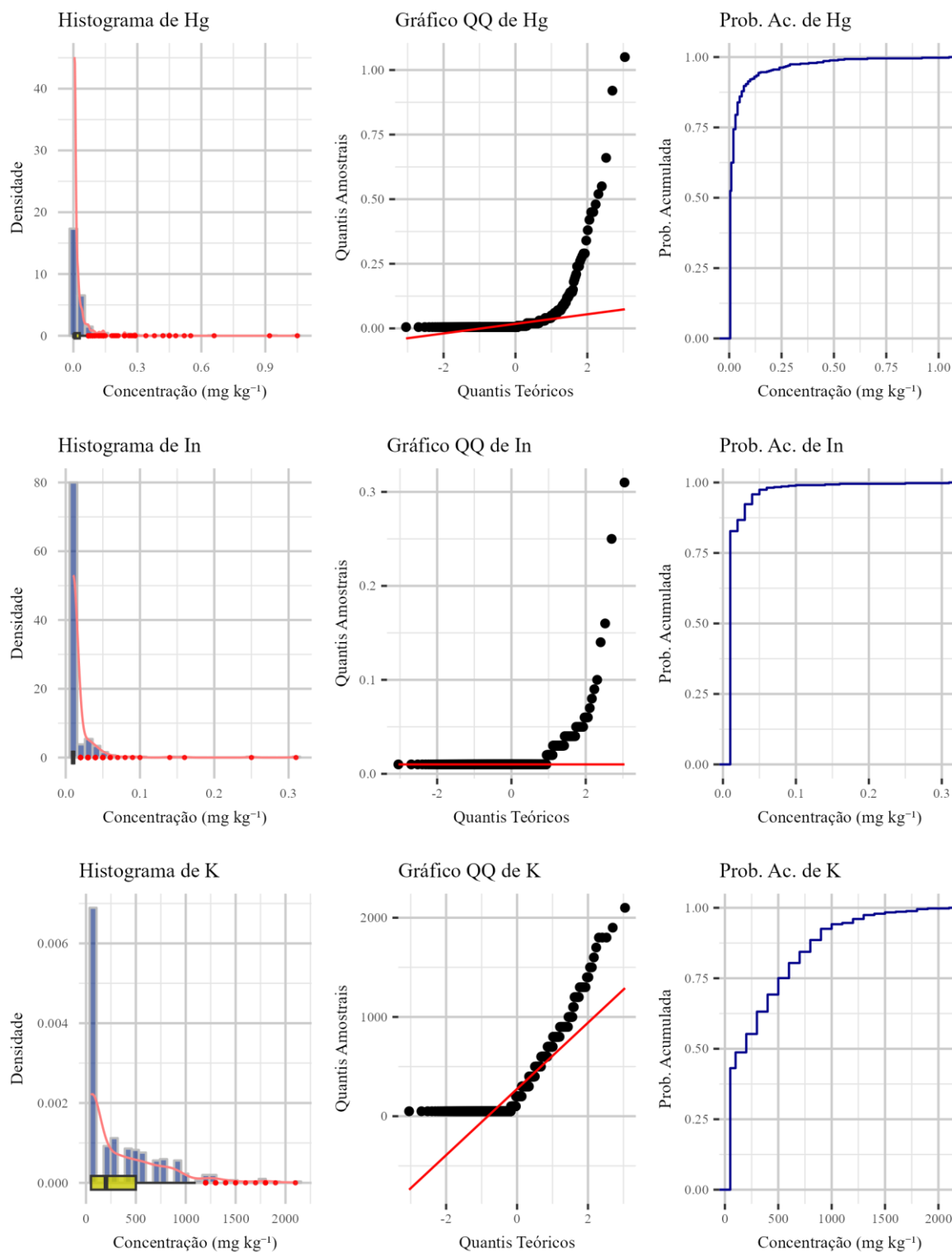


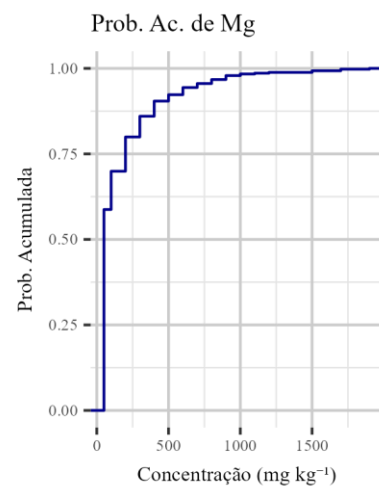
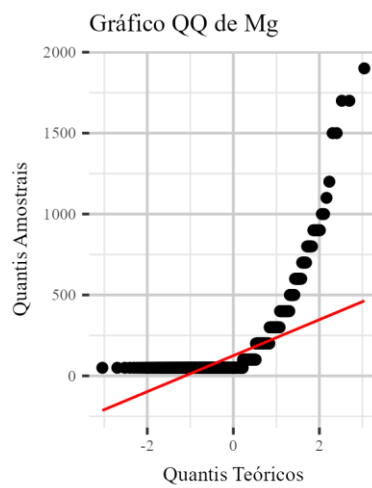
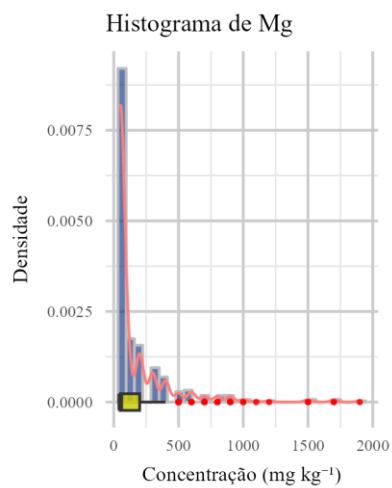
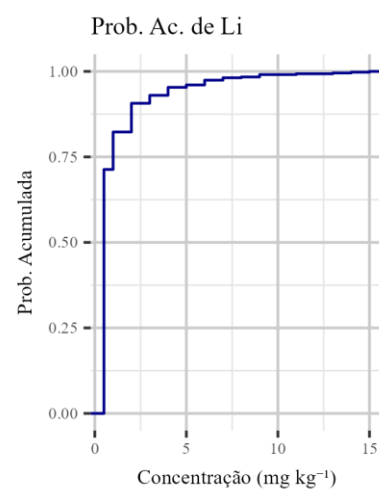
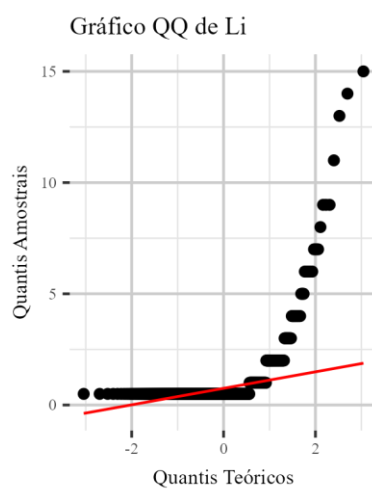
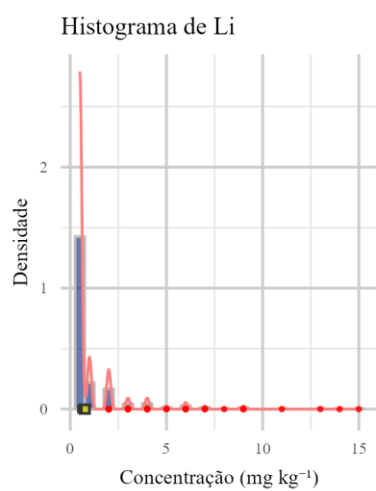
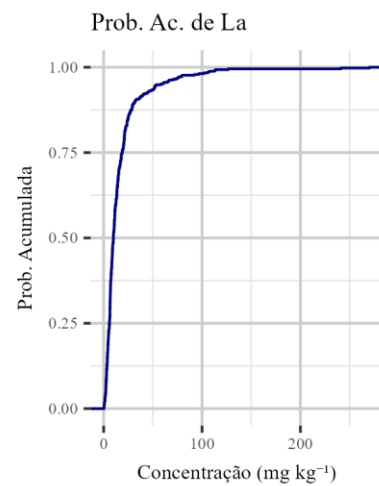
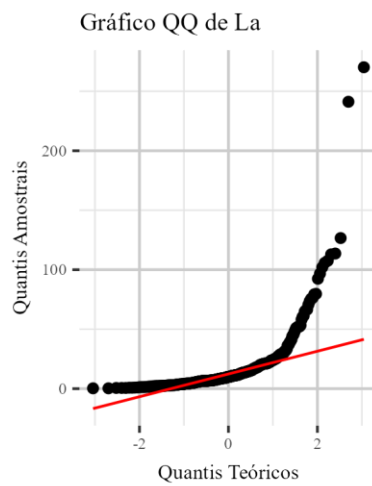
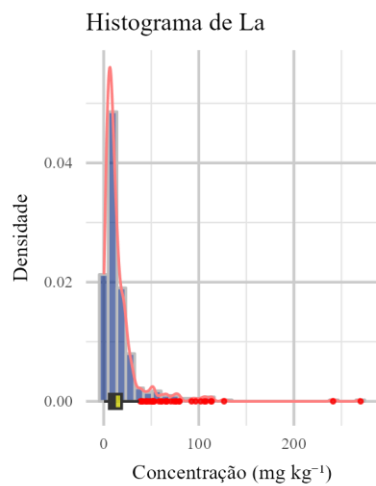


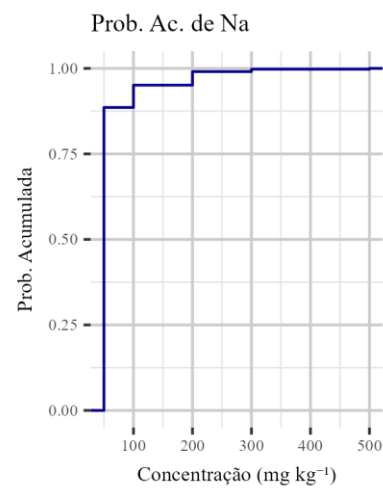
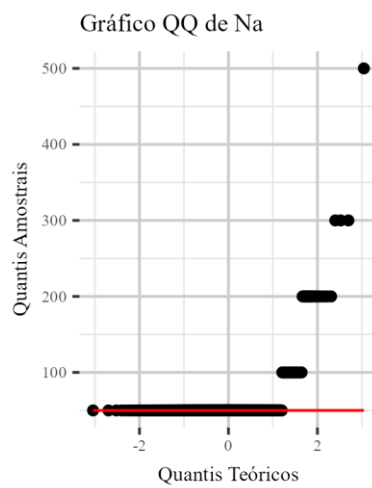
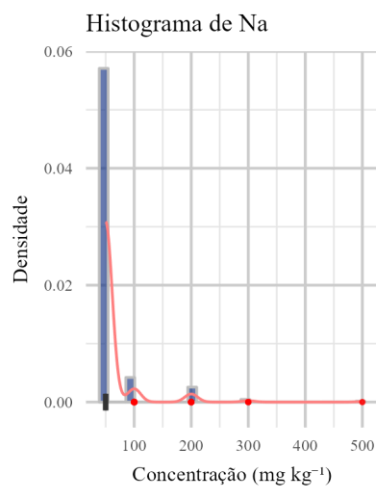
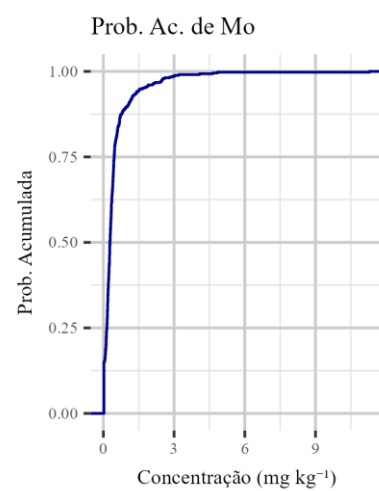
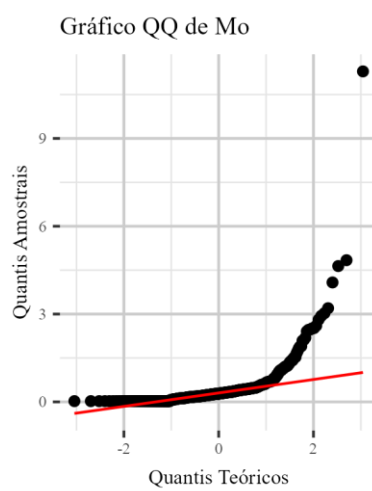
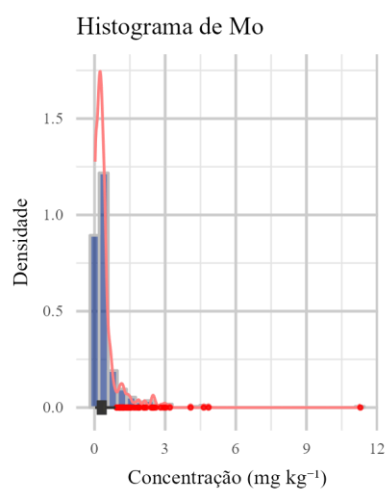
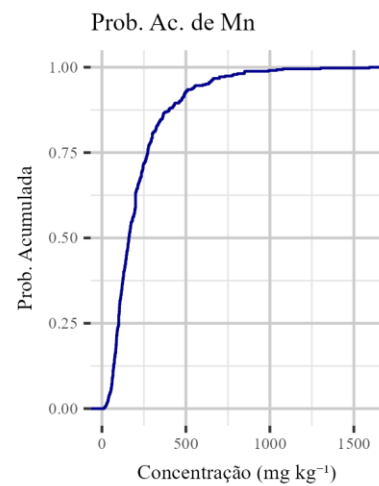
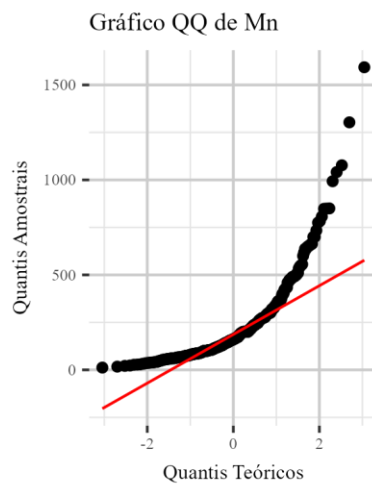
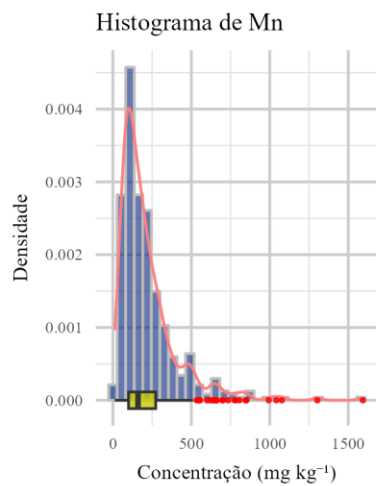


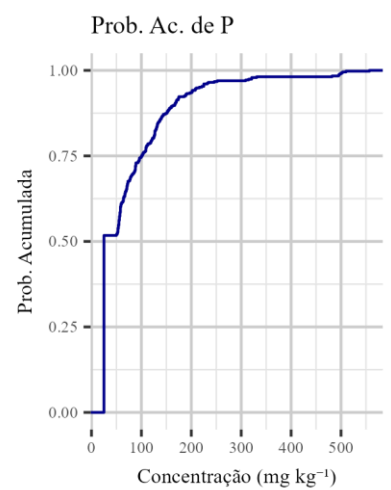
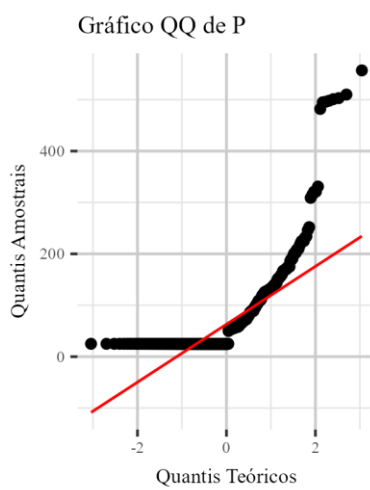
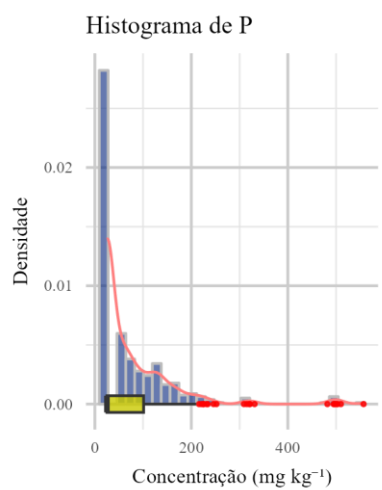
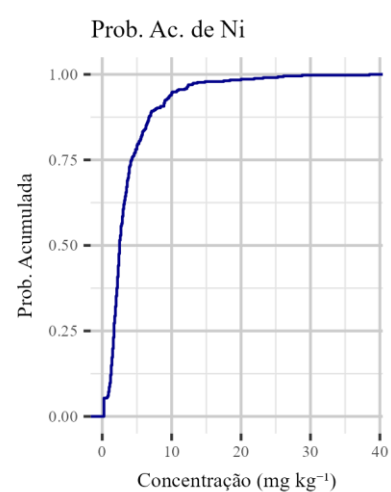
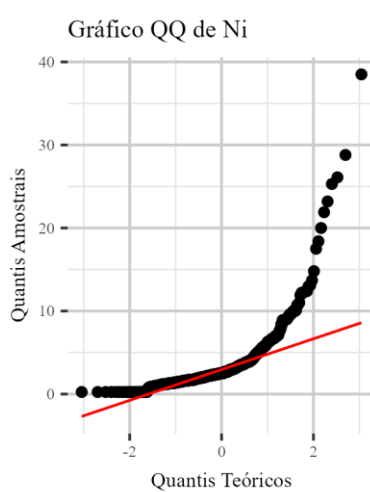
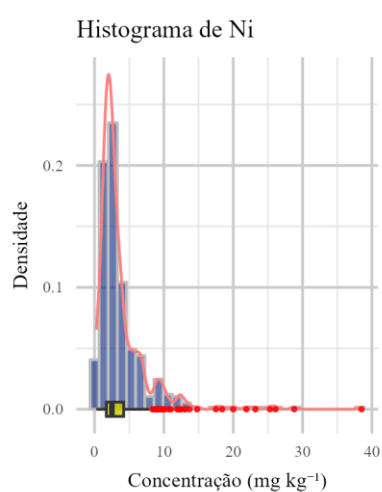
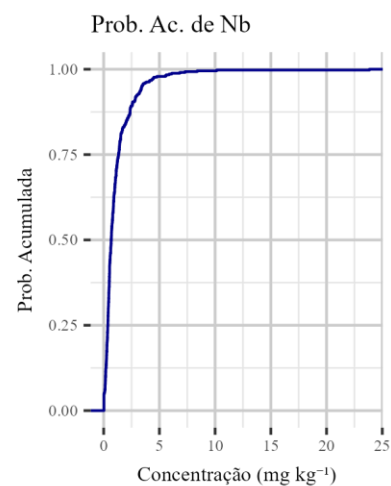
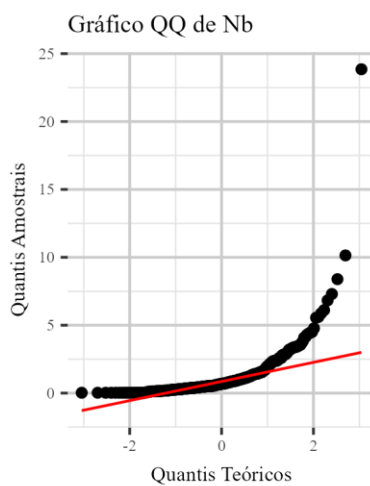
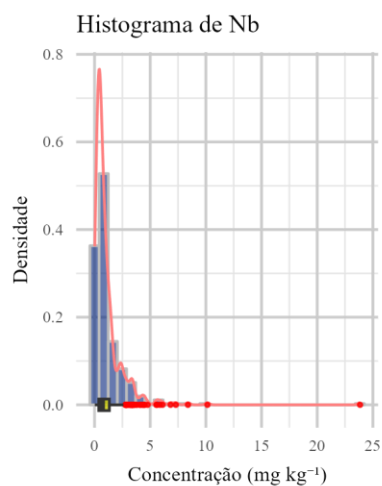


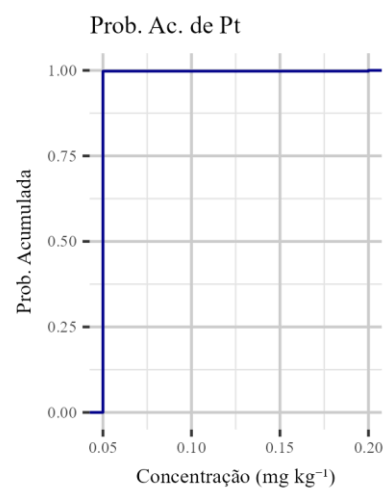
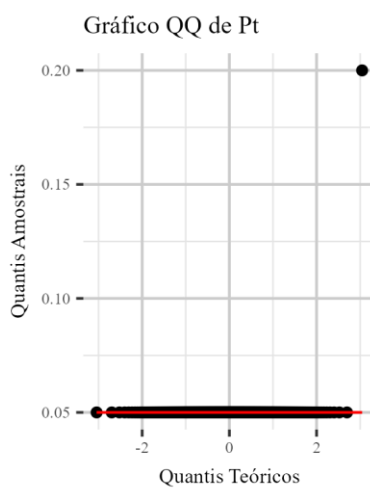
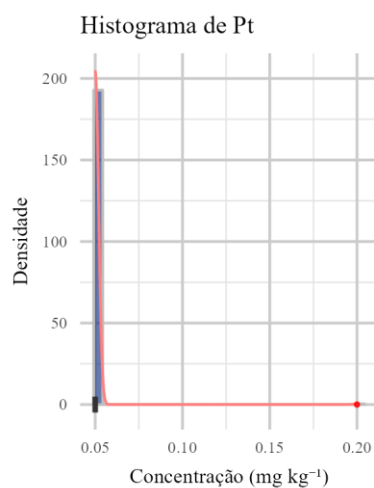
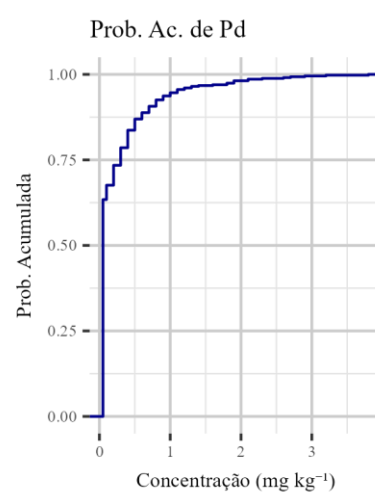
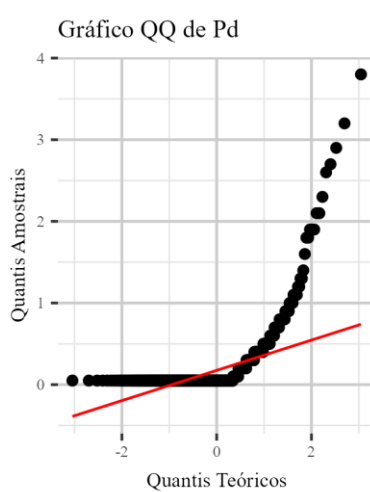
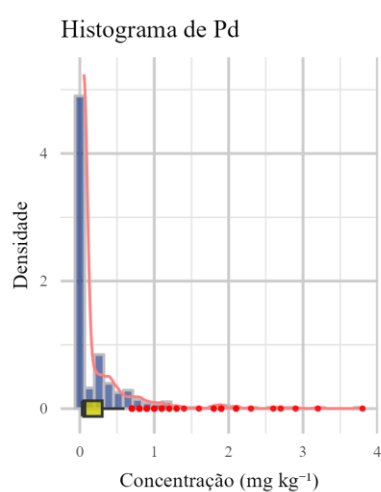
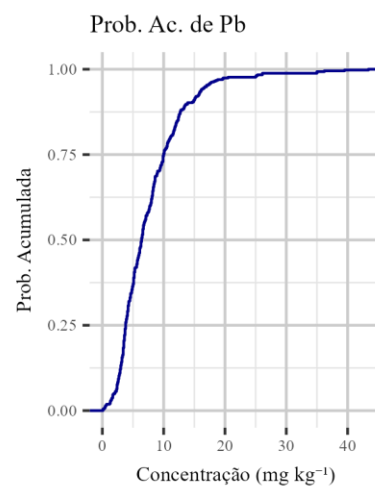
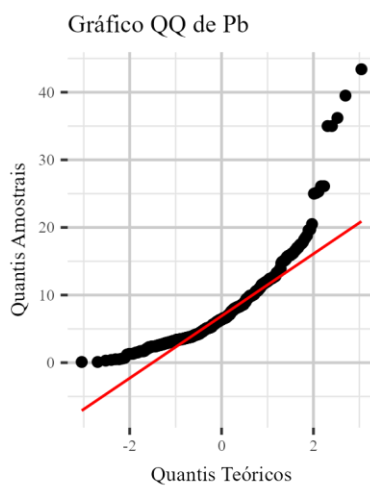
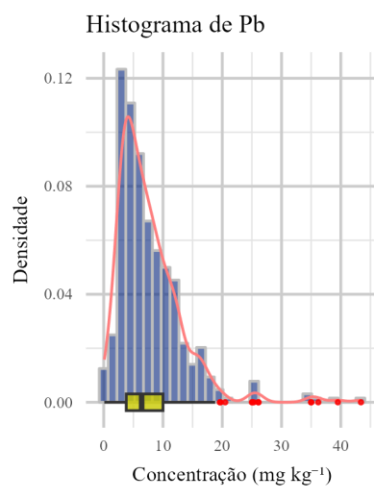


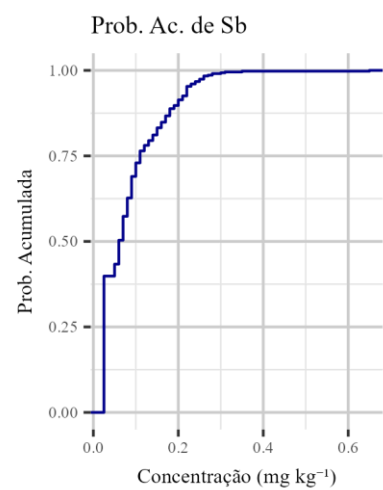
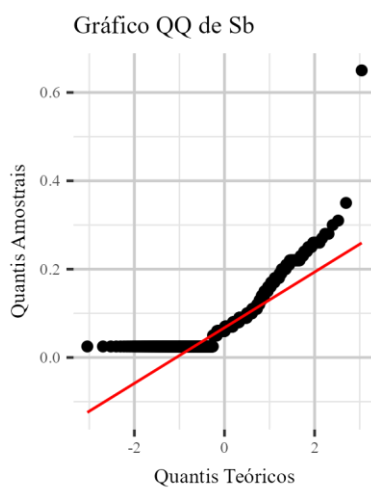
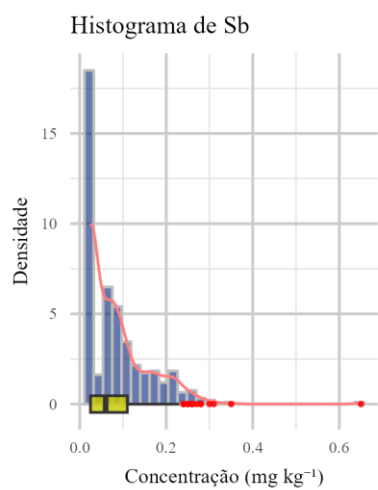
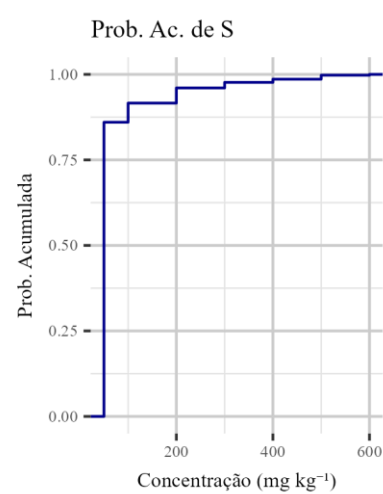
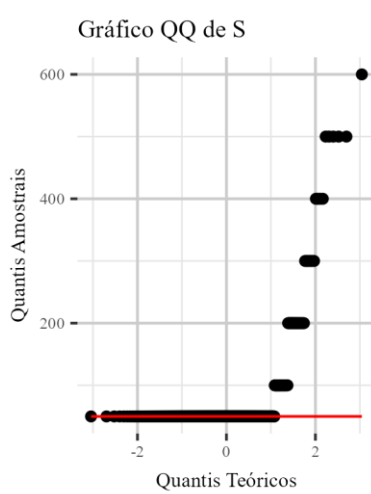
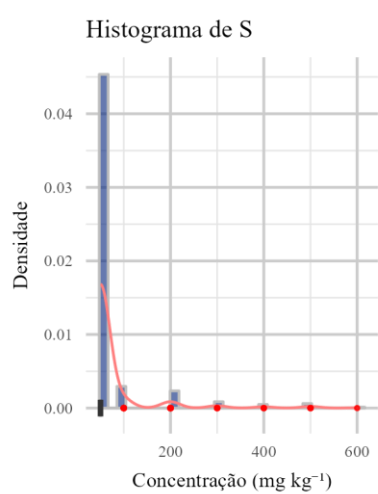
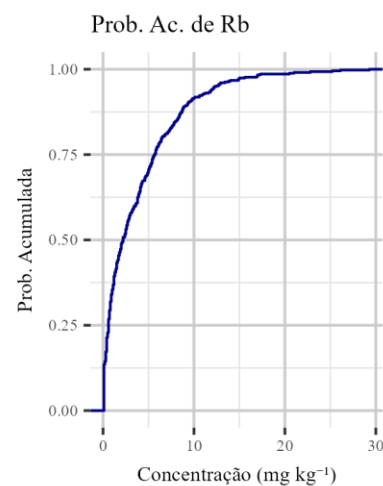
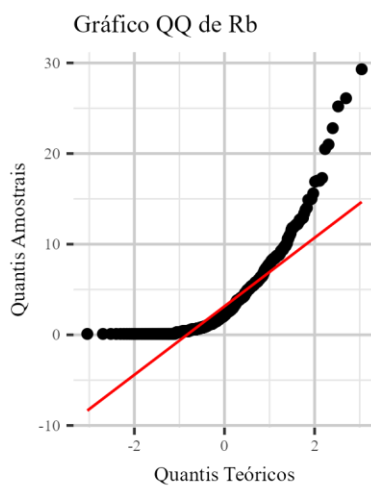
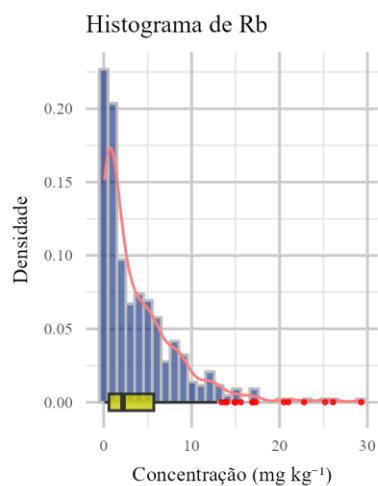


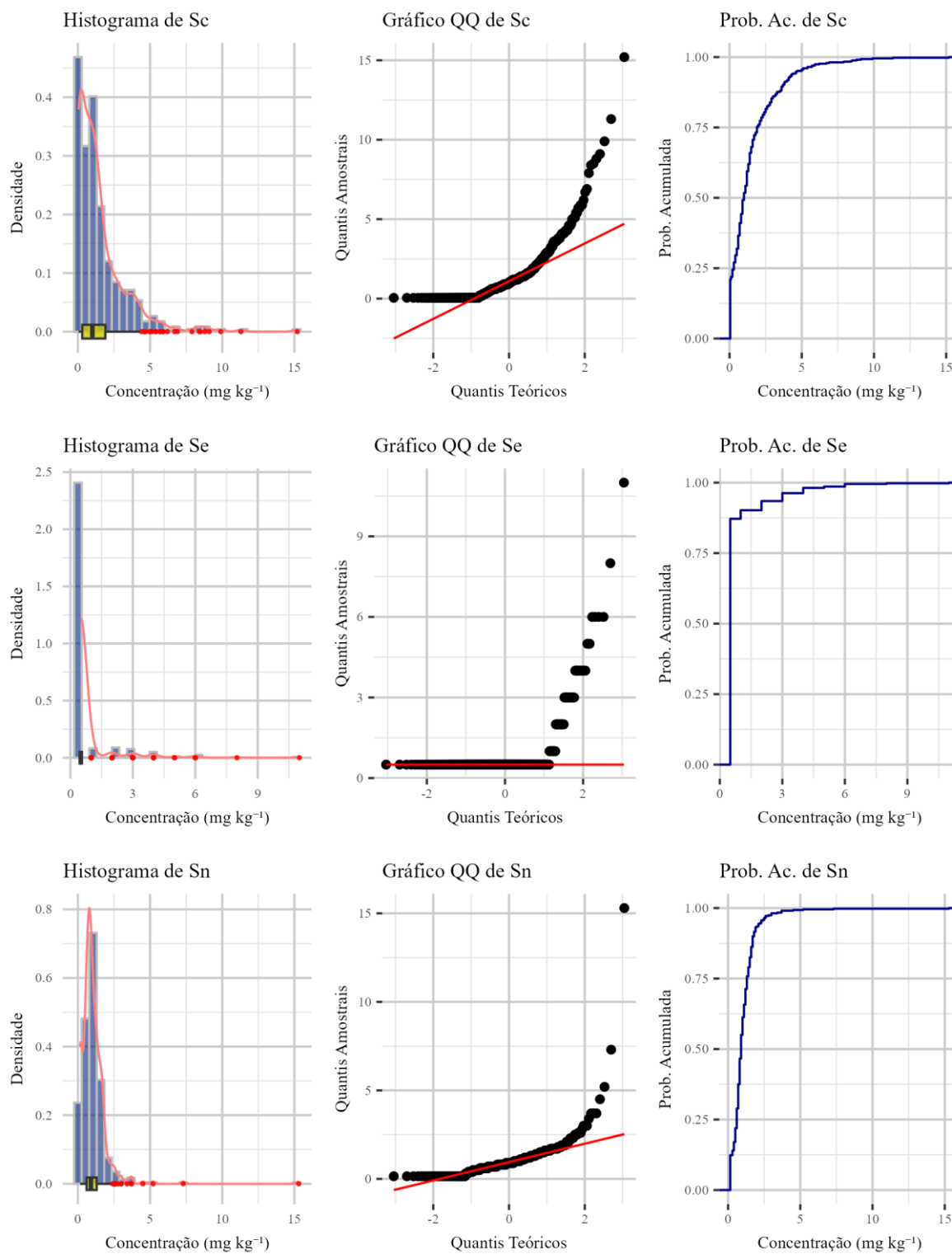


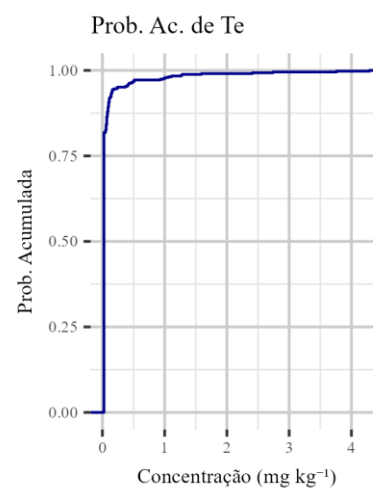
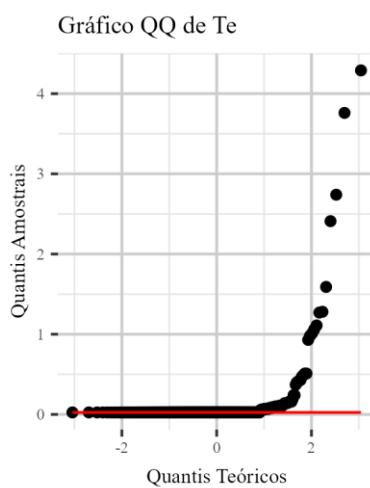
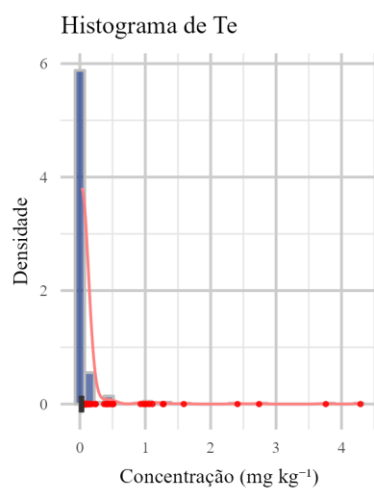
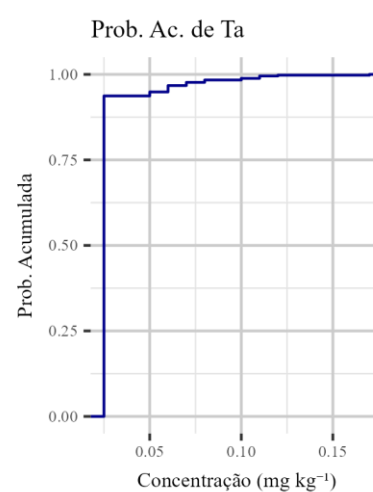
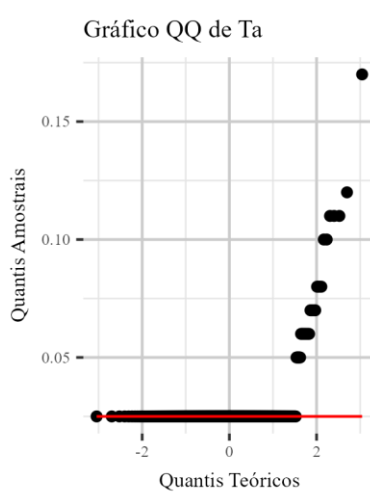
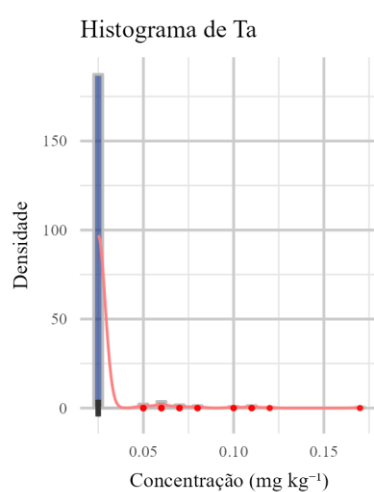
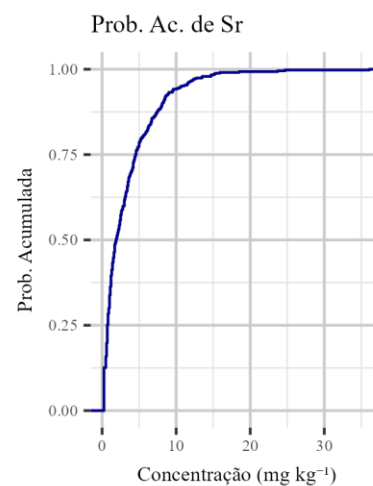
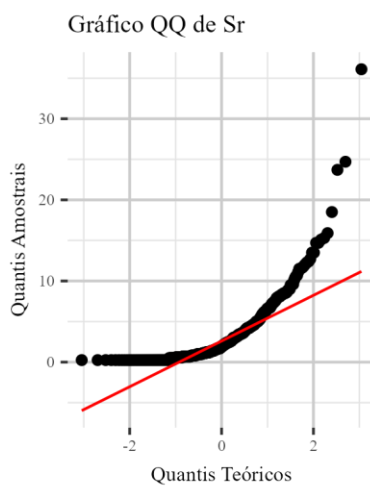
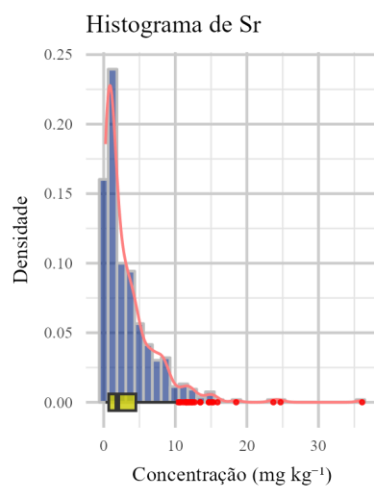


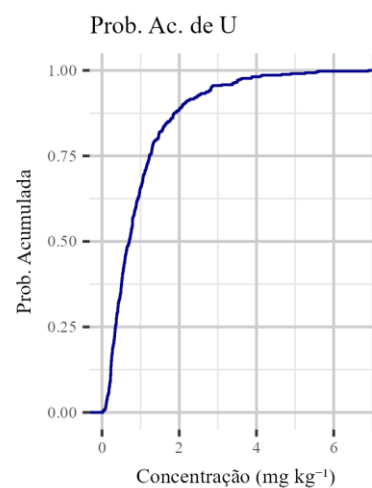
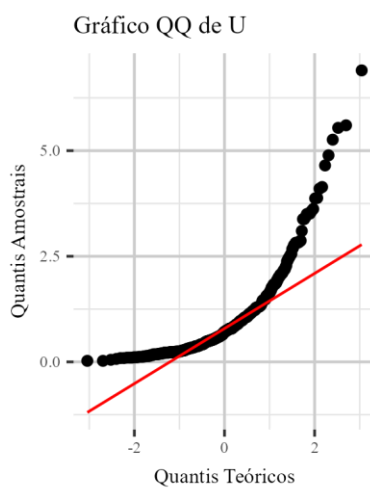
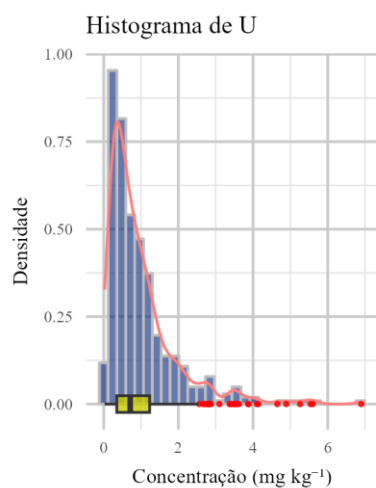
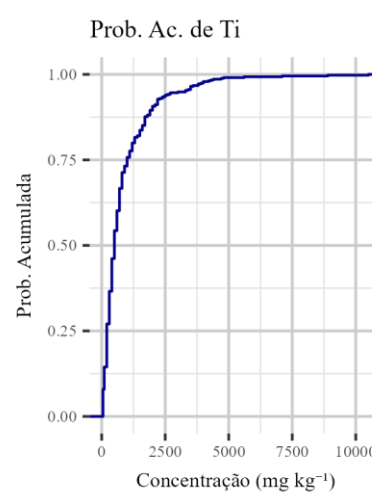
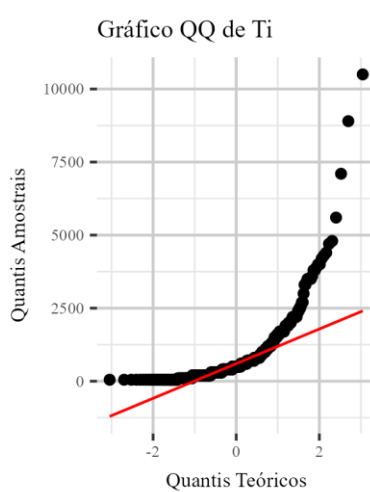
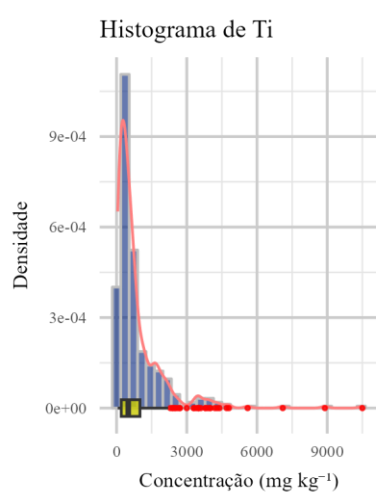
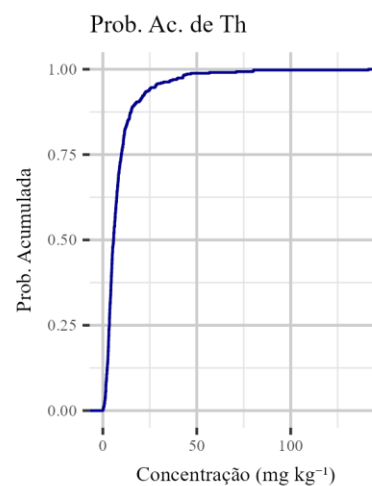
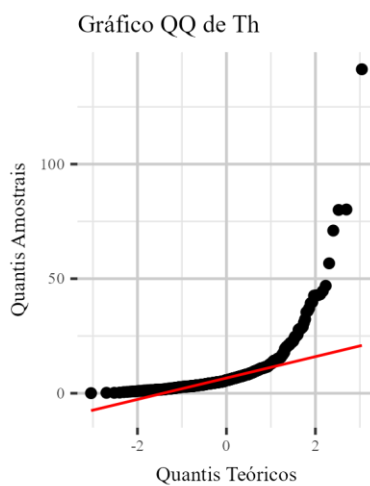
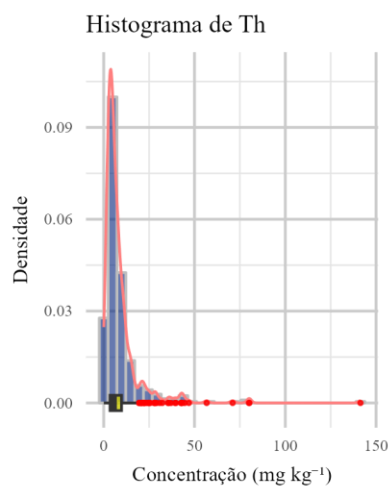


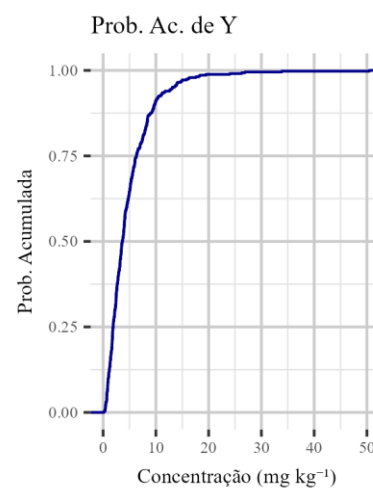
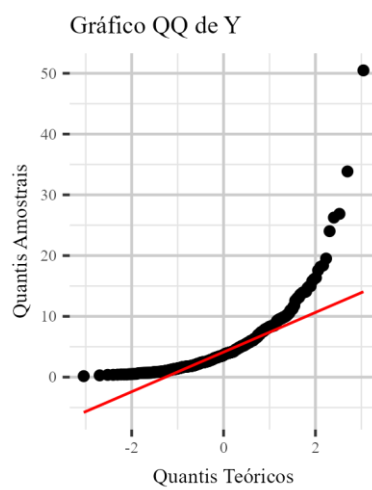
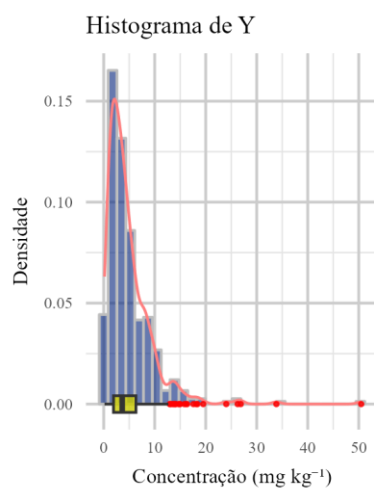
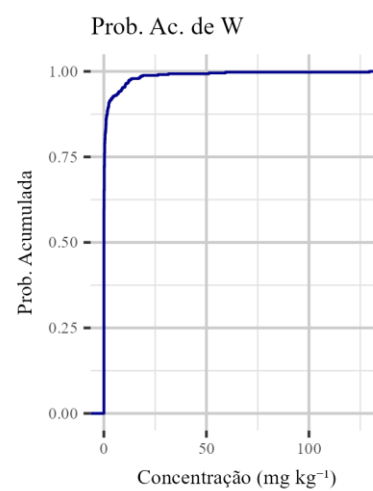
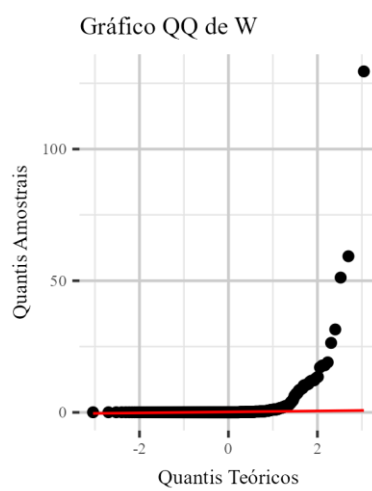
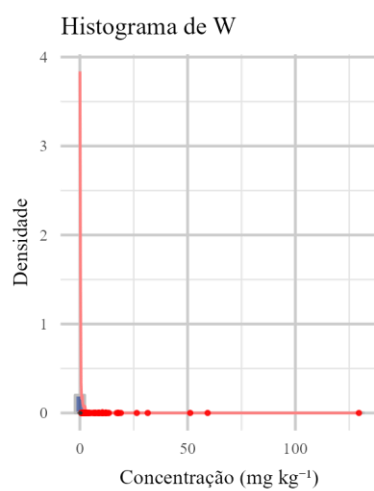
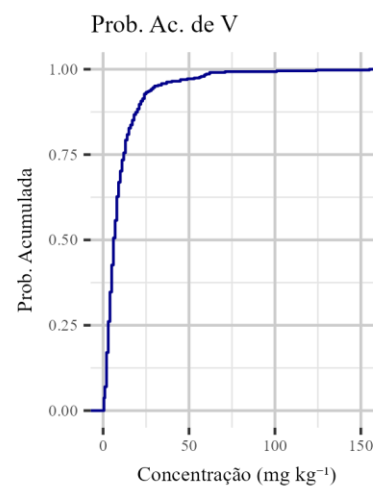
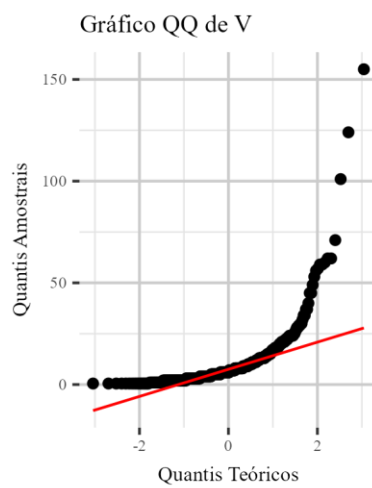
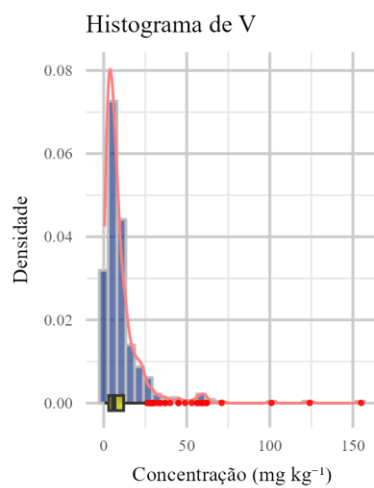


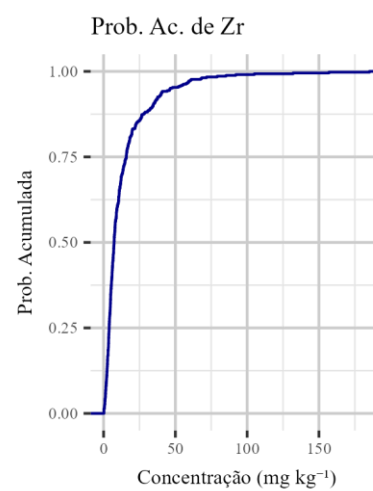
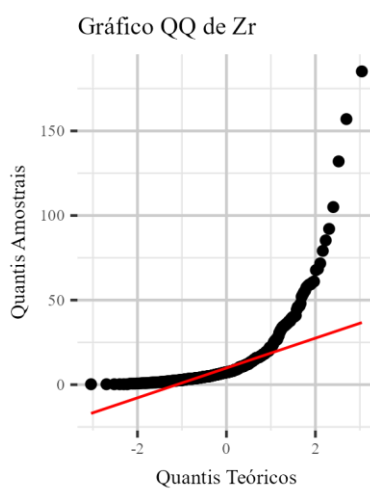
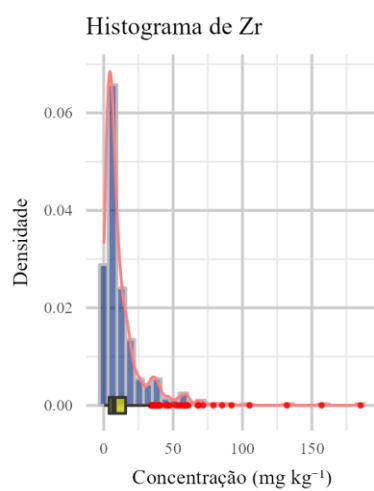
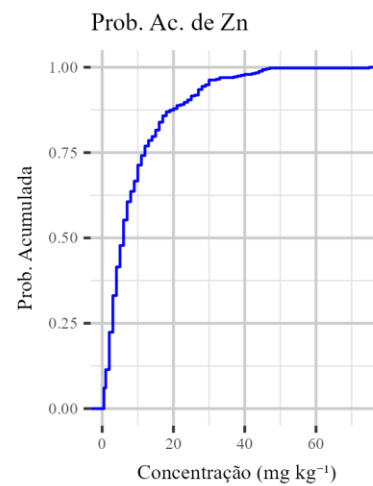
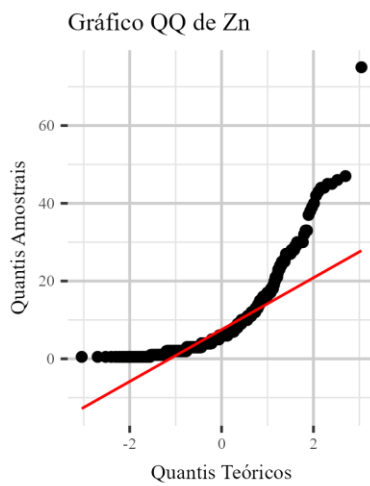
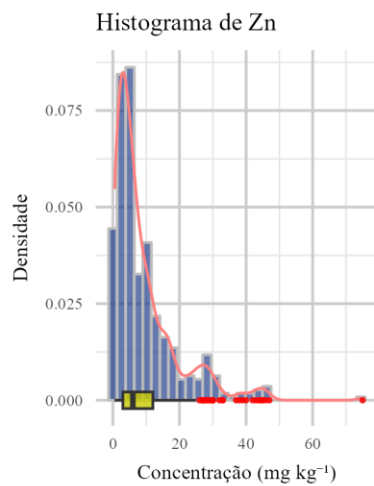




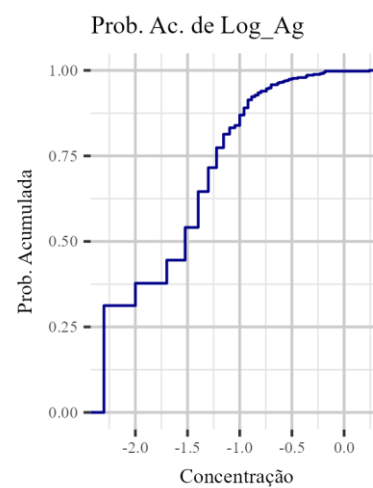
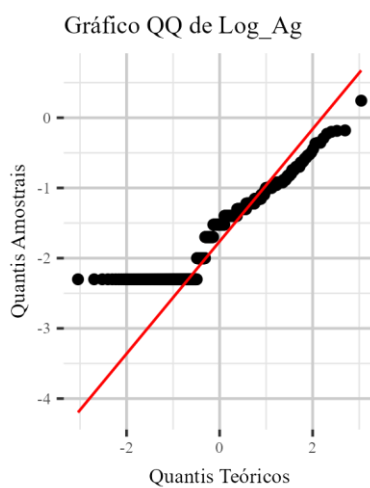
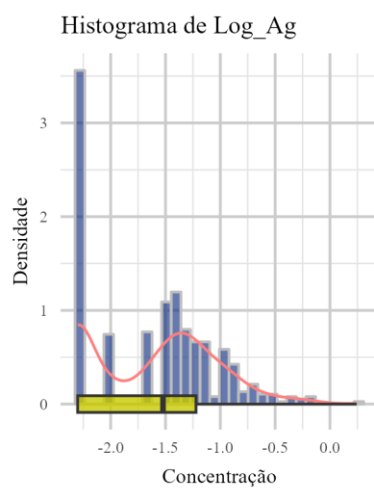


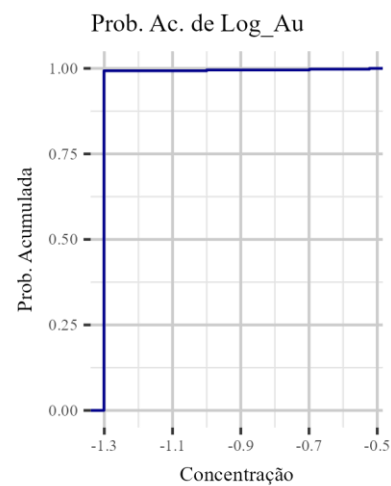
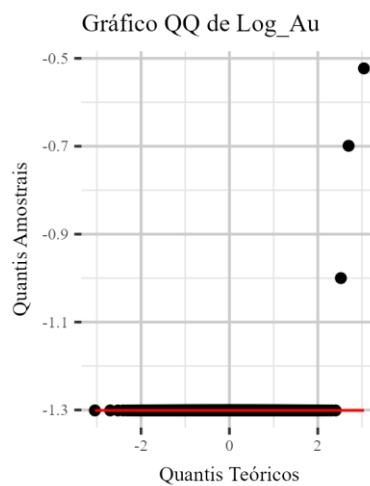
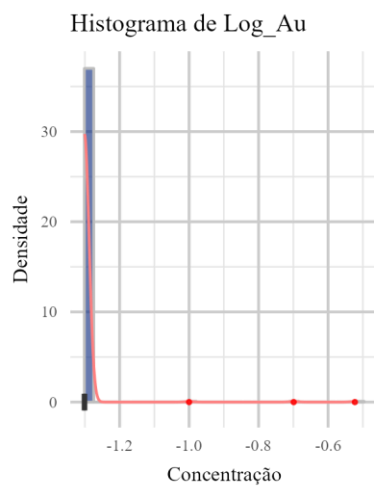
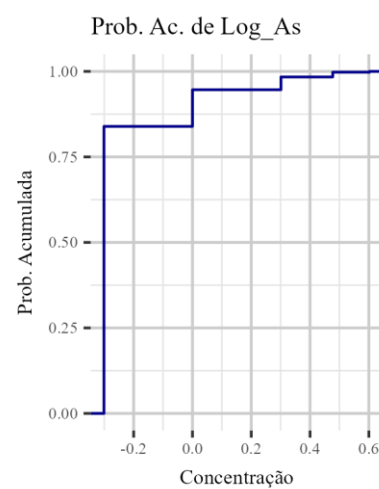
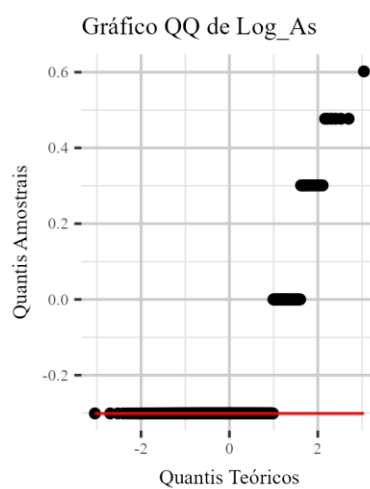
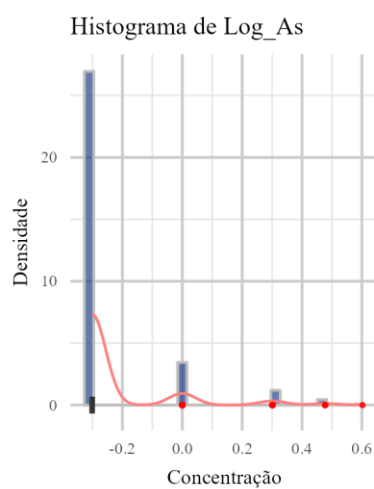
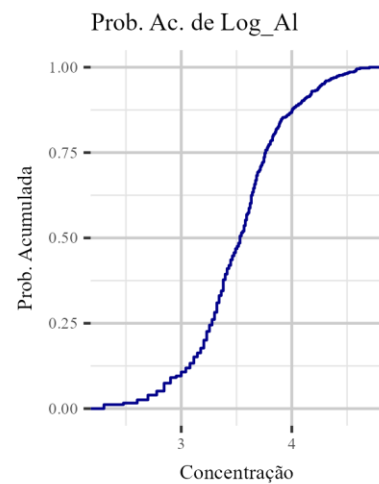
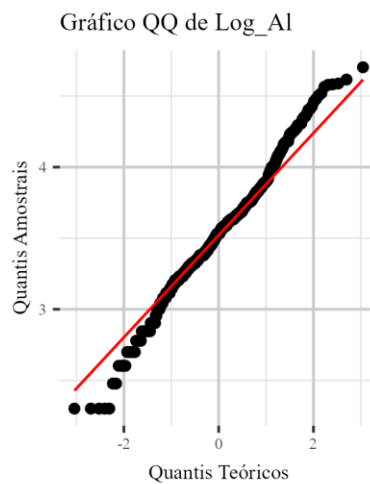
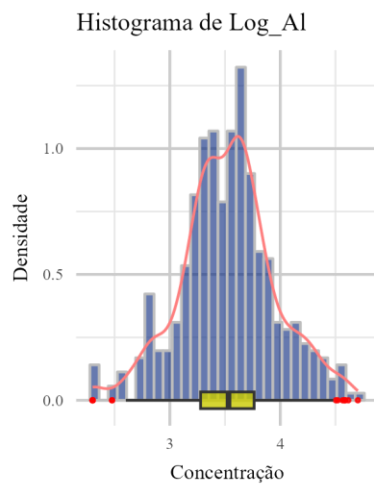


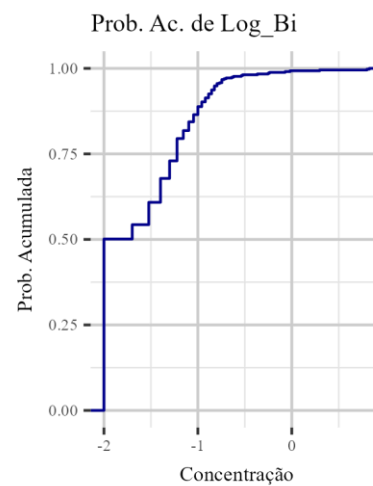
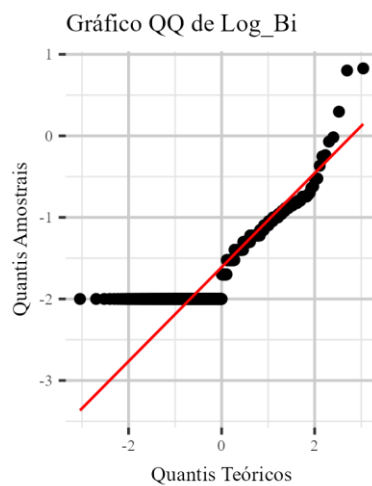
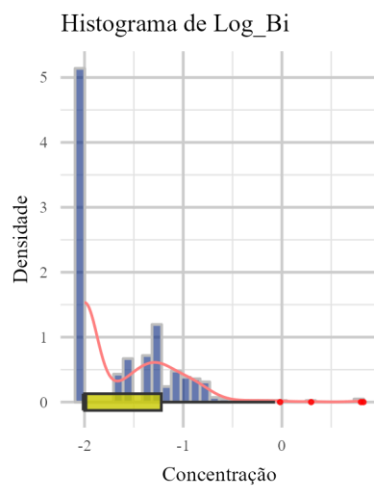
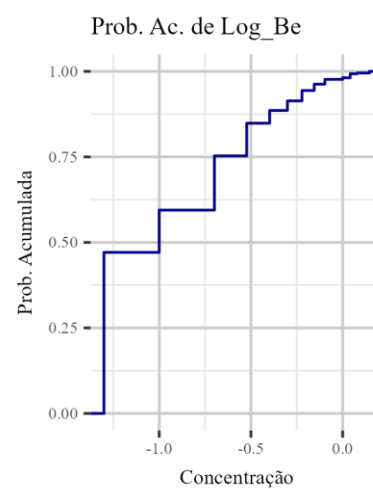
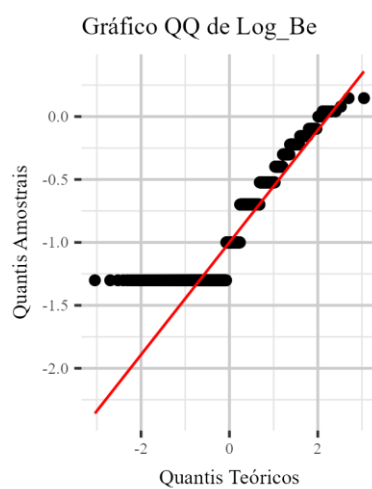
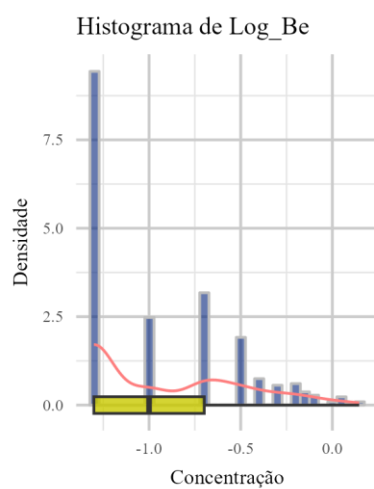
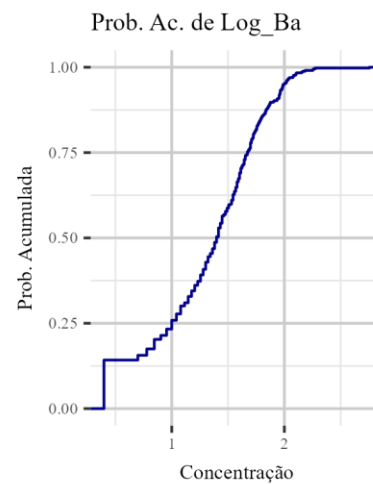
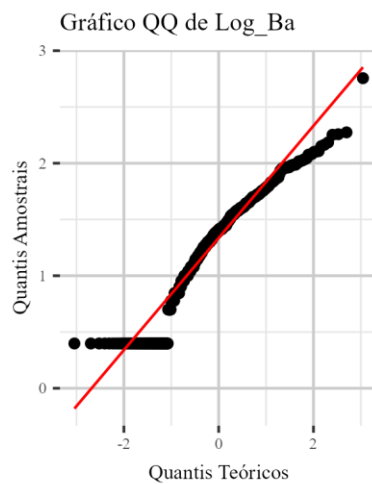
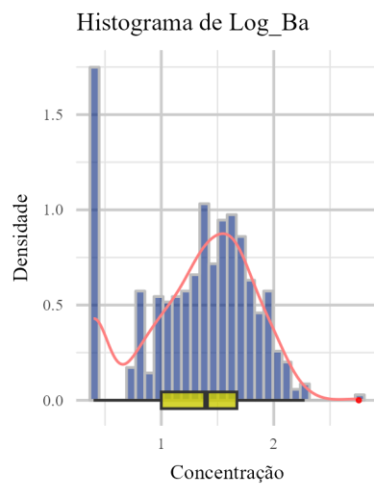


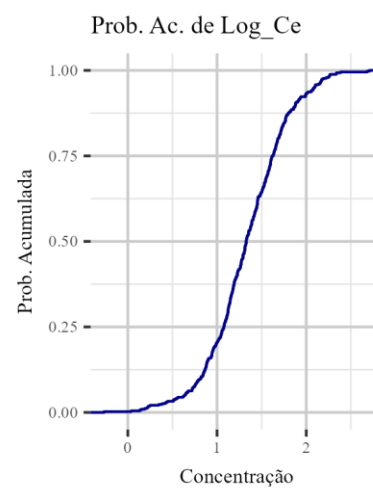
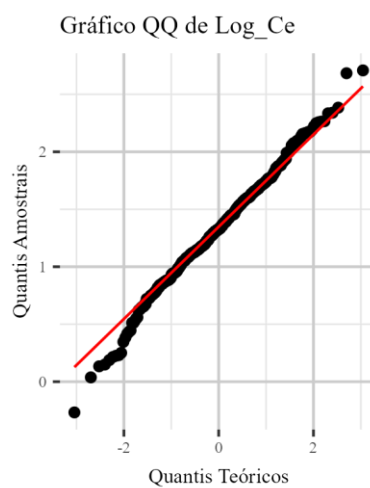
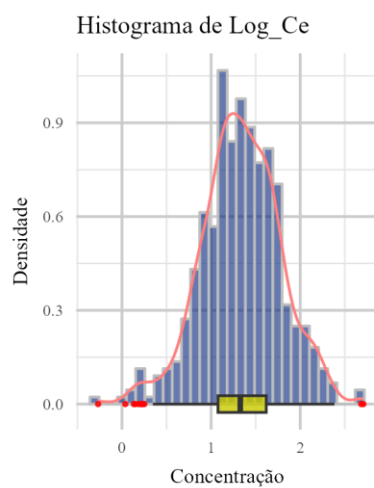
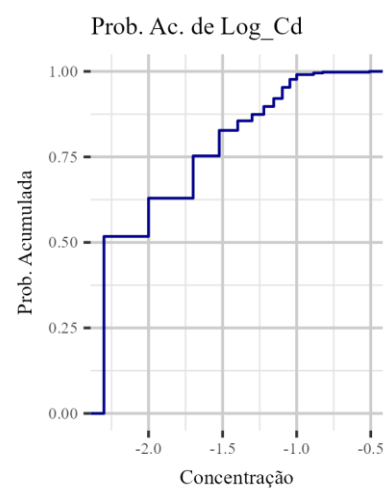
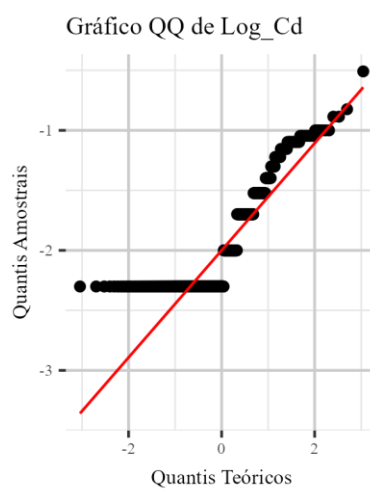
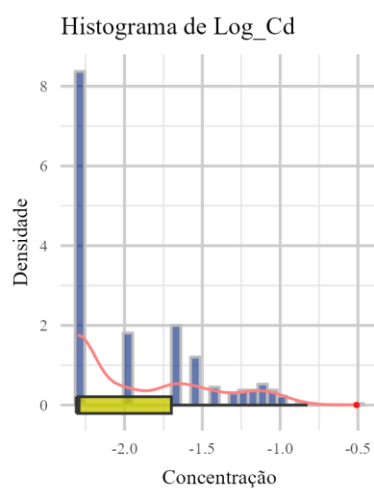
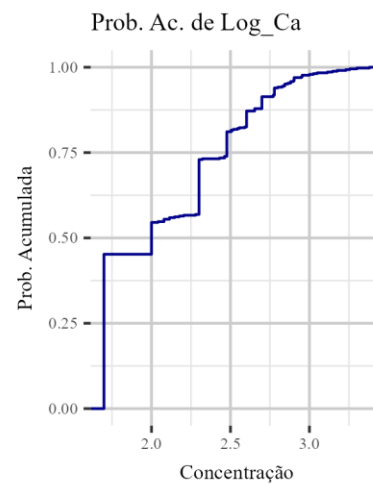
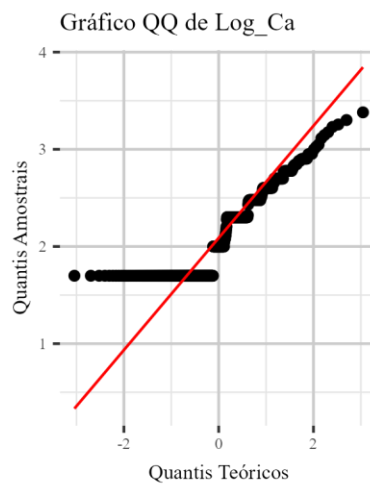
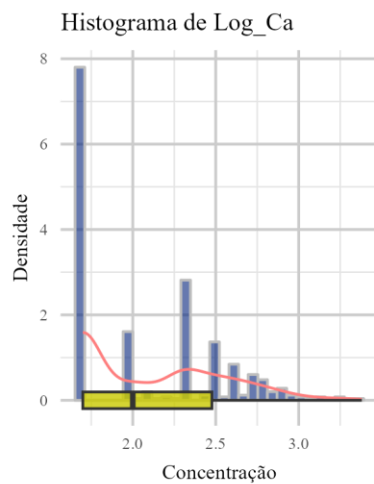


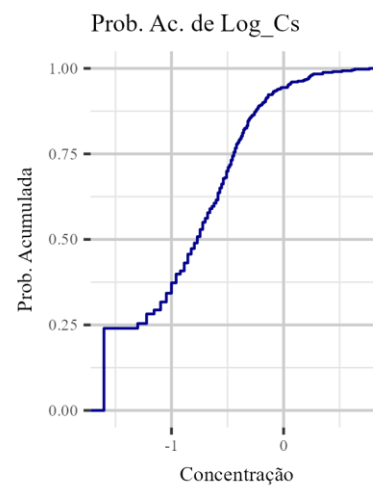
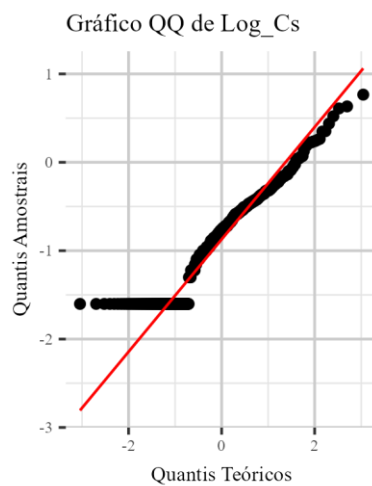
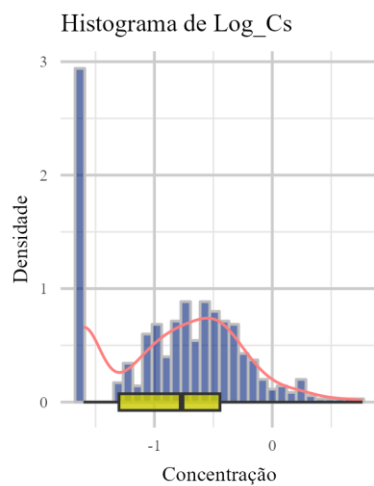
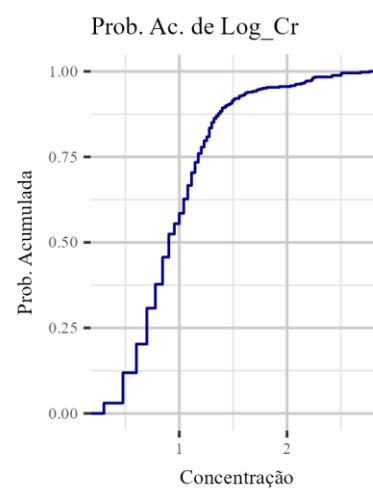
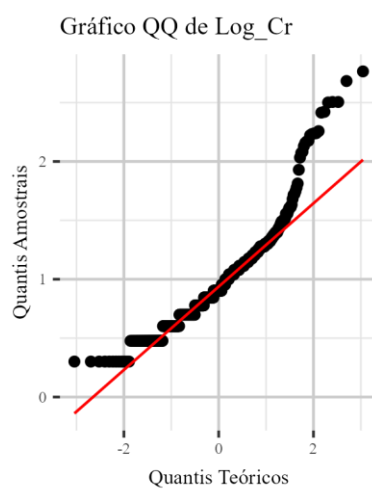
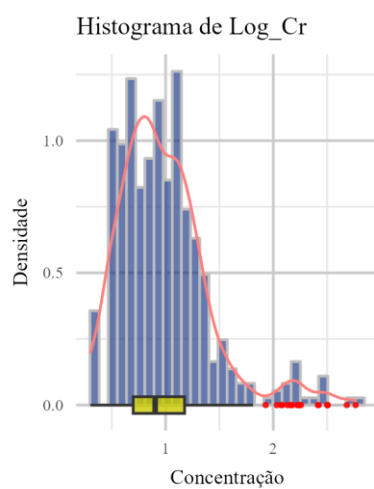
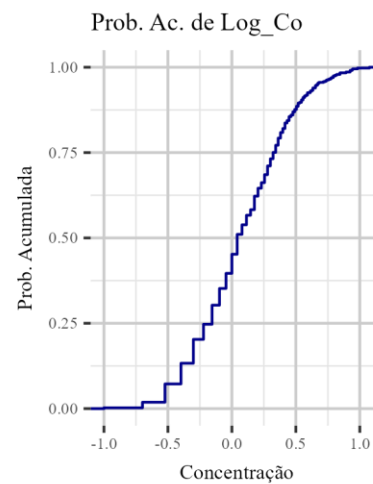
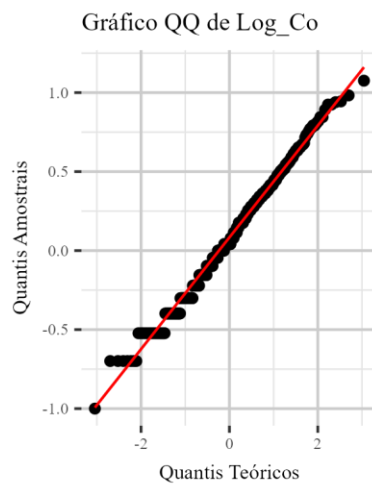
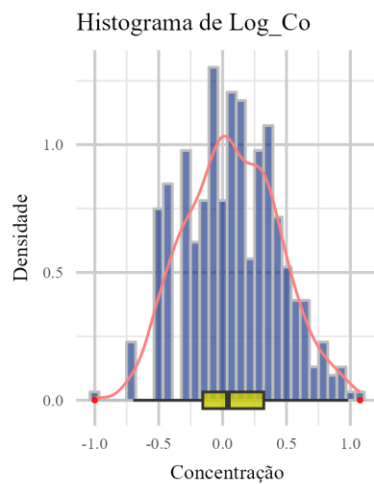
Dados Log-transformados

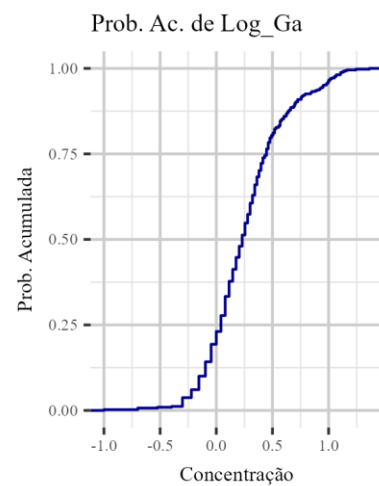
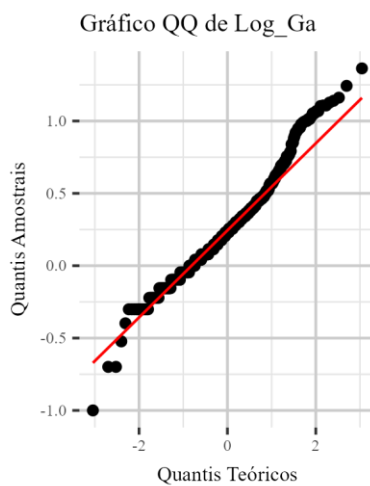
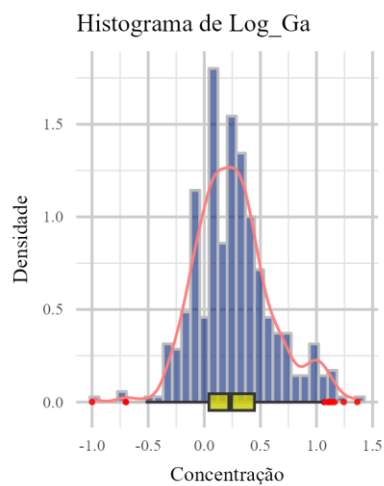
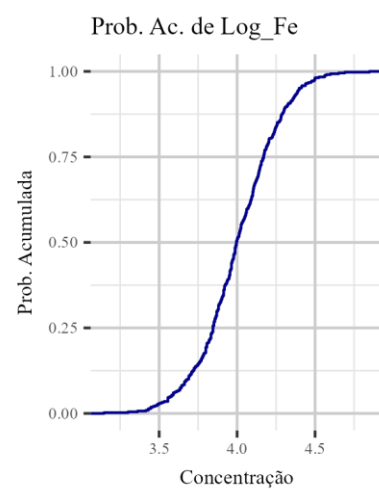
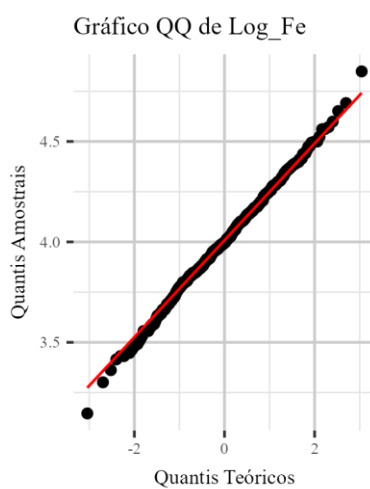
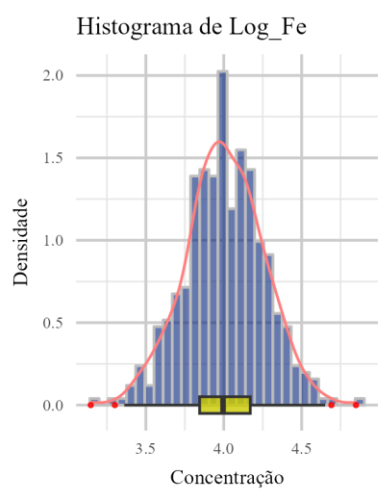
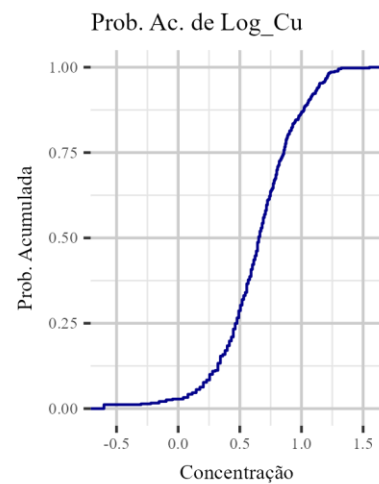
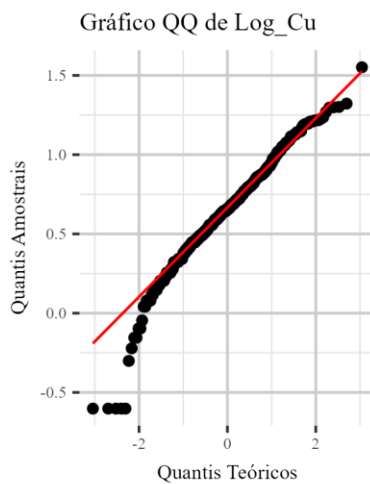
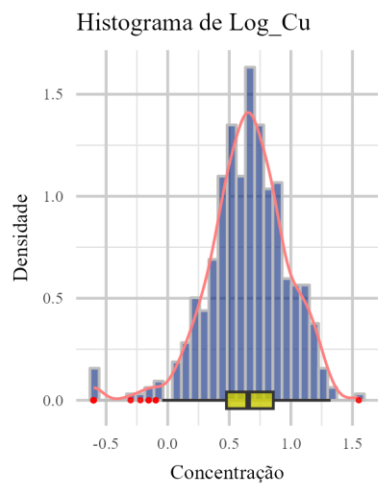


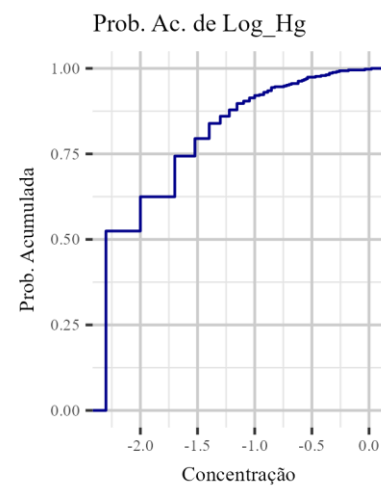
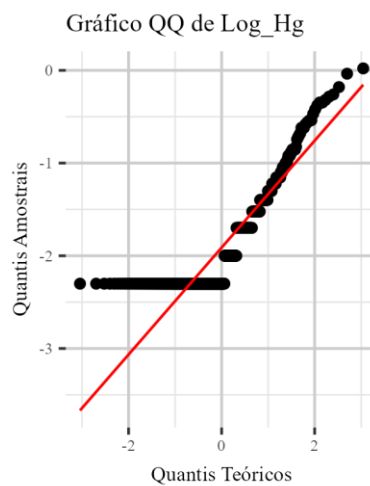
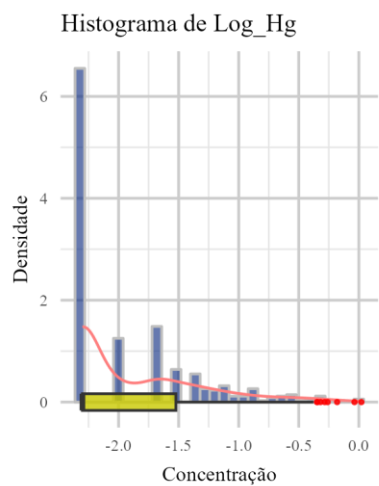
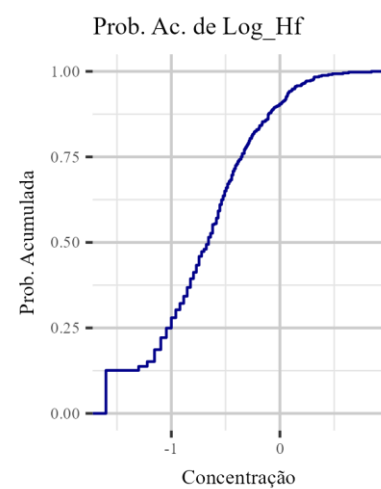
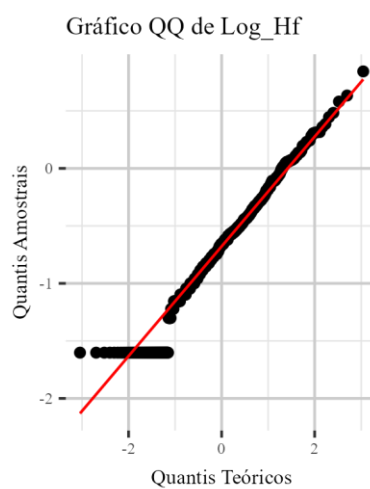
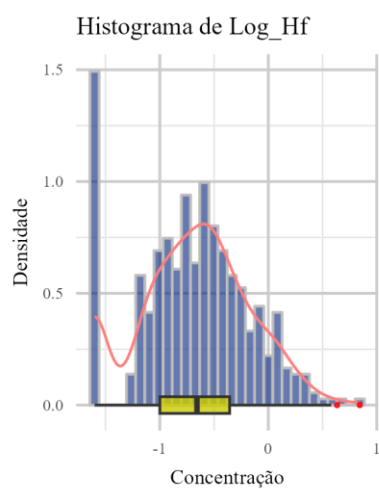
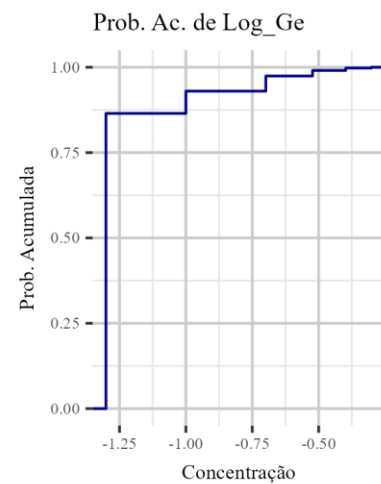
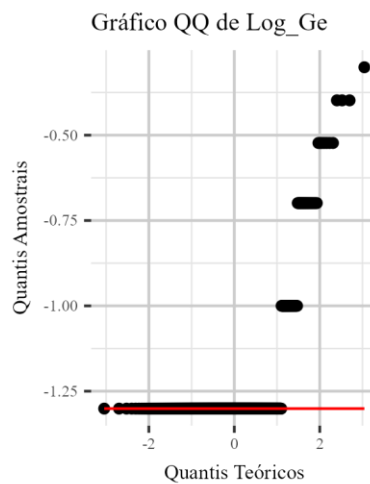
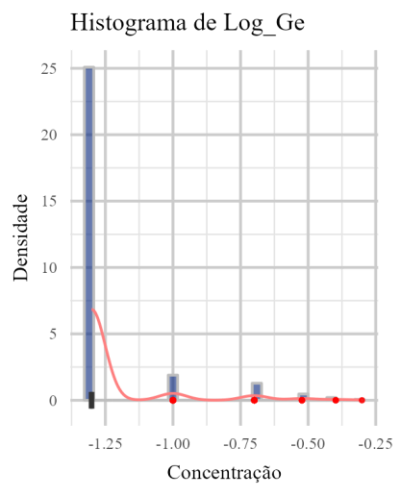


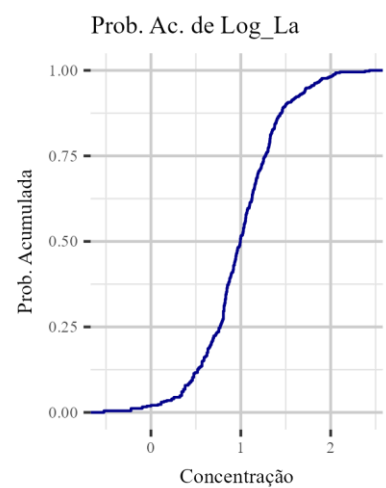
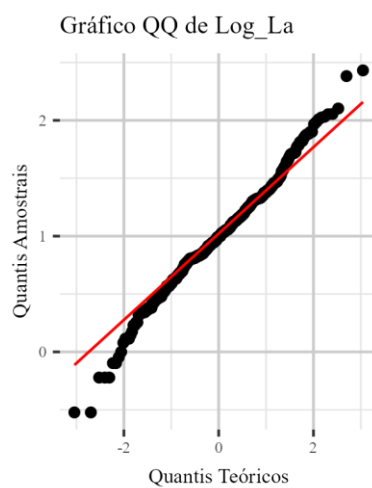
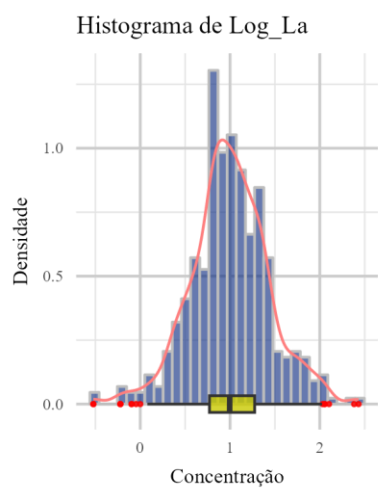
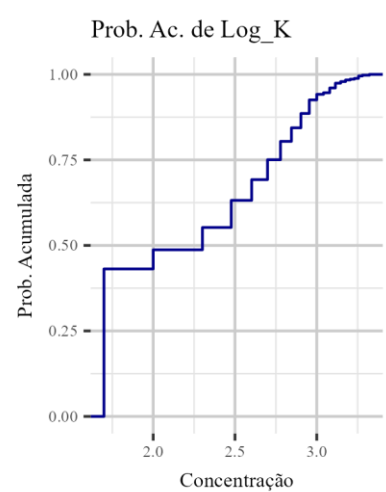
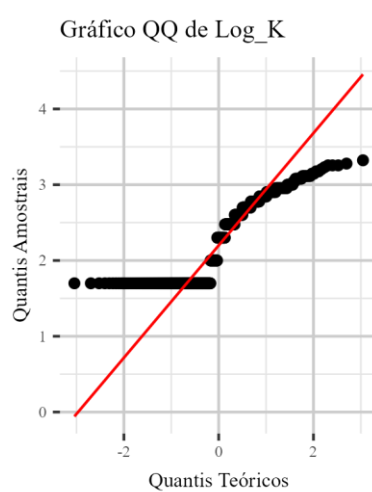
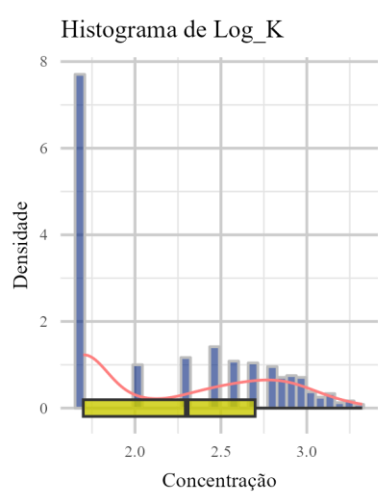
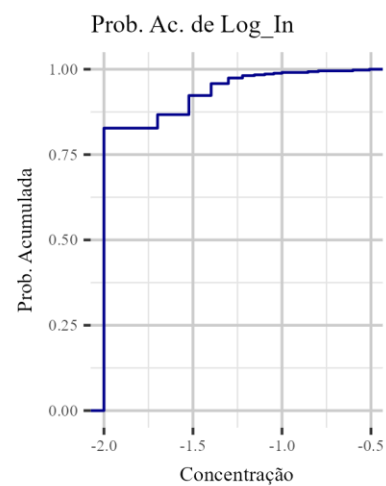
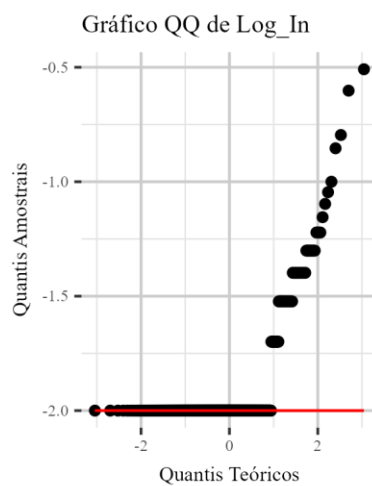
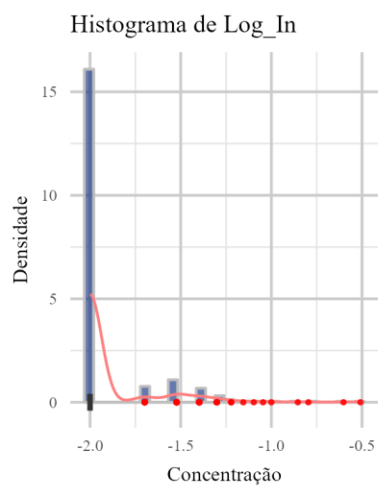


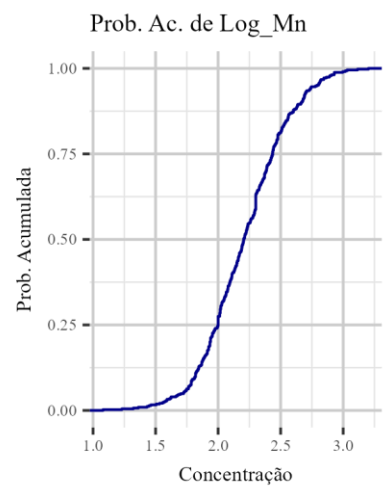
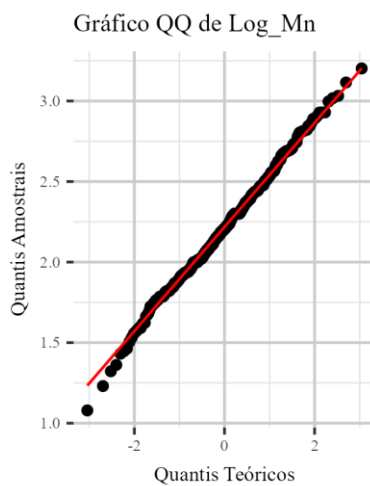
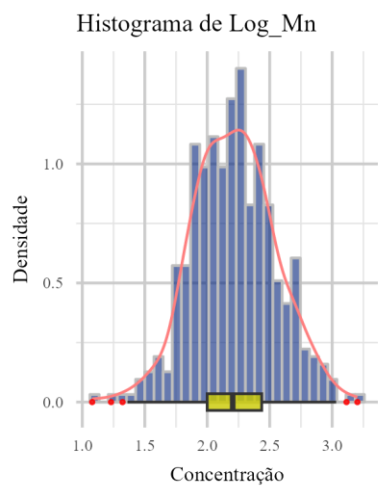
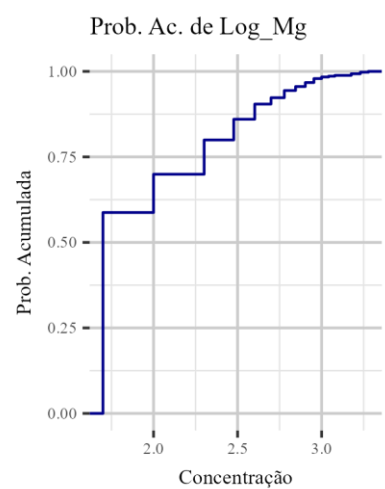
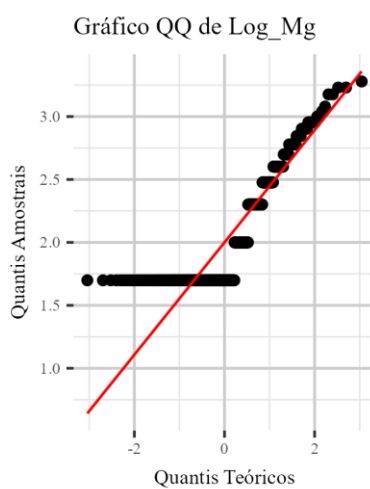
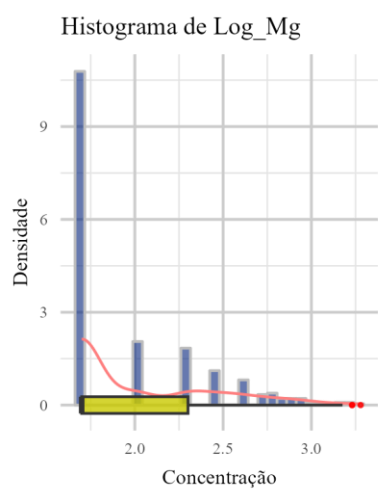
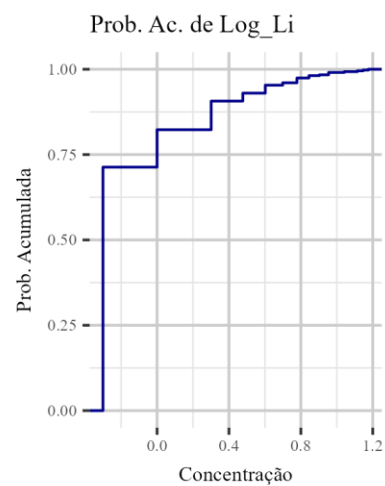
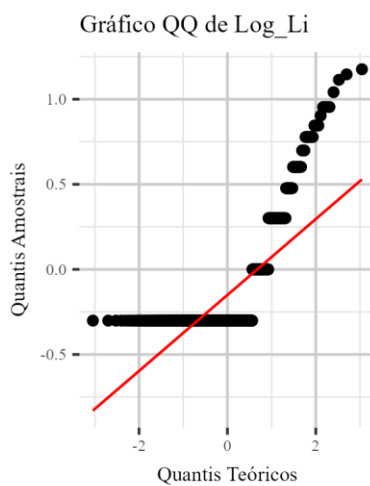
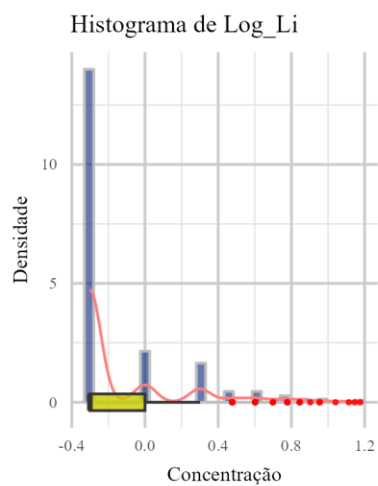


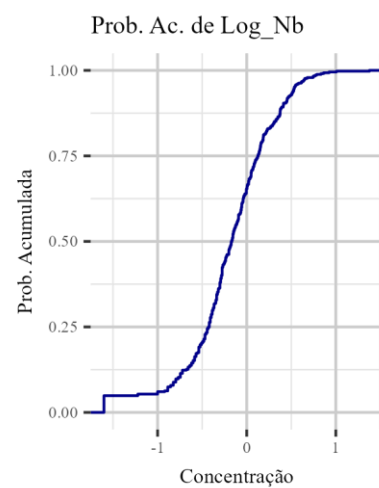
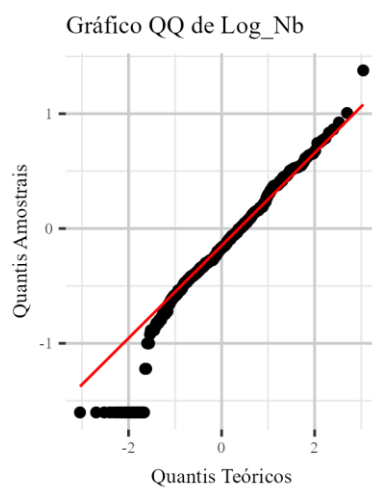
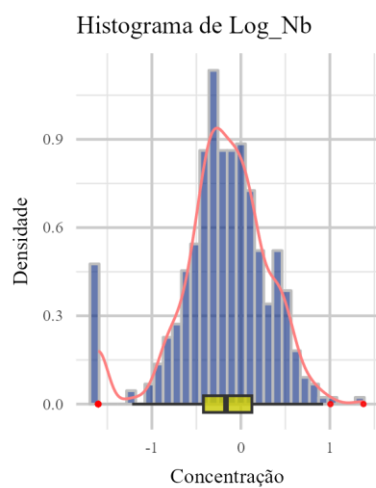
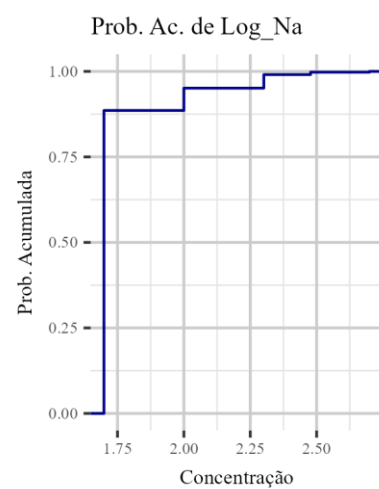
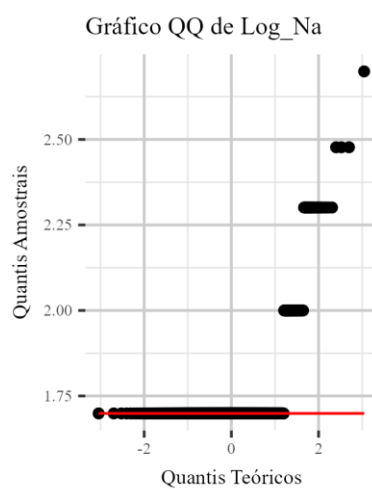
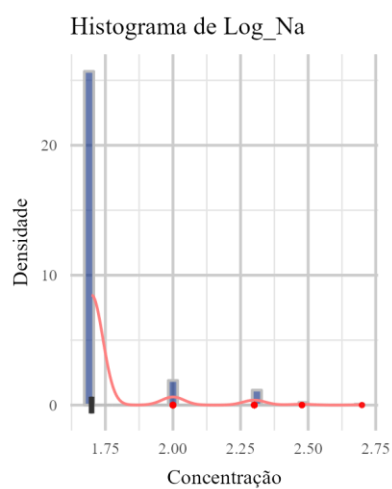
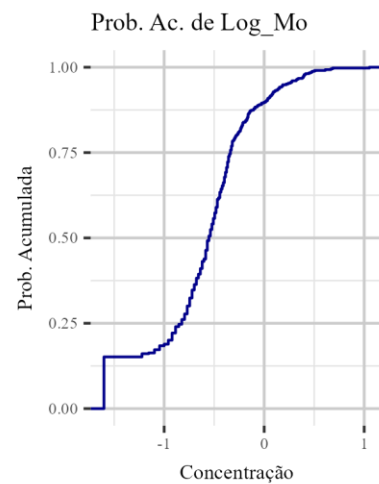
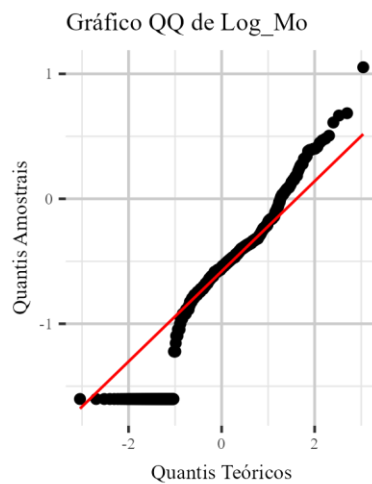
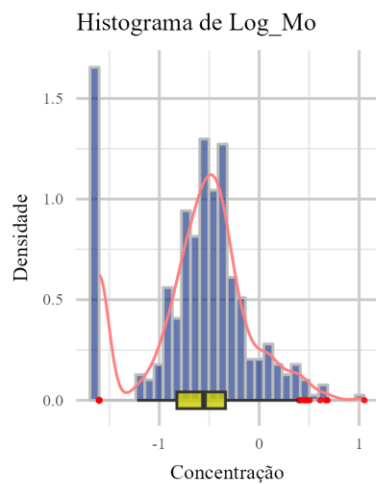


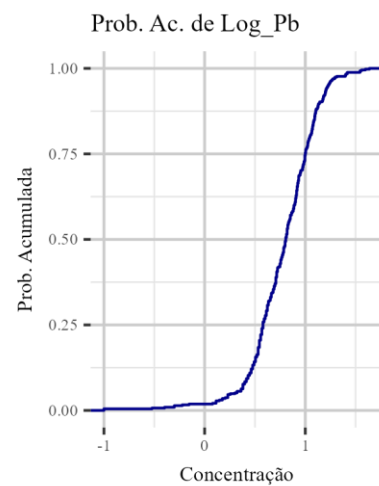
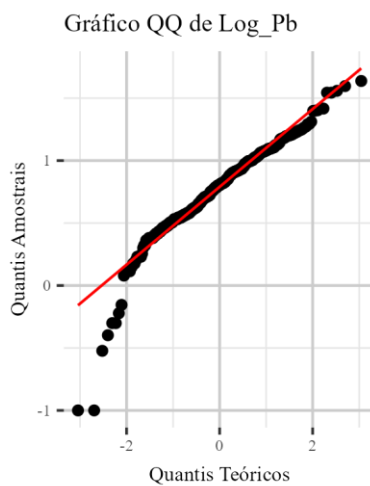
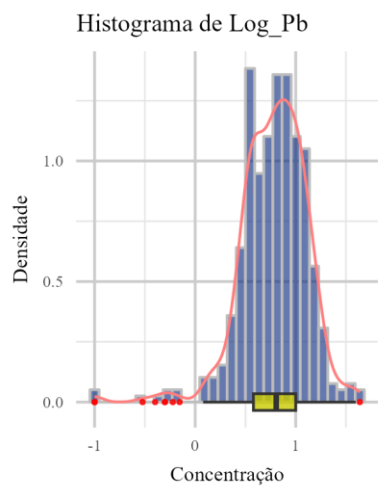
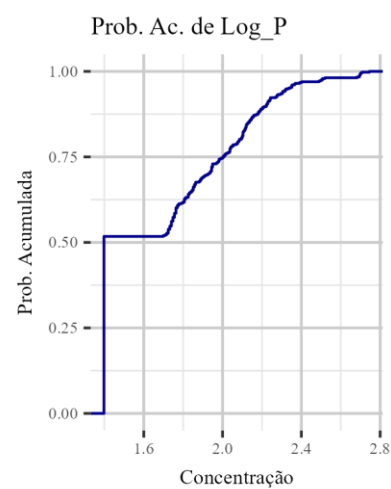
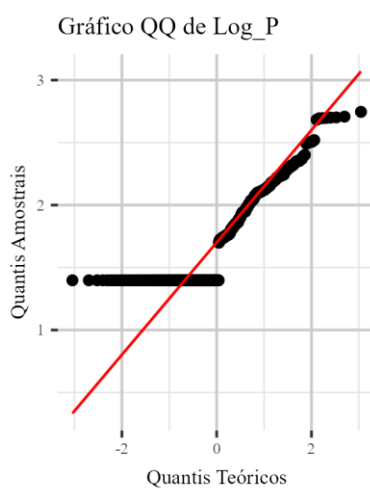
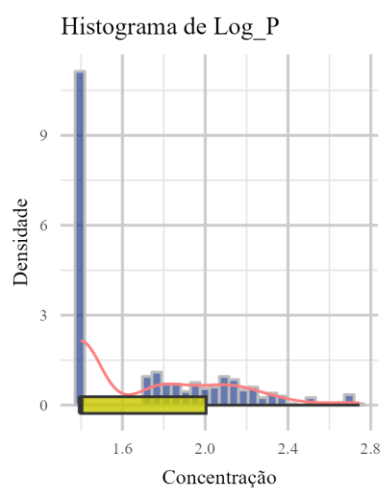
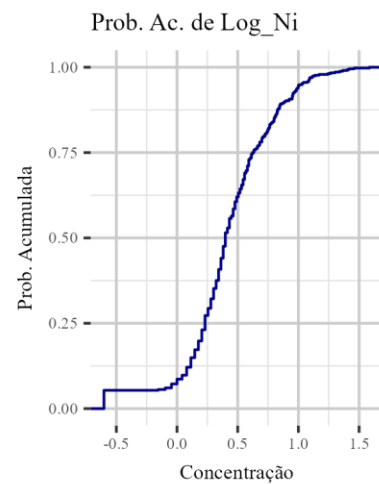
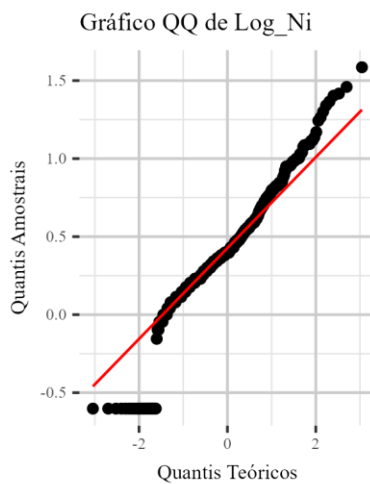
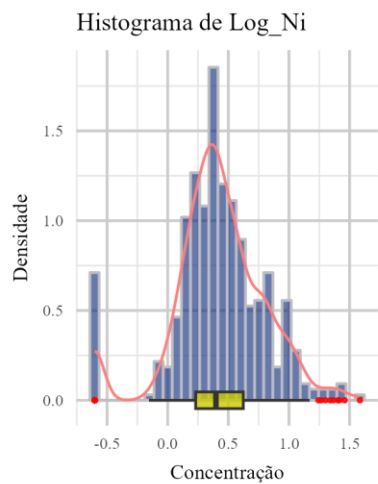


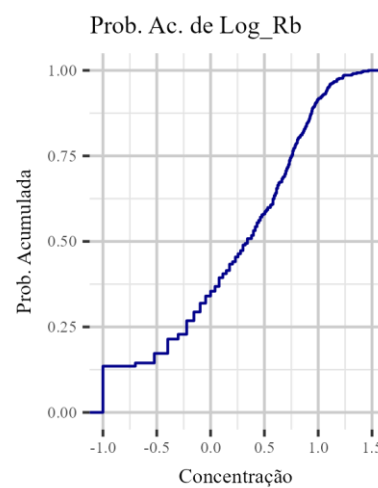
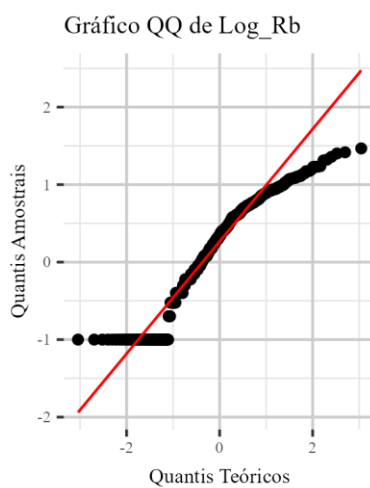
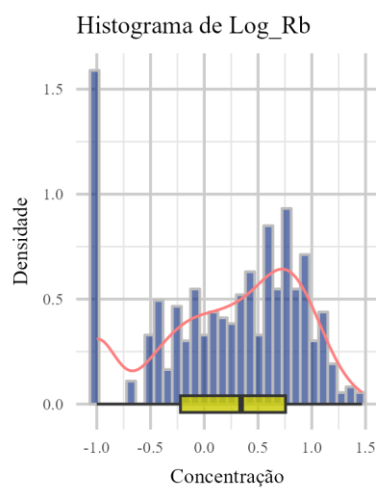
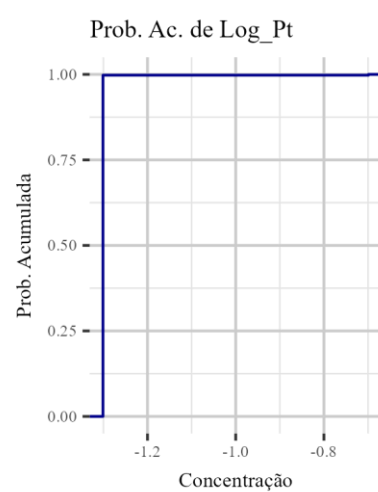
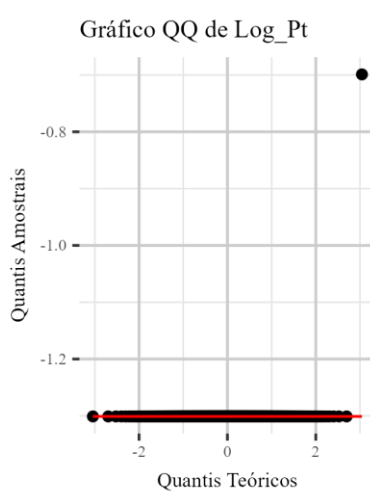
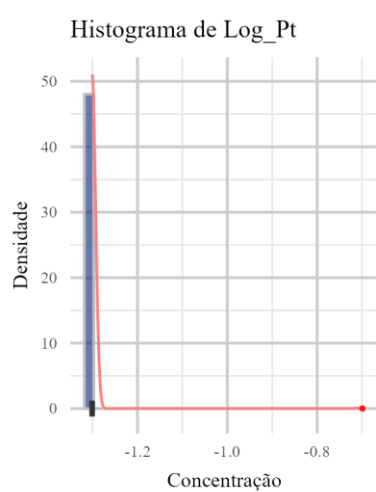
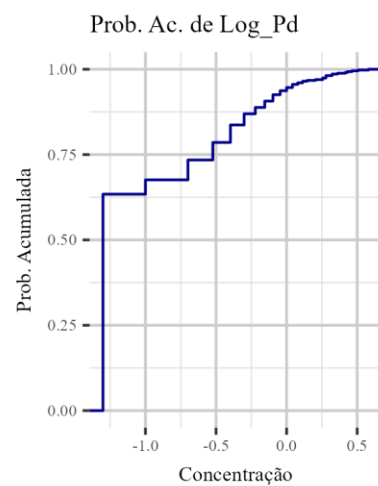
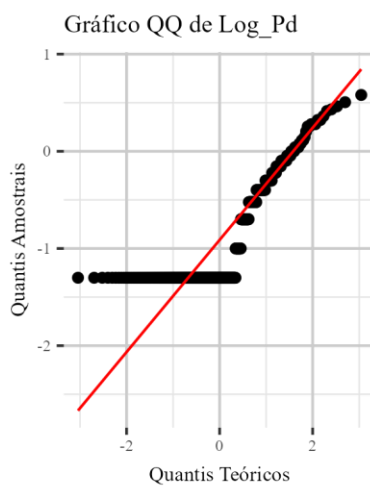
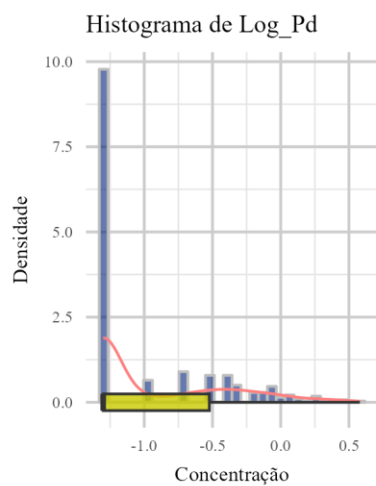


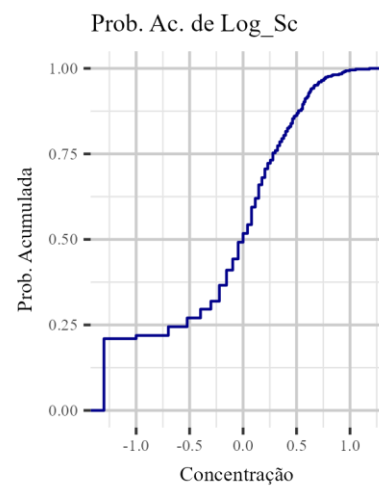
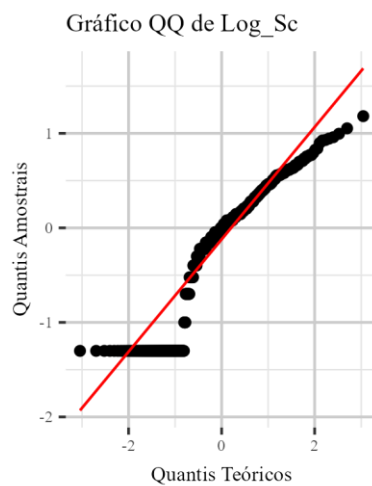
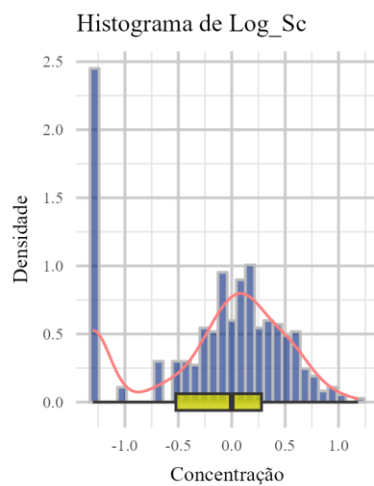
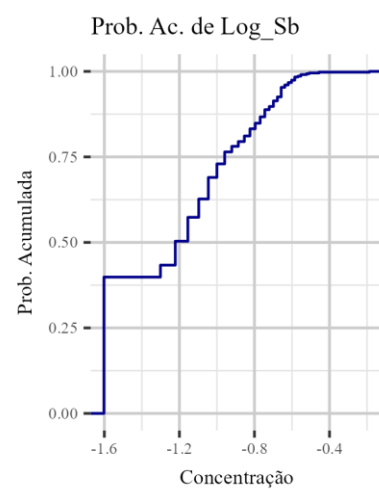
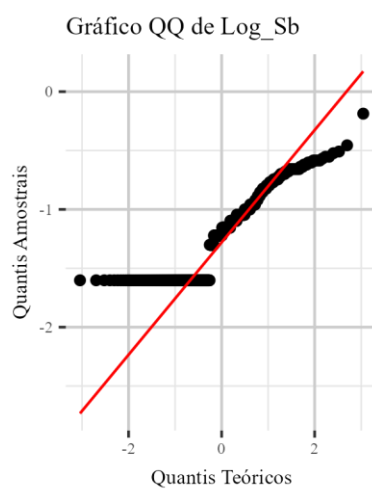
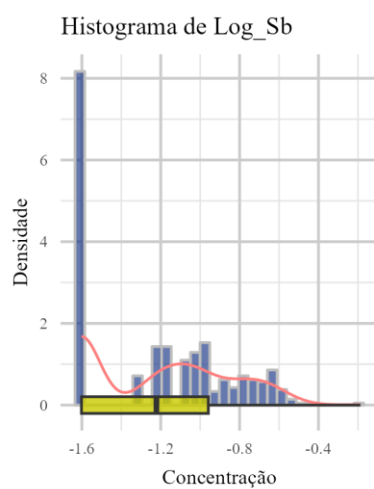
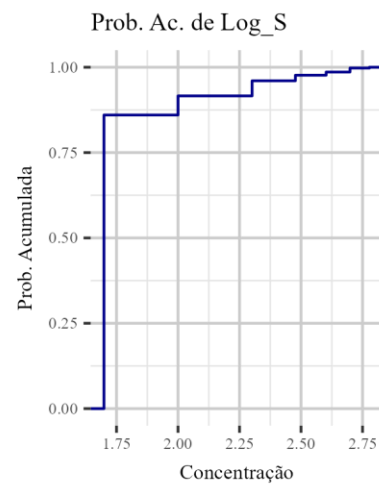
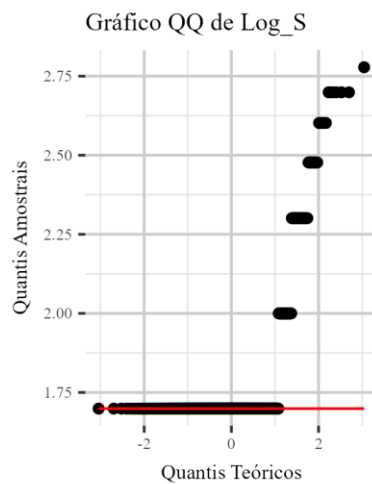
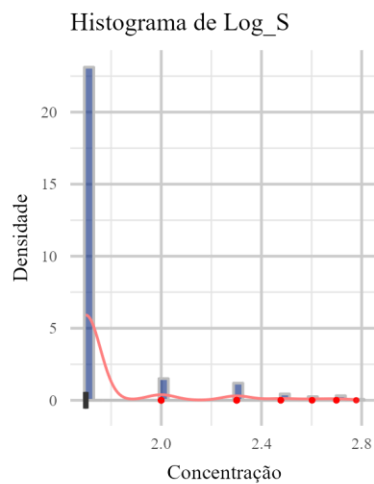


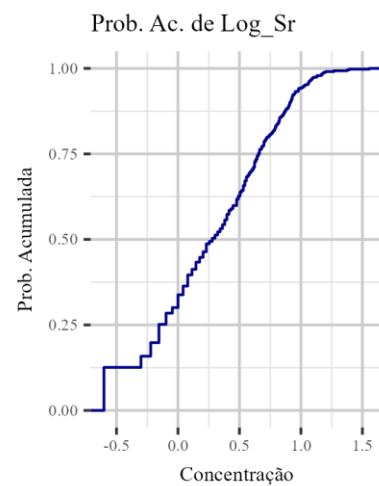
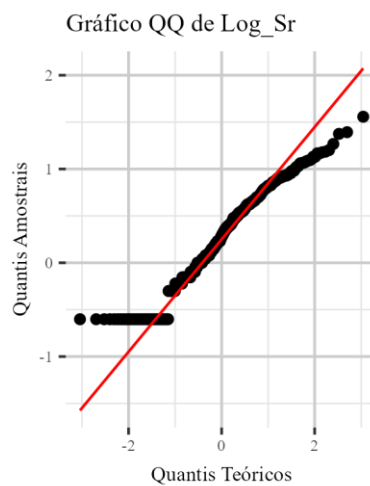
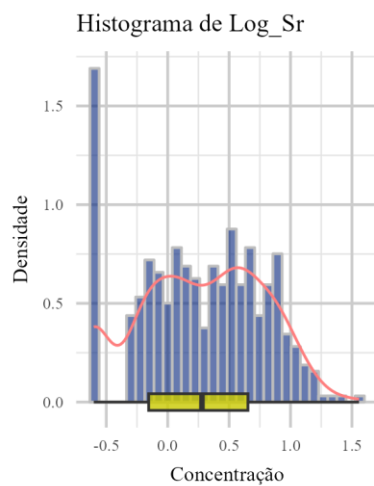
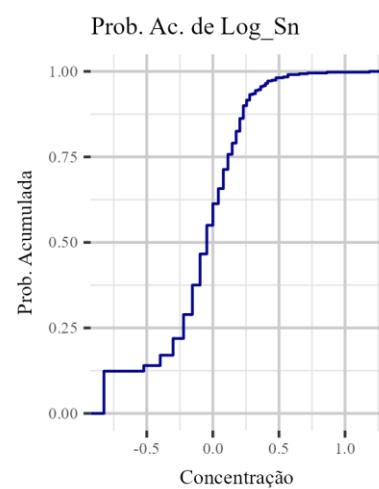
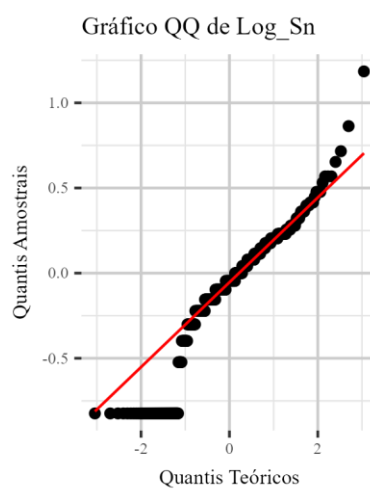
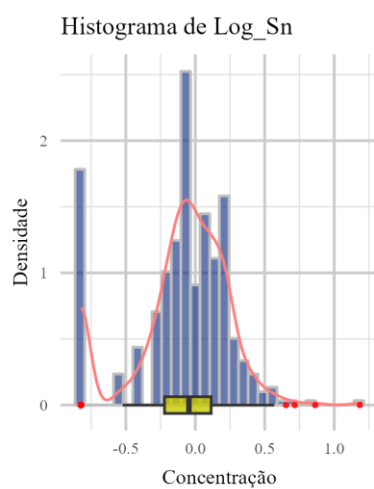
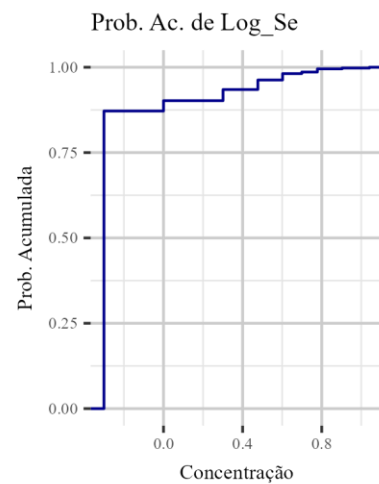
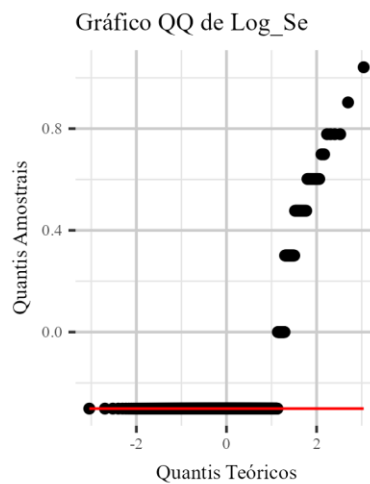
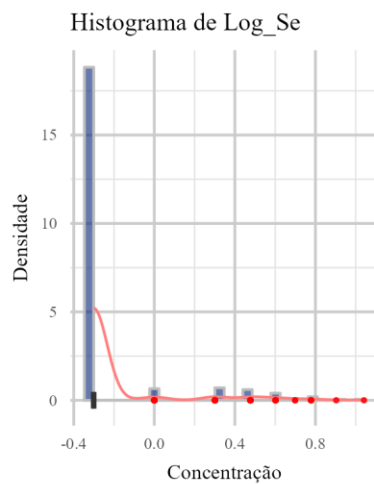


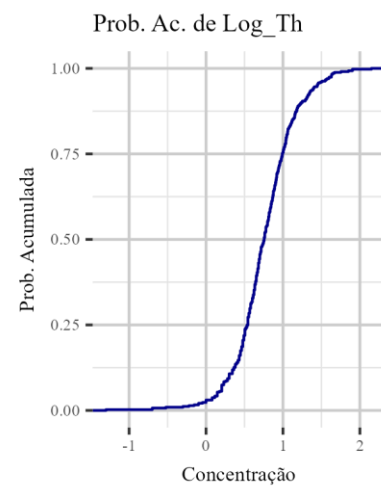
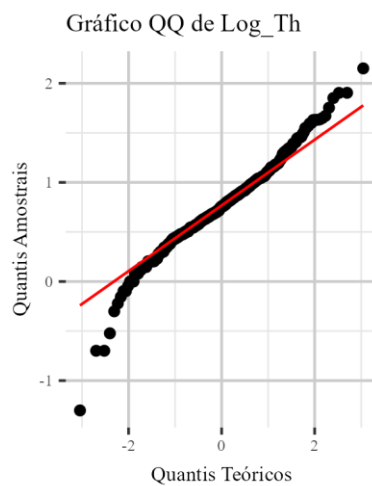
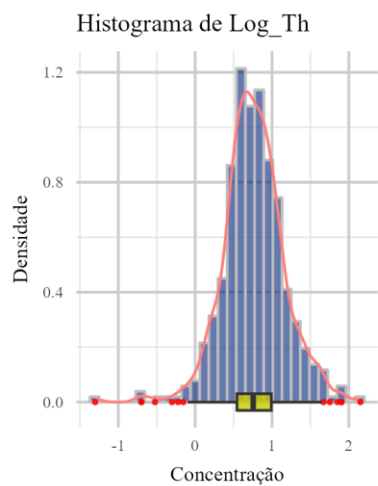
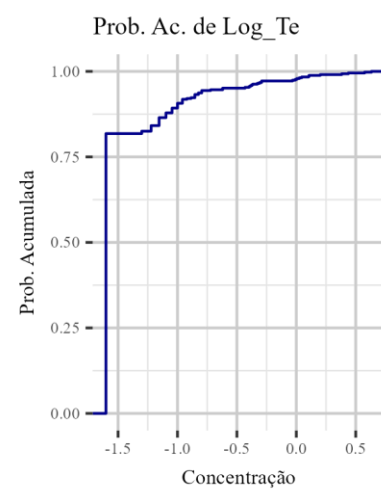
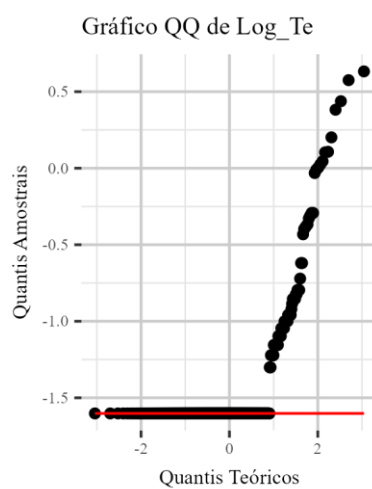
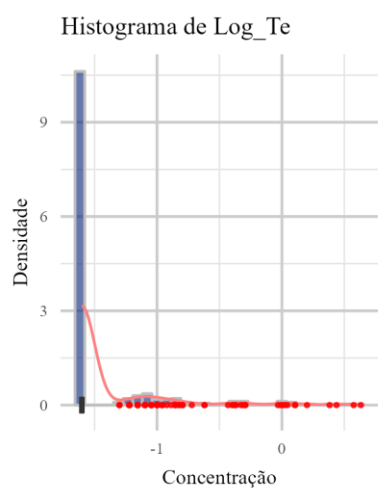
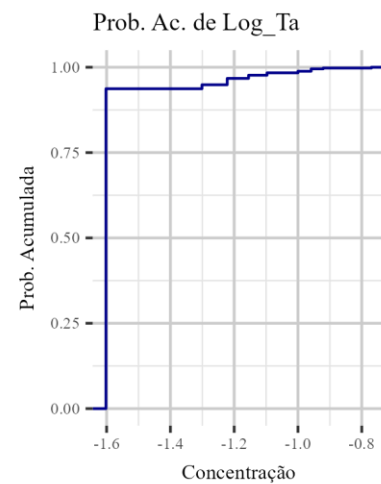
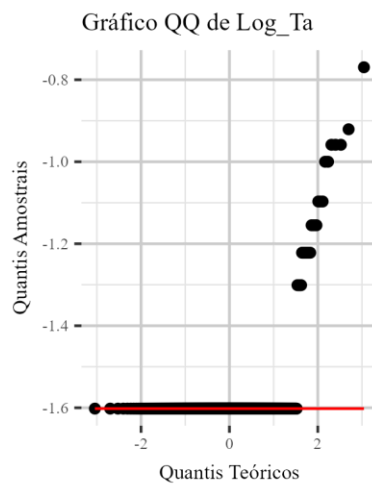
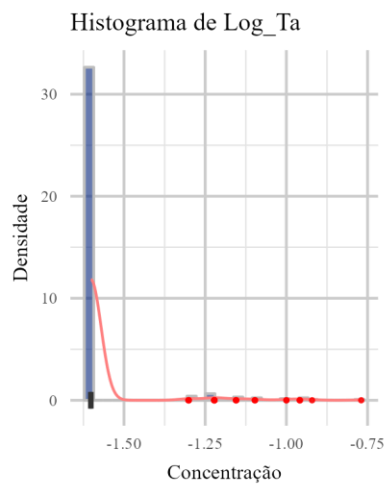


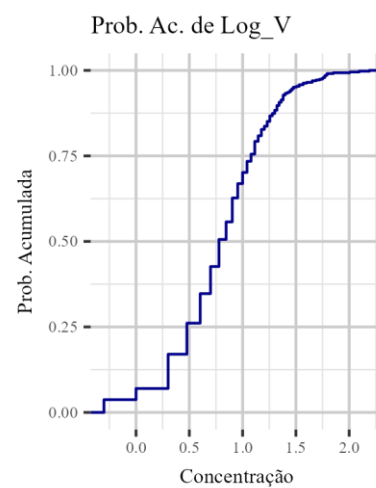
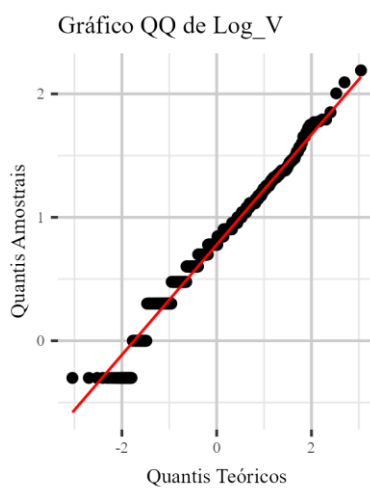
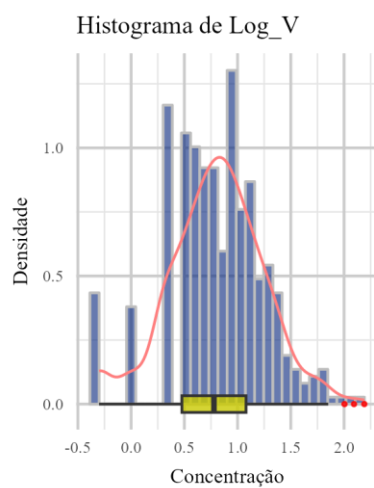
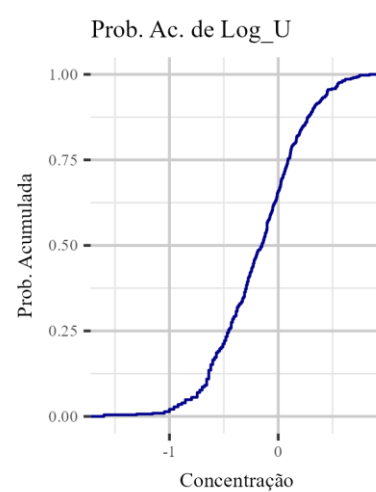
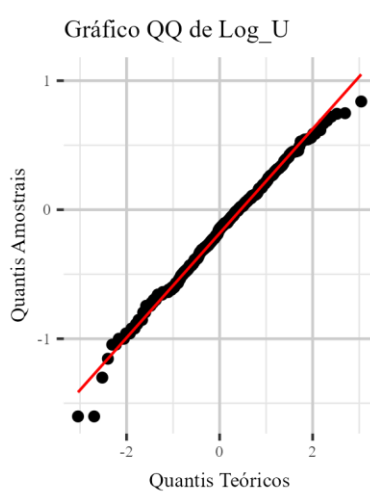
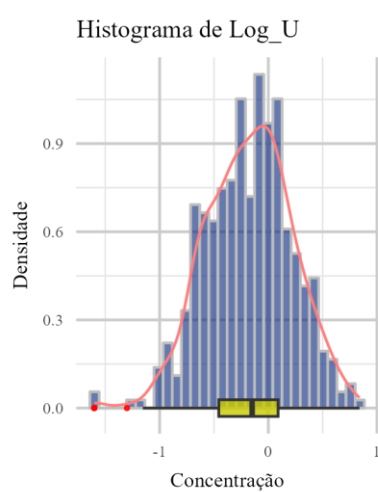
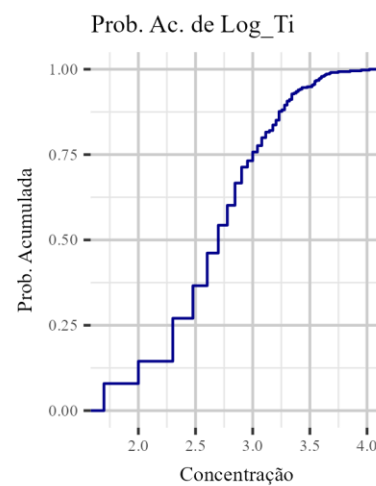
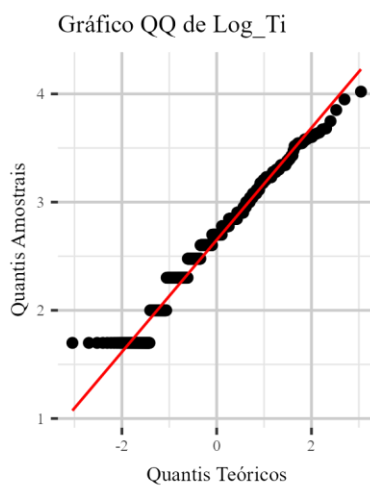
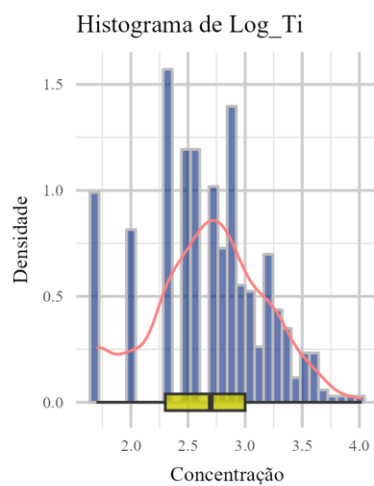


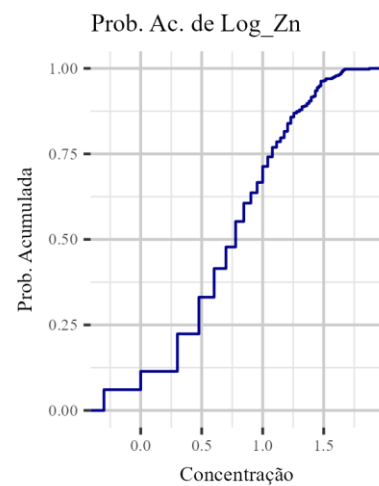
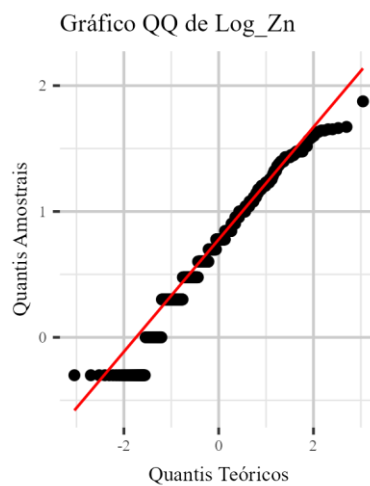
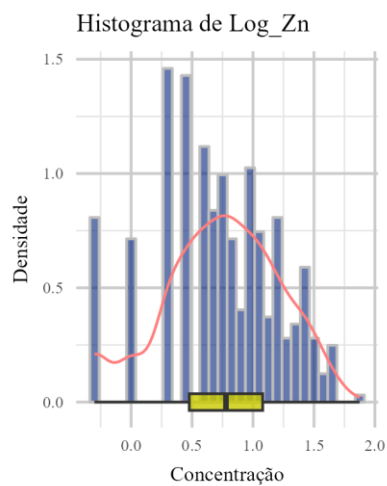
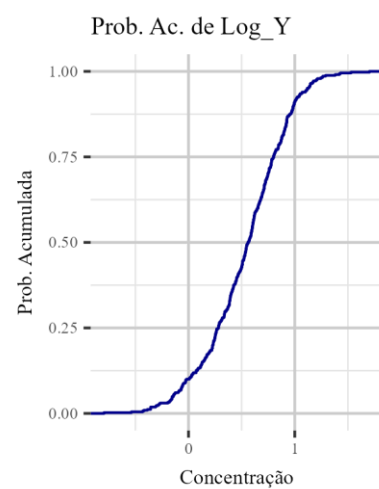
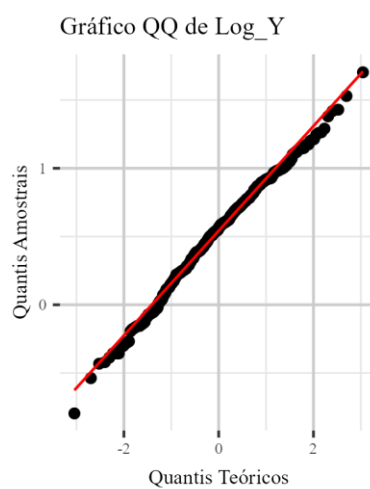
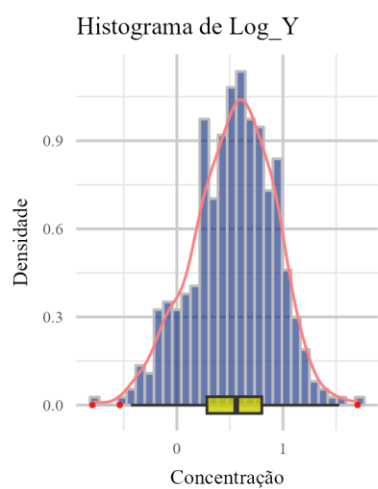
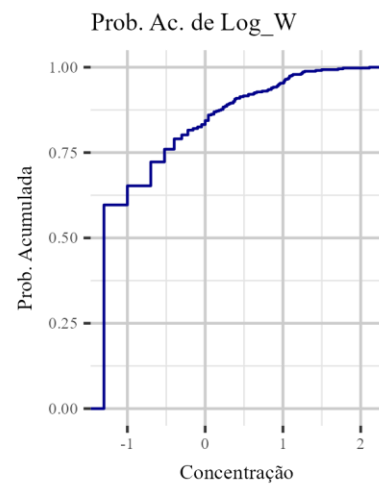
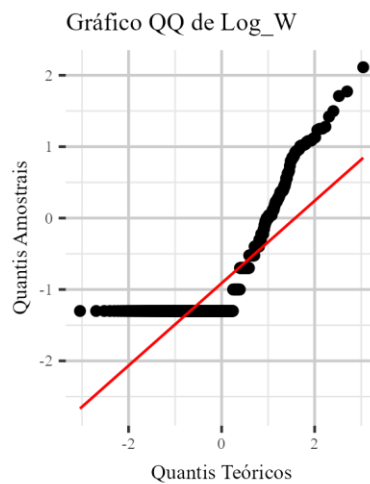
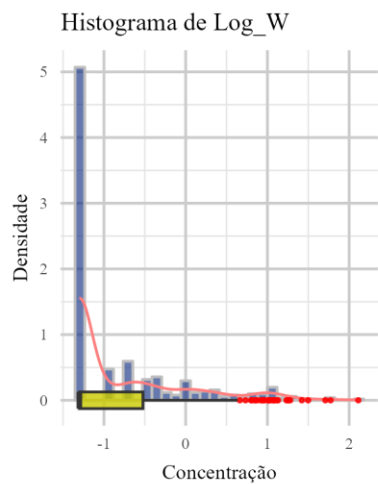


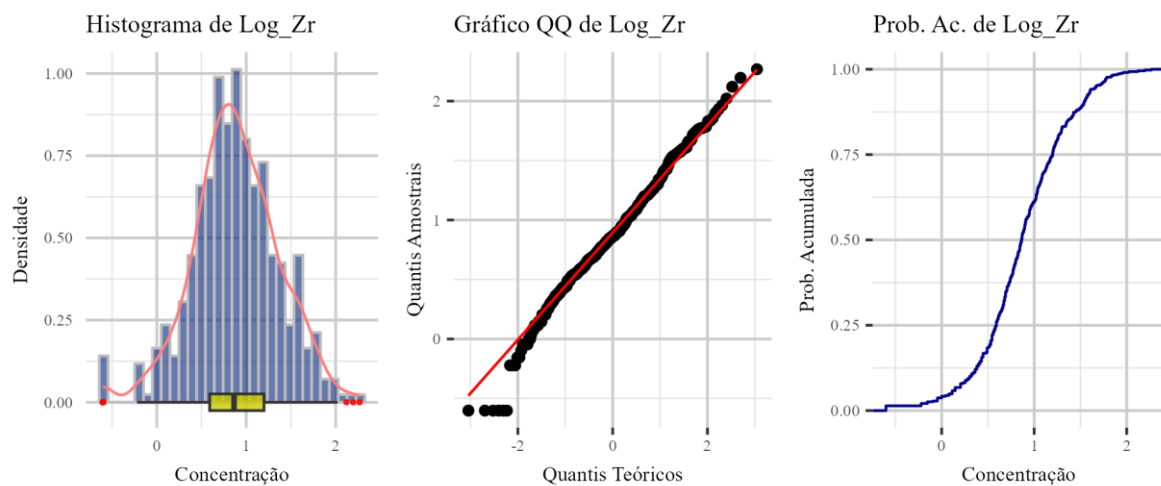




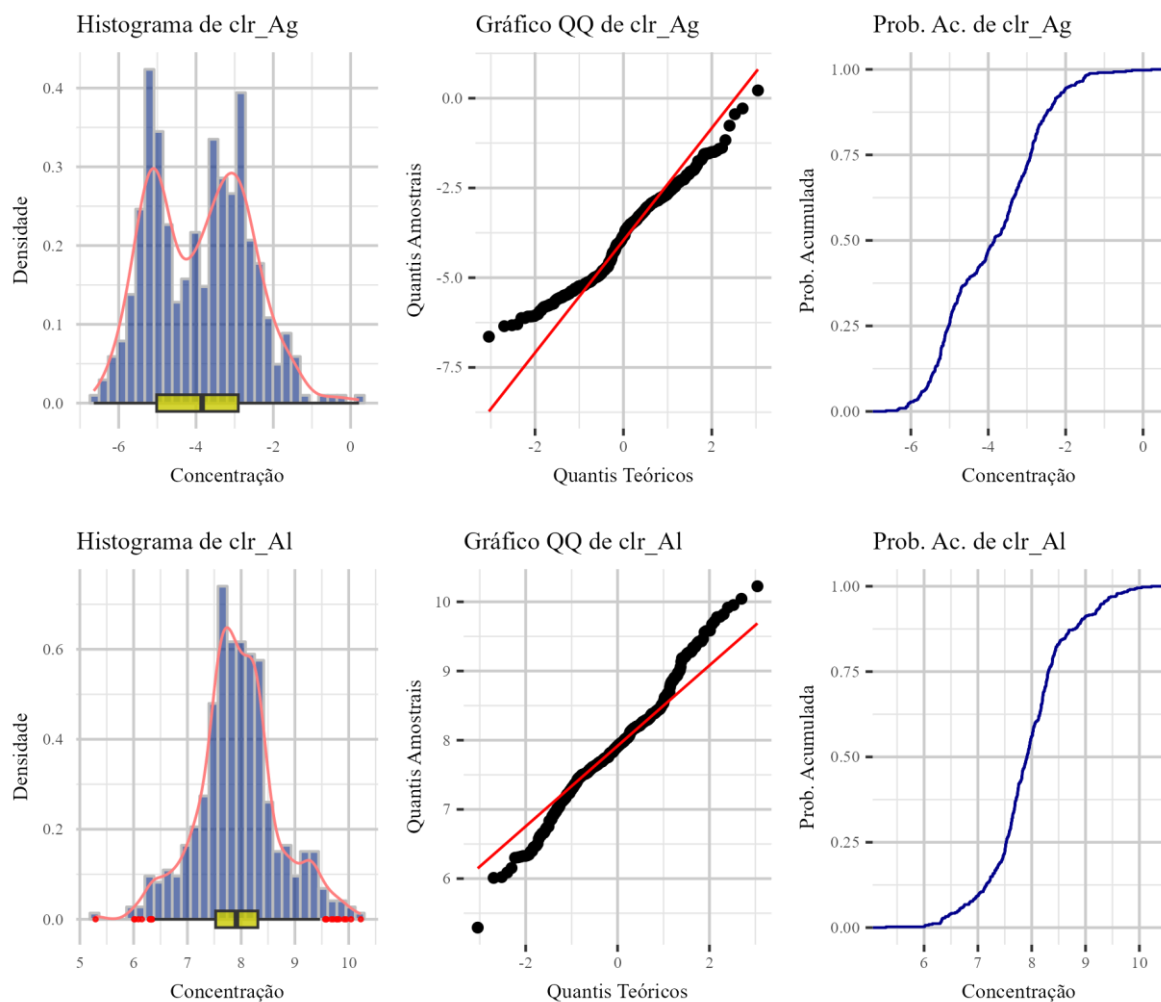


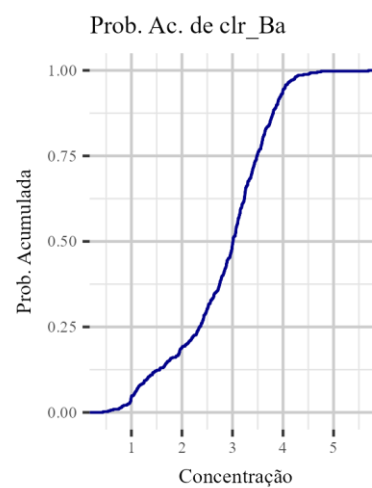
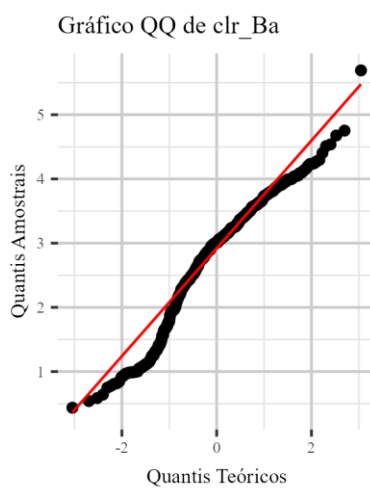
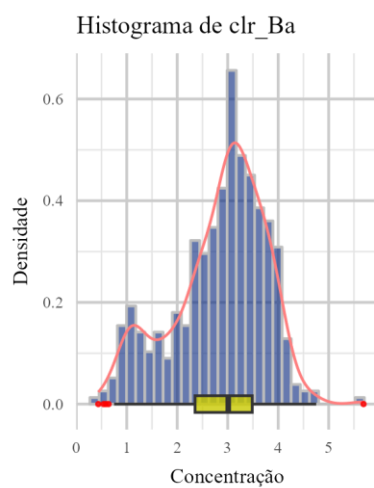
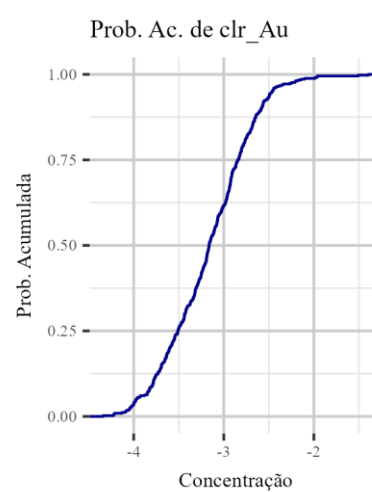
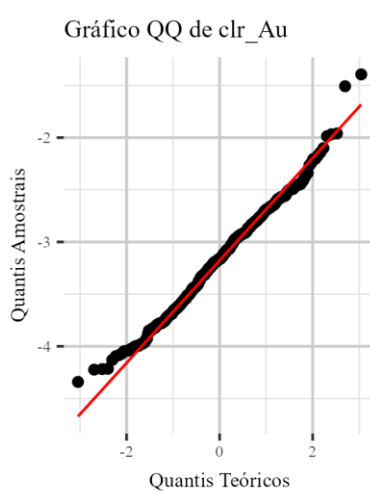
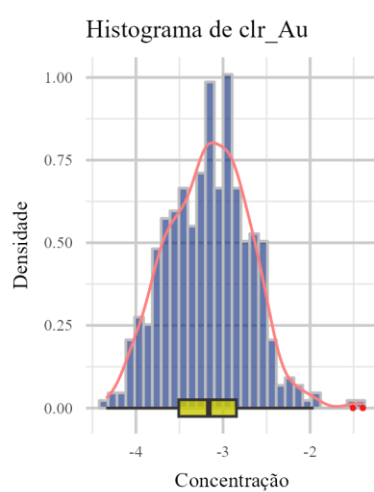
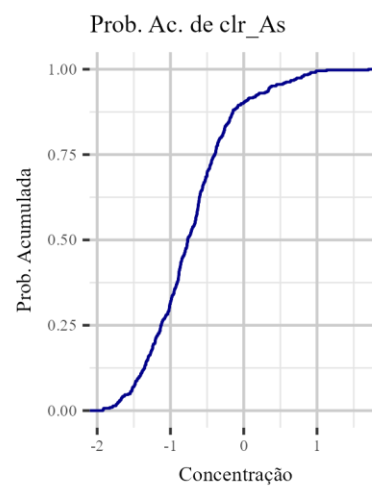
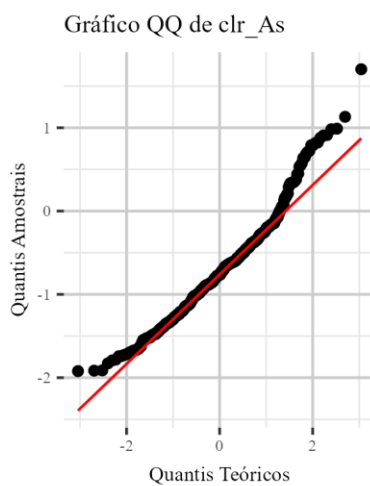
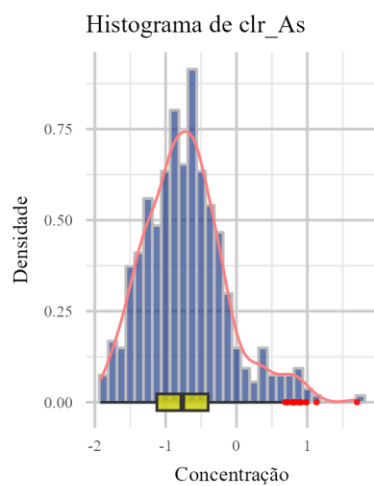


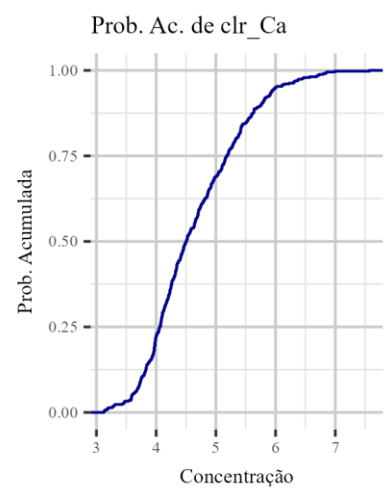
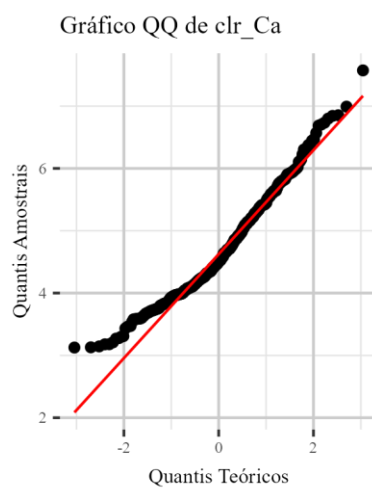
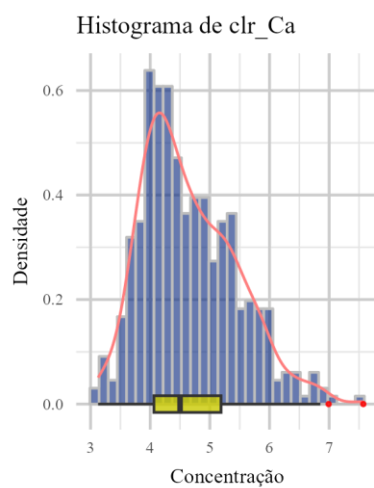
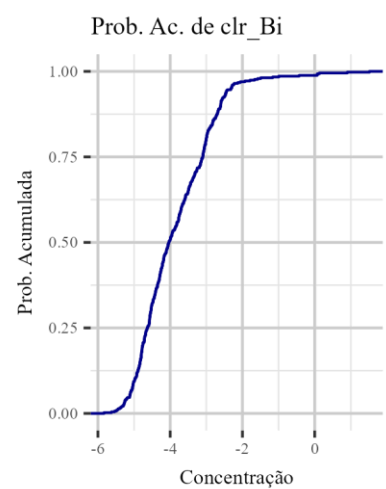
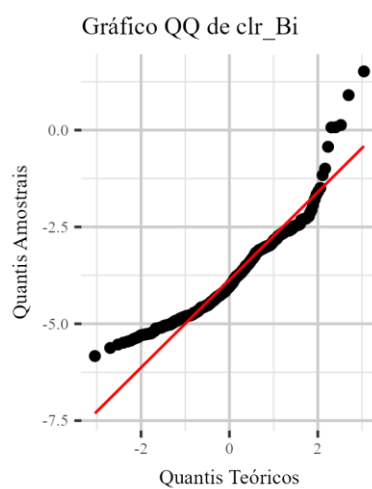
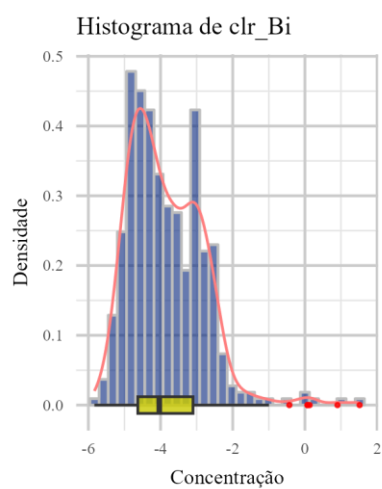
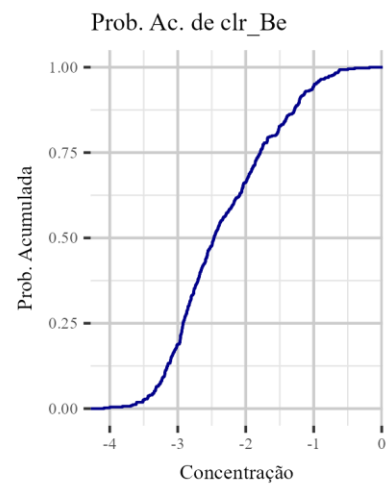
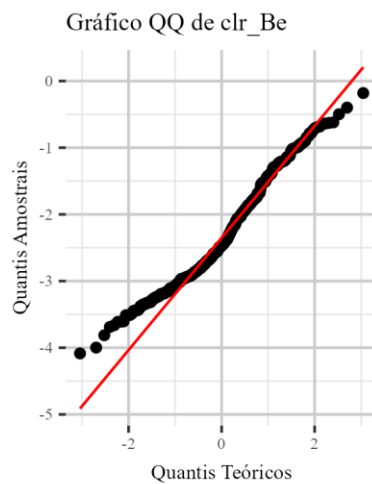
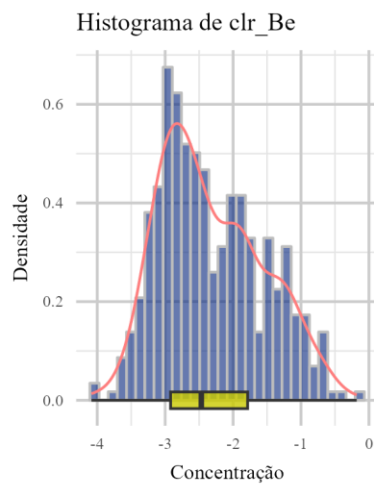


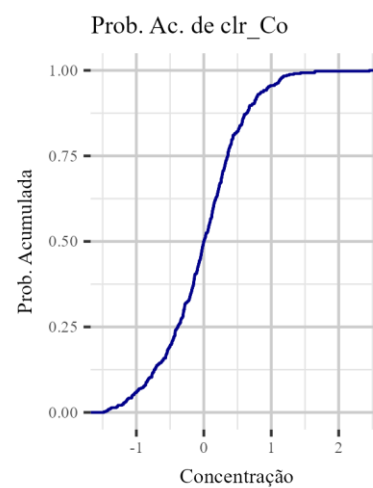
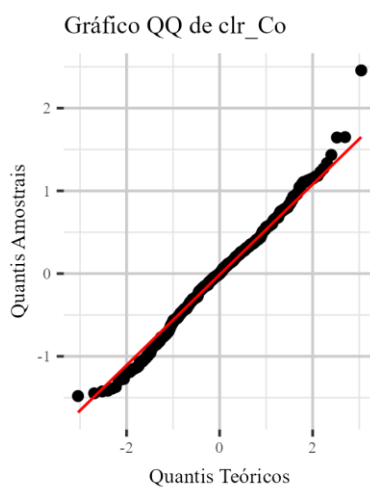
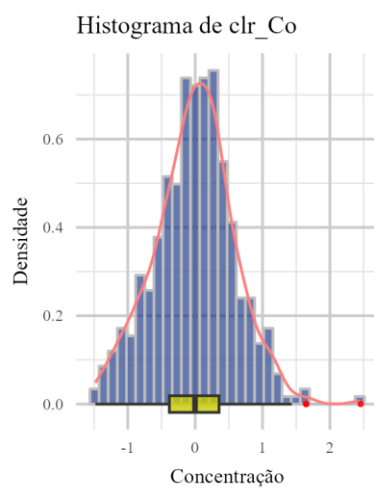
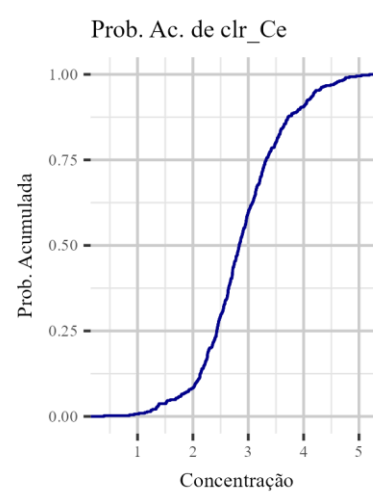
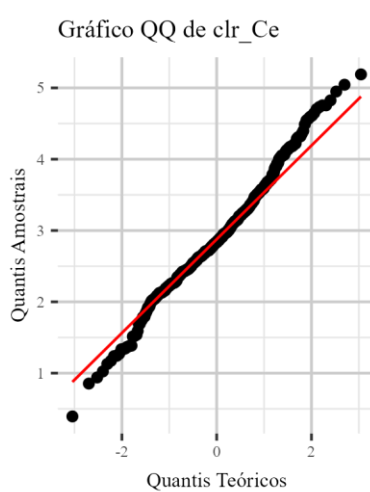
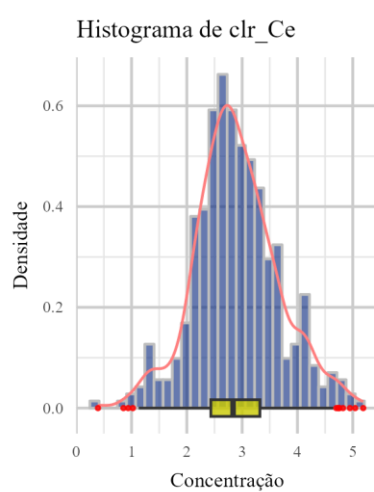
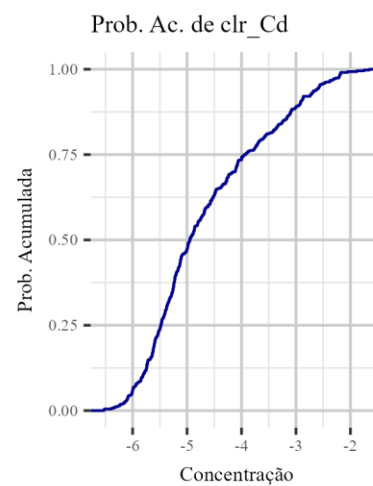
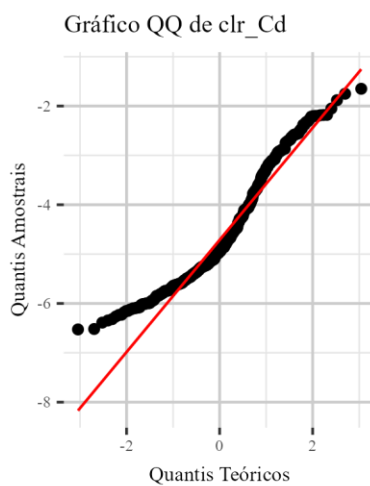
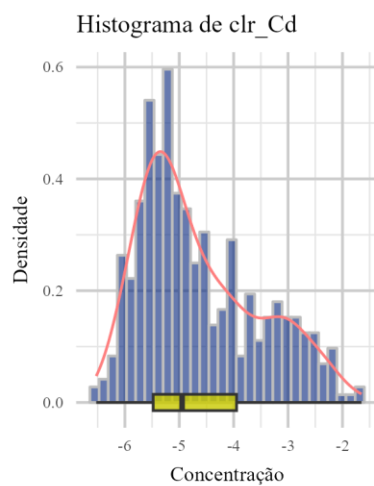


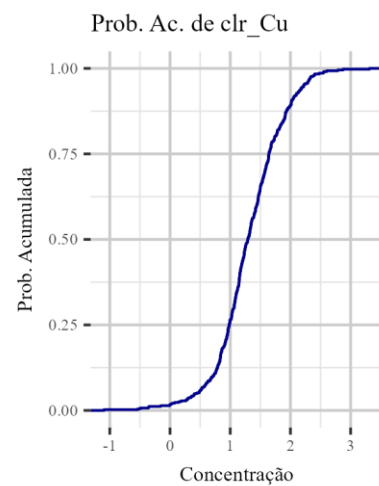
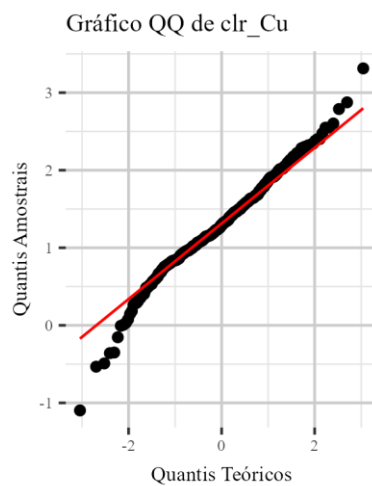
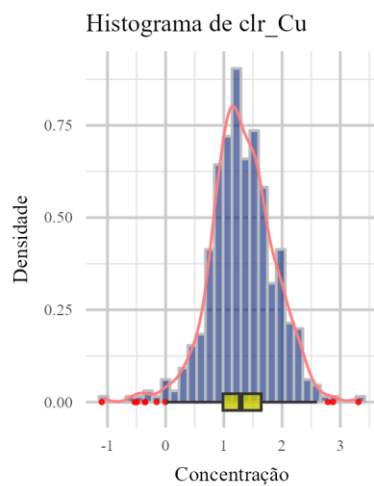
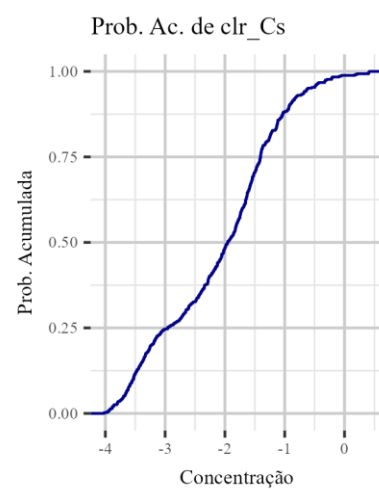
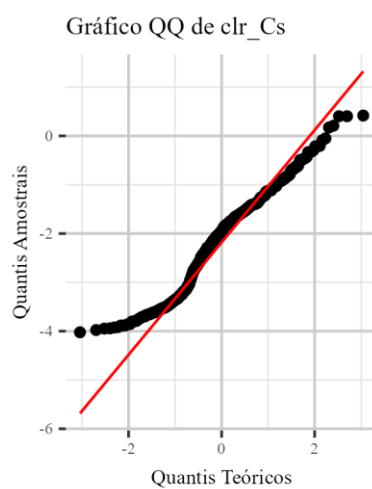
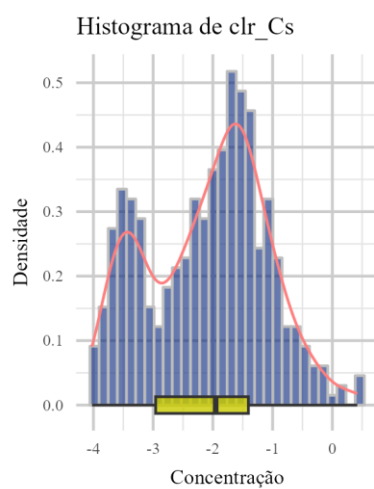
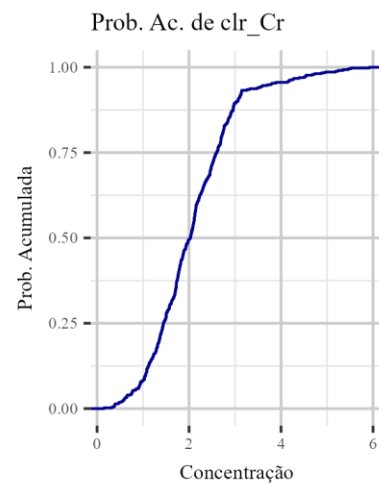
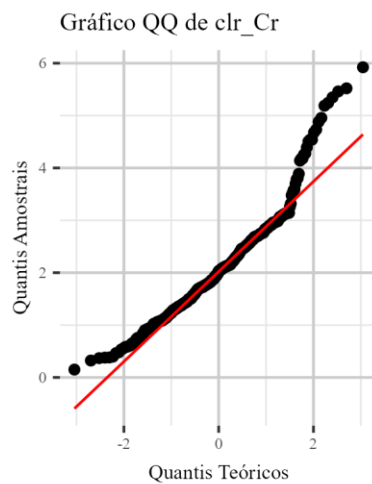
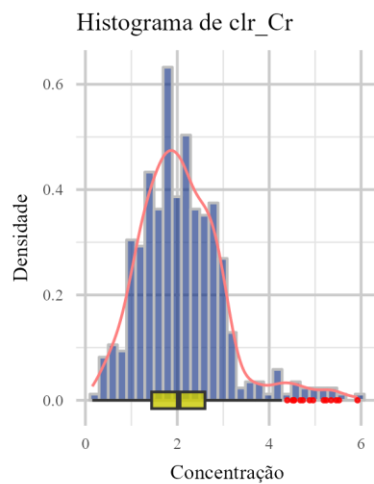
Dados CLR-Transformados

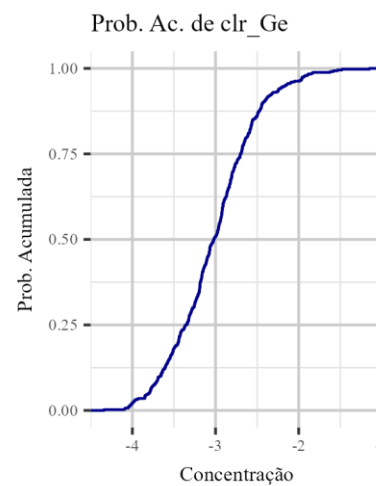
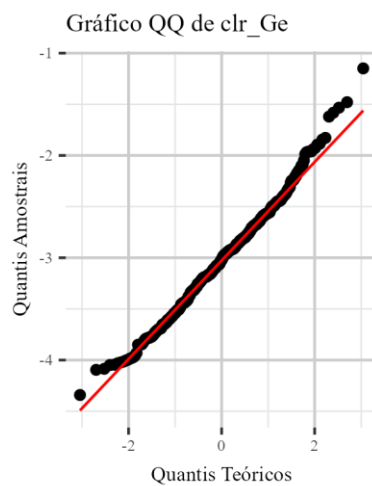
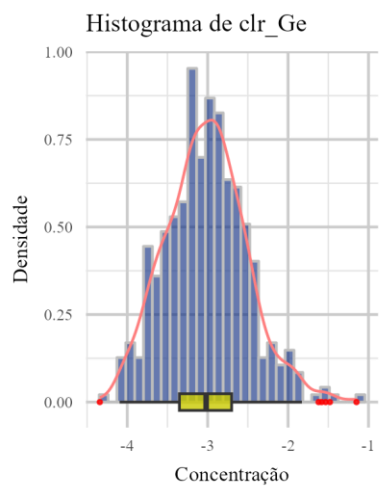
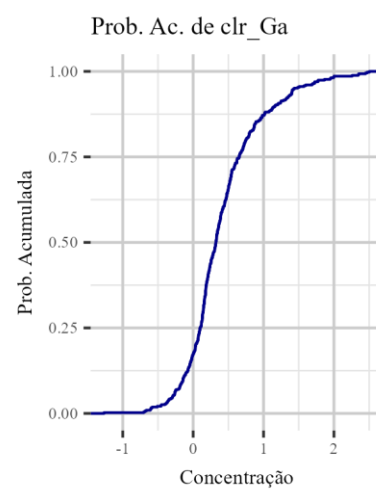
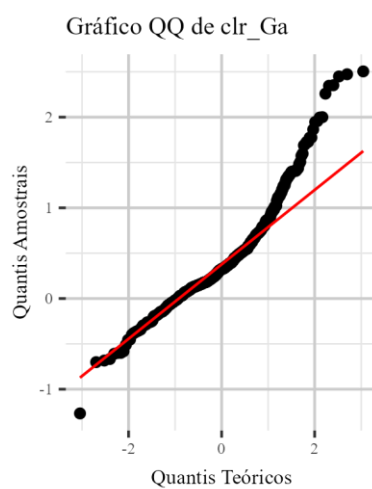
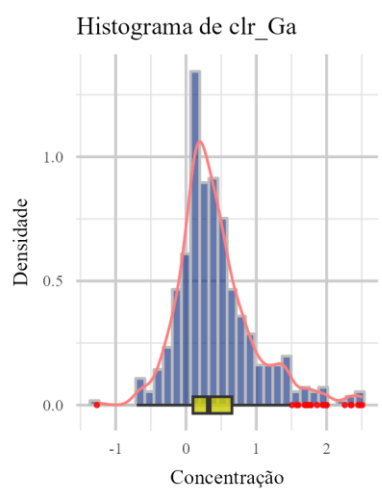
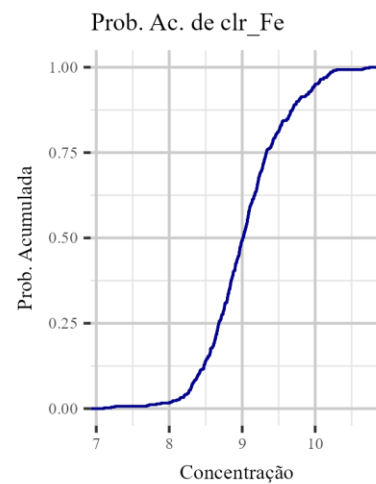
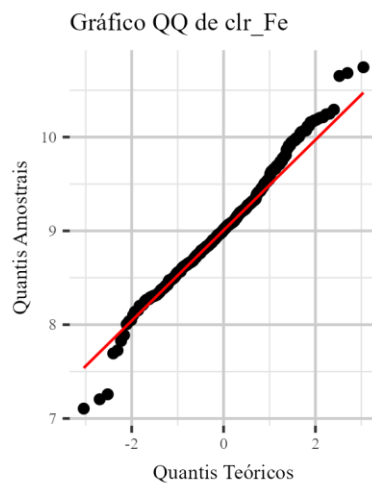
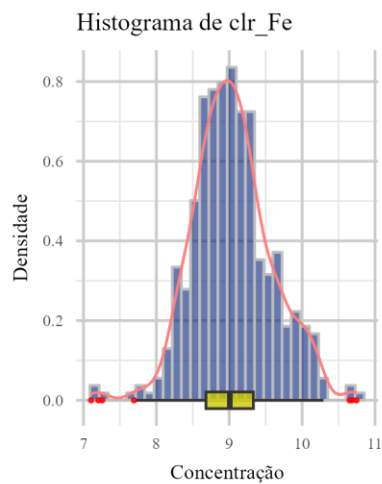


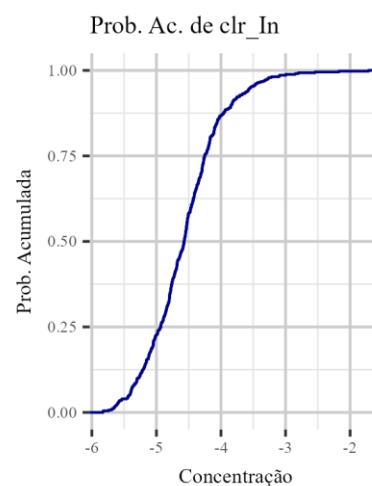
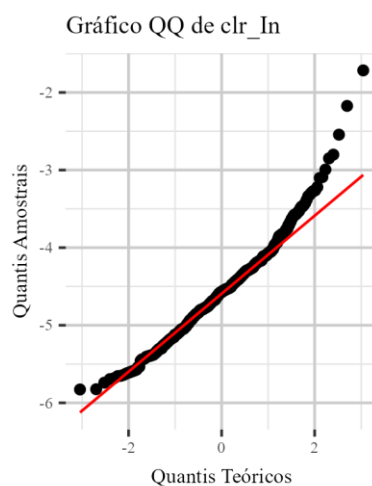
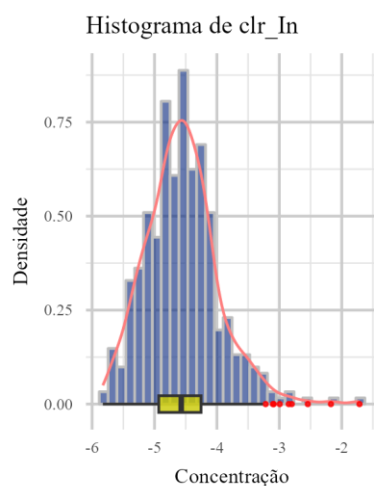
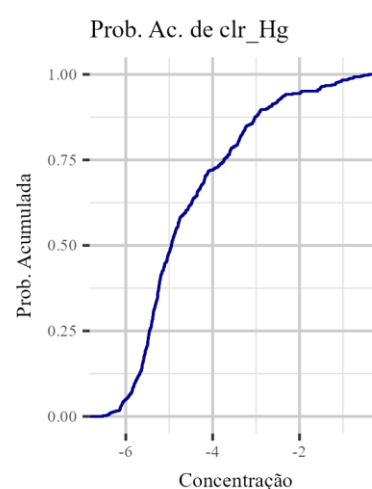
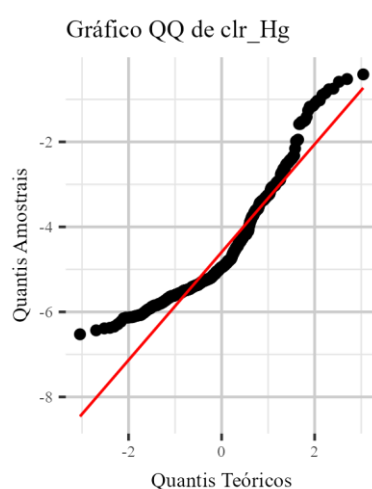
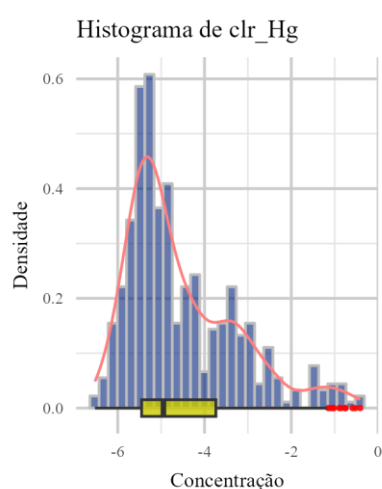
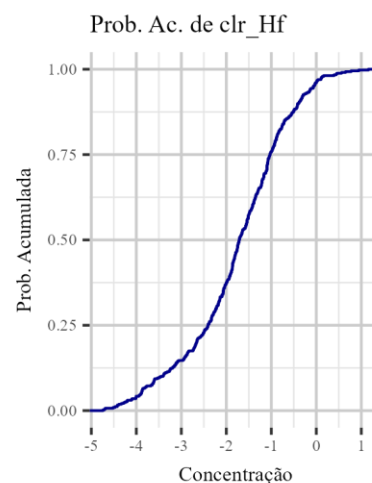
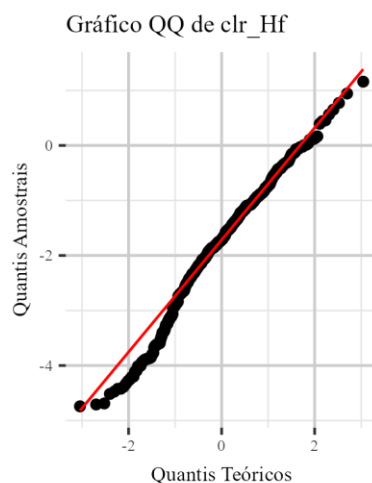
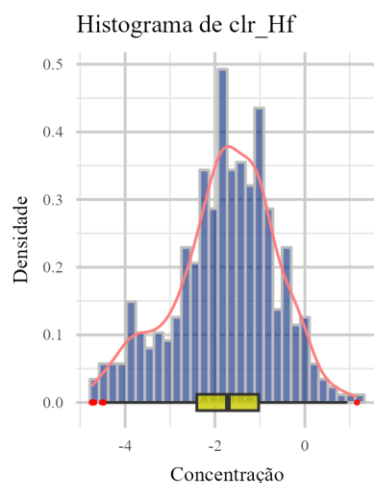


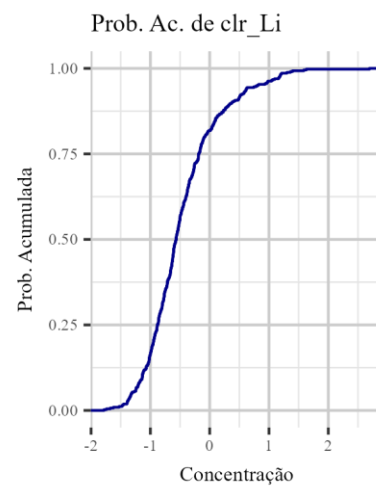
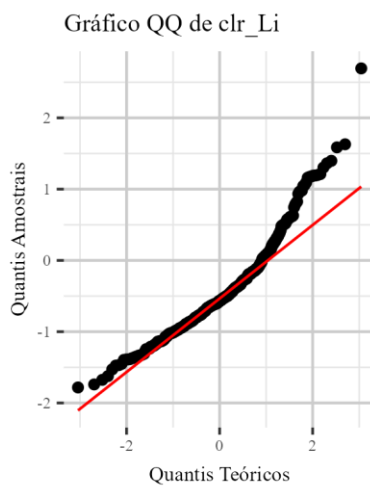
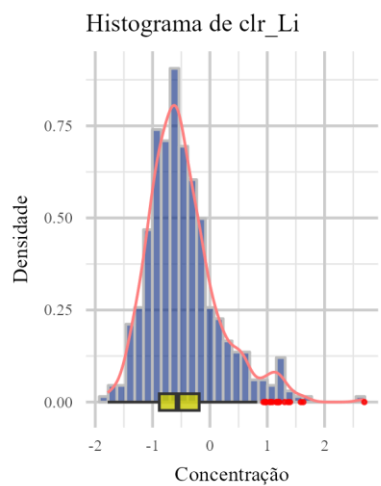
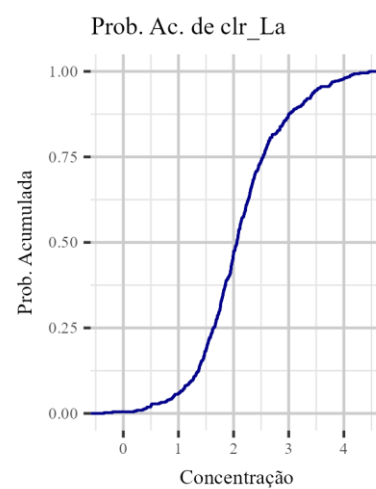
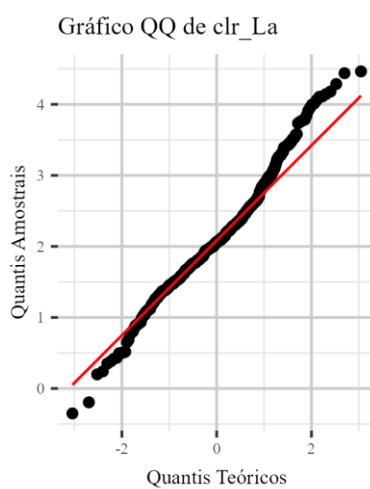
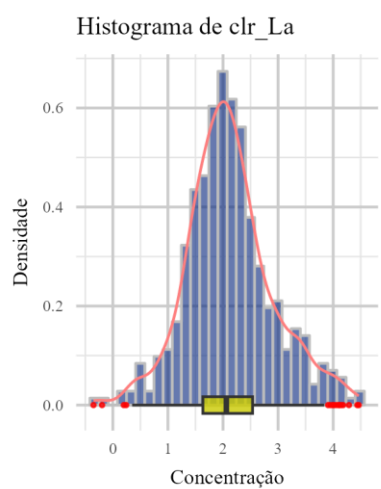
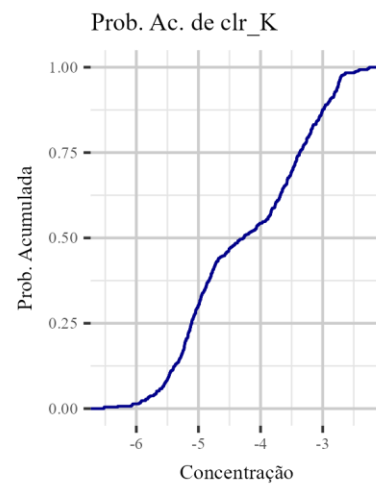
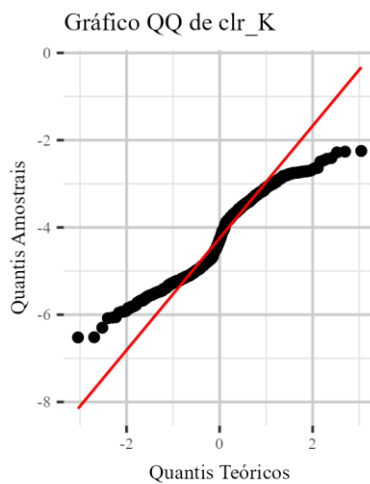
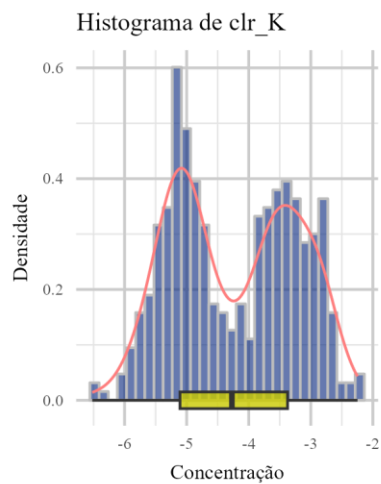


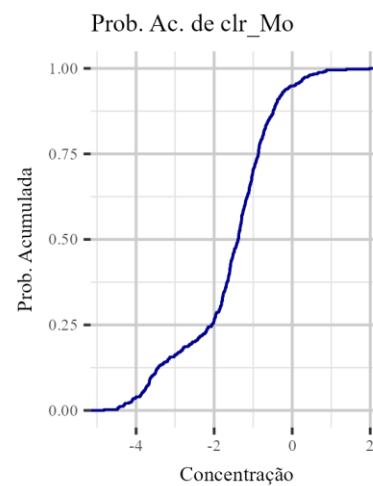
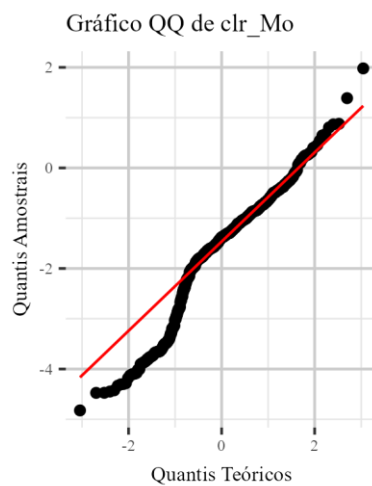
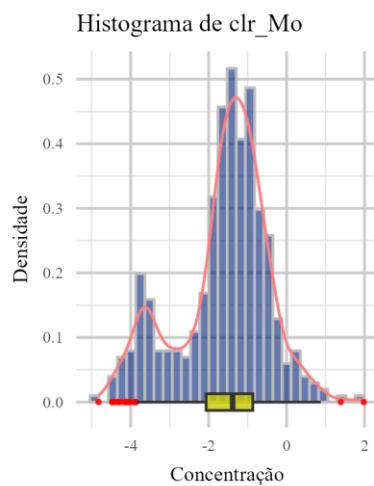
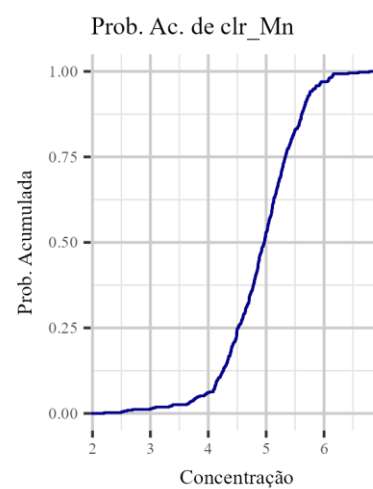
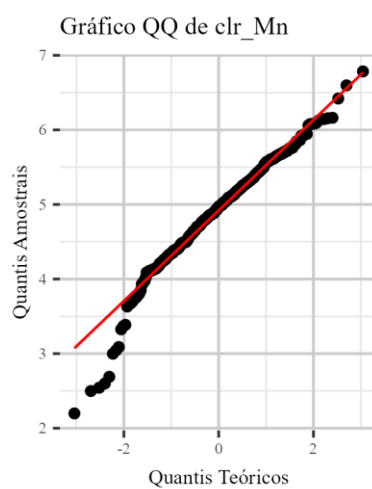
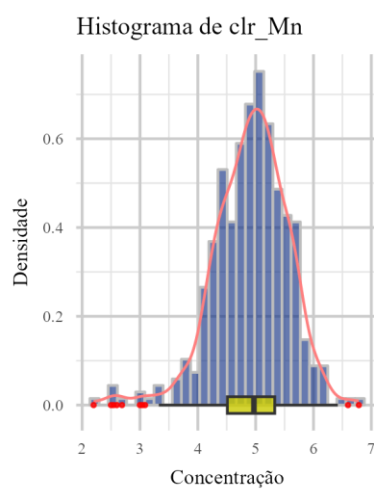
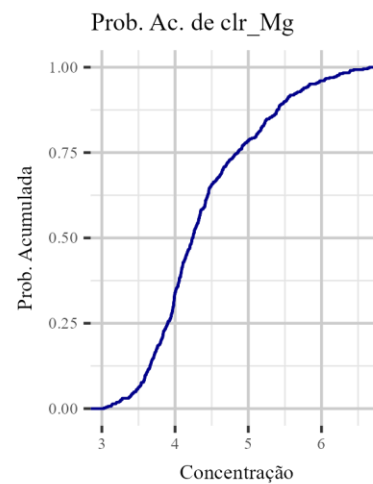
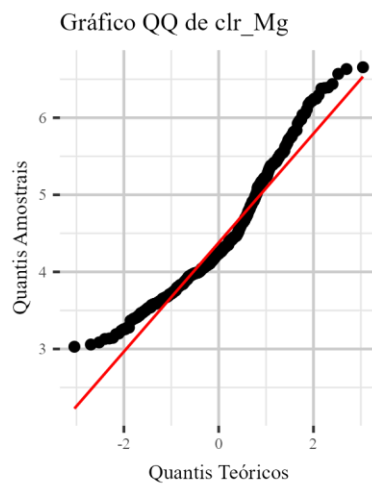
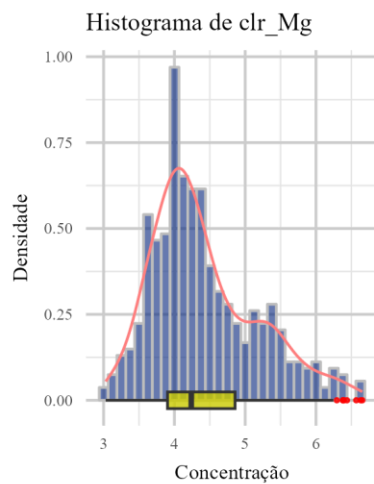


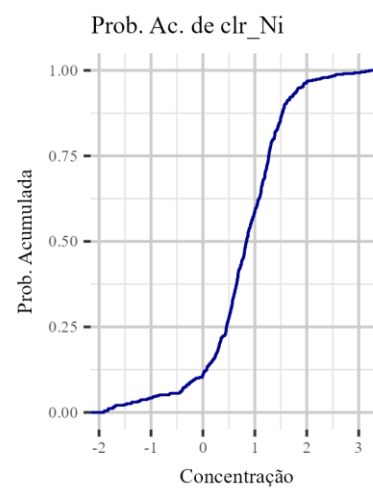
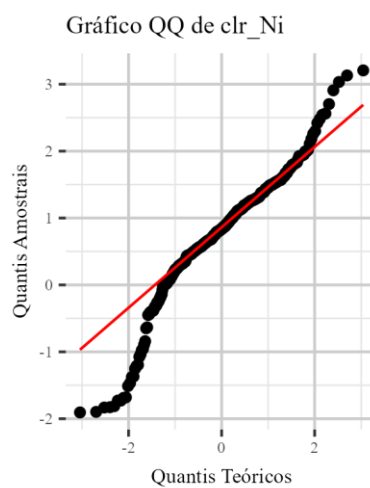
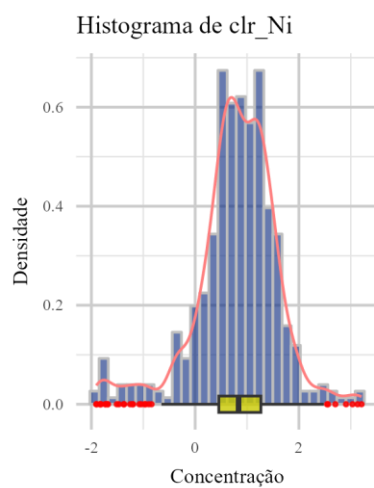
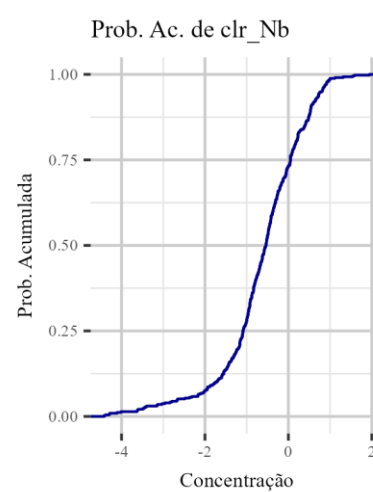
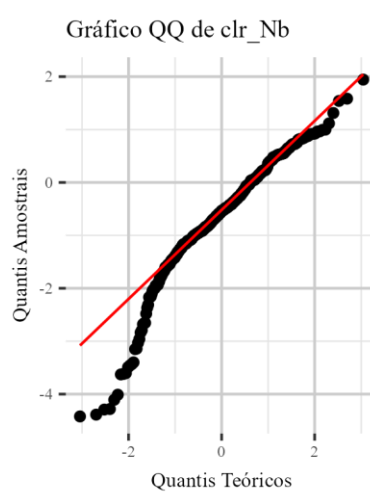
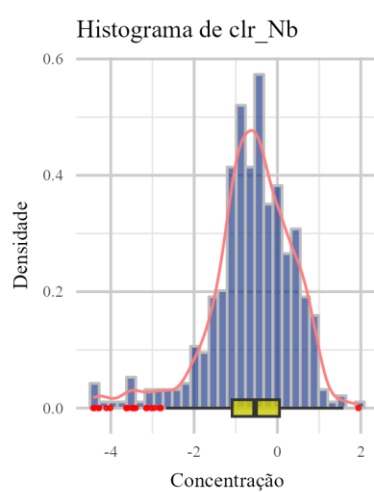
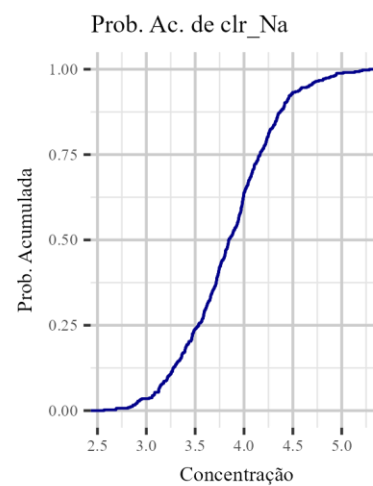
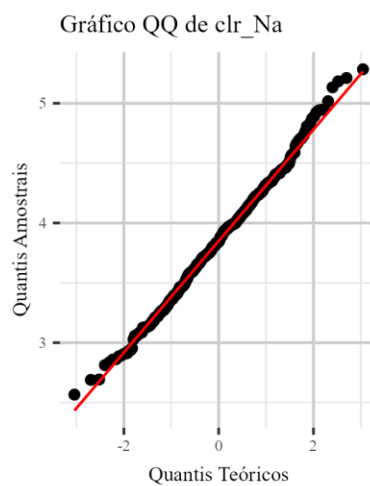
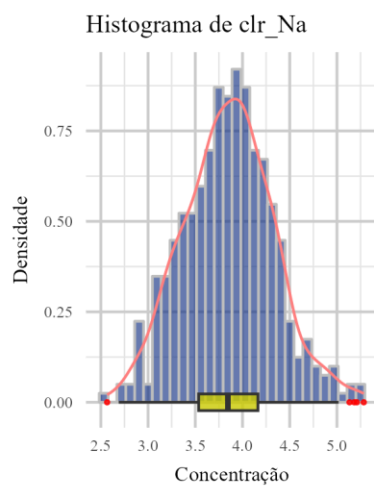


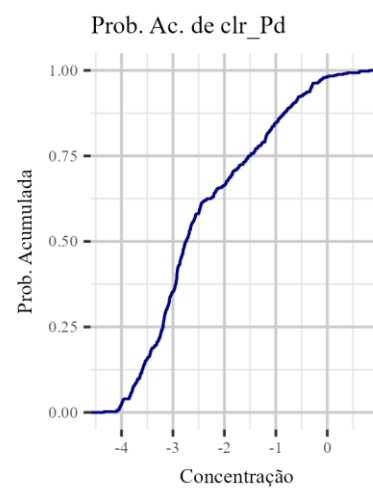
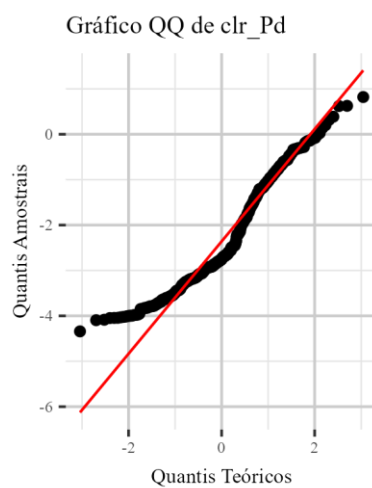
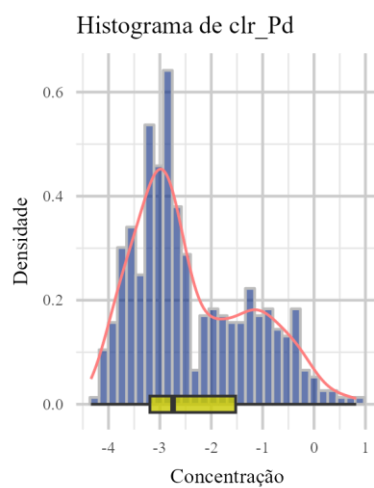
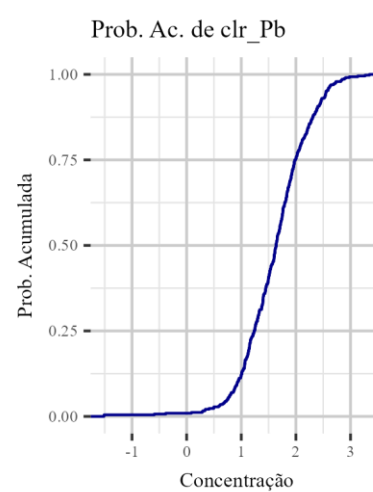
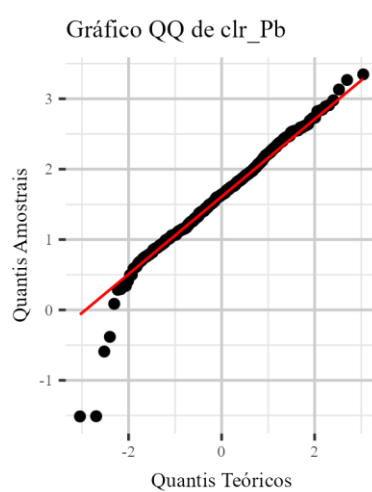
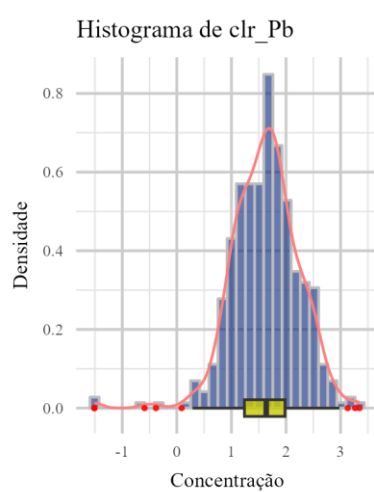
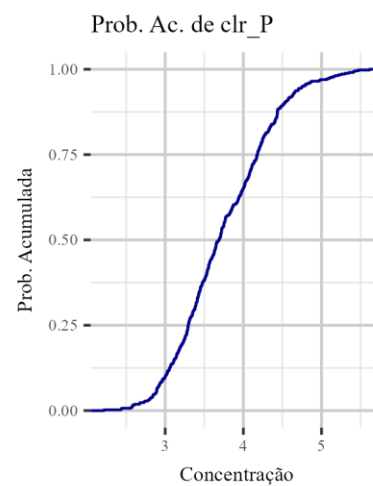
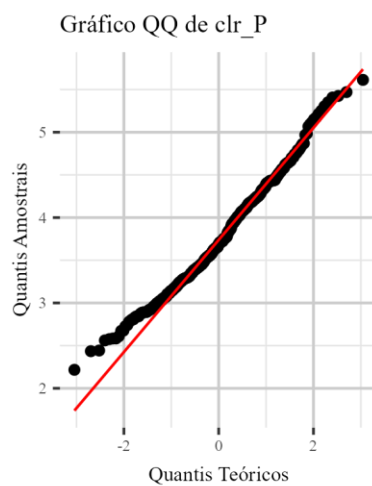
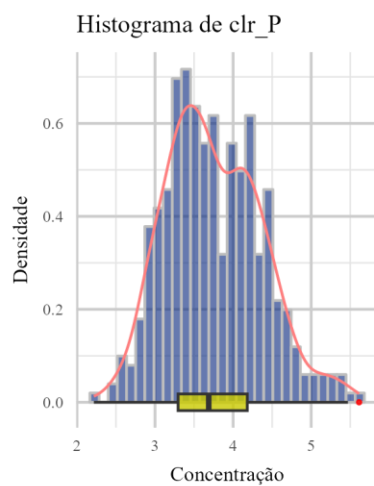


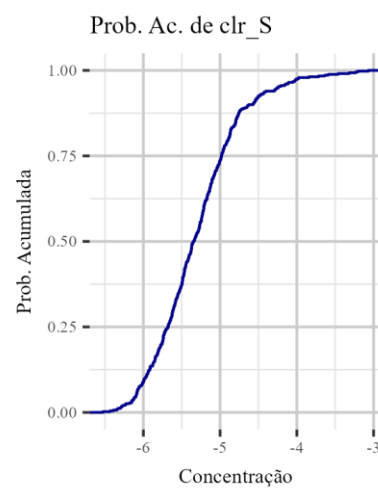
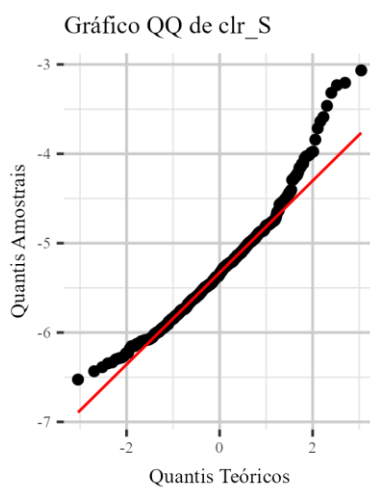
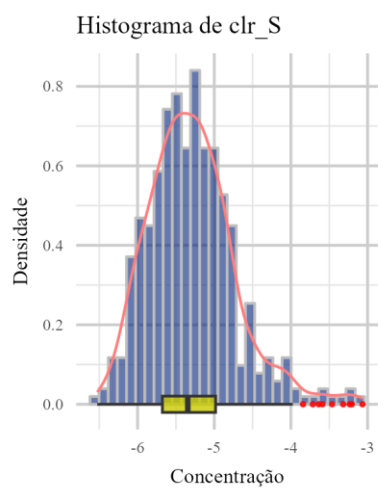
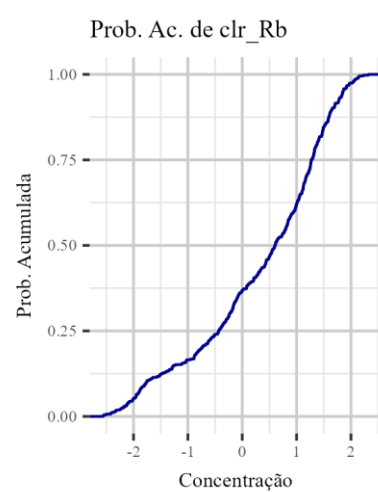
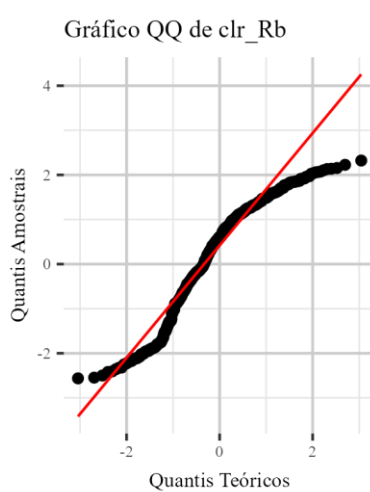
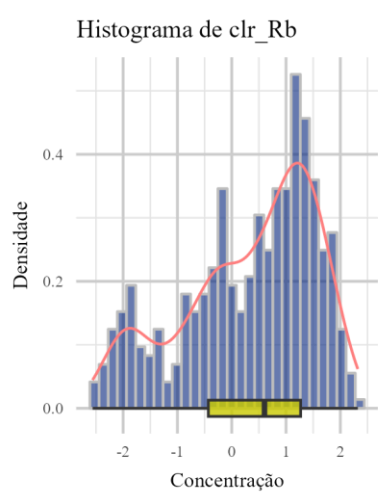
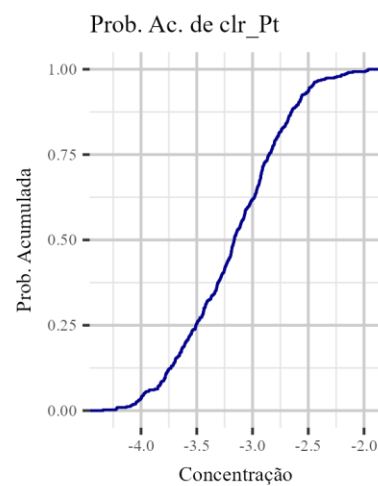
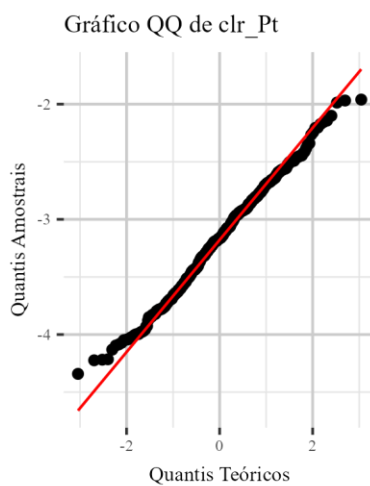
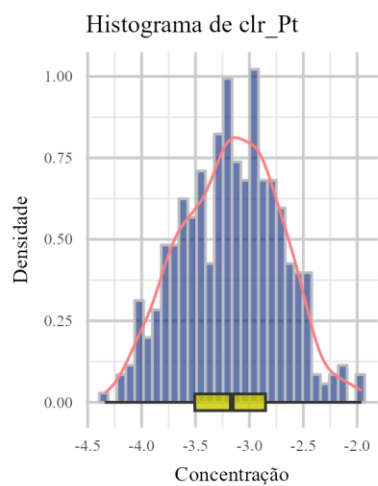


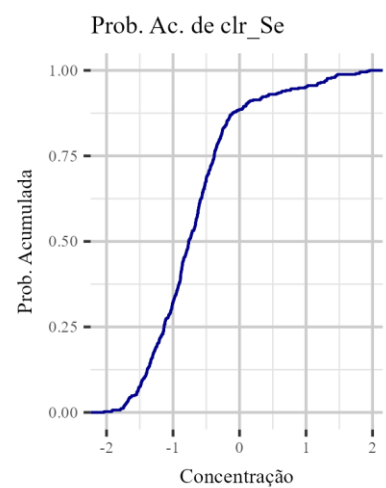
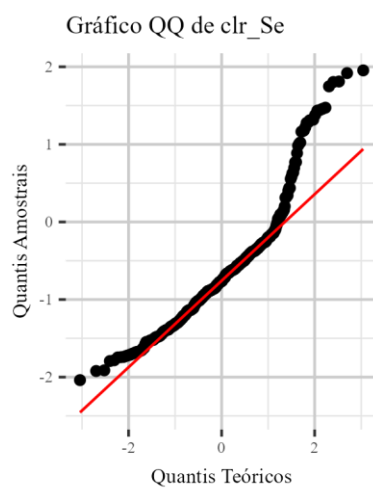
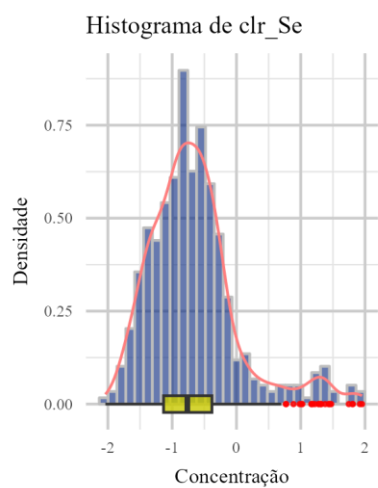
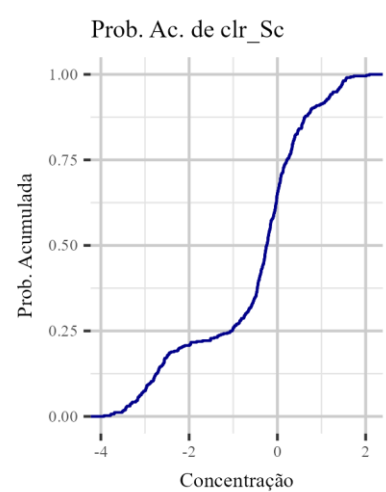
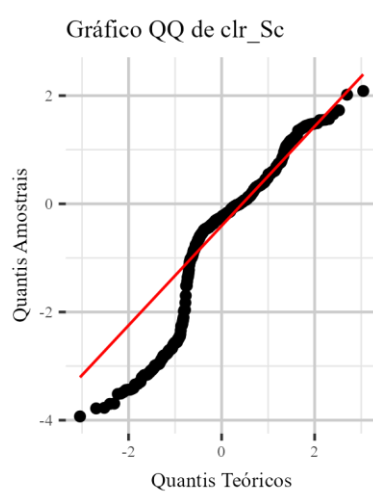
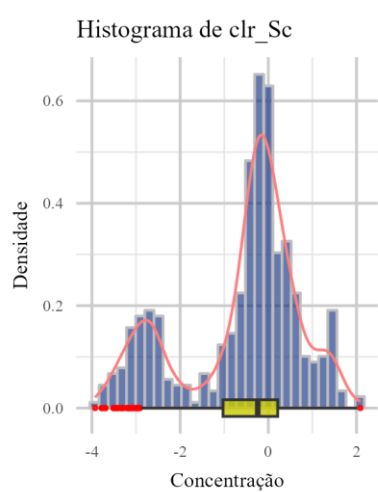
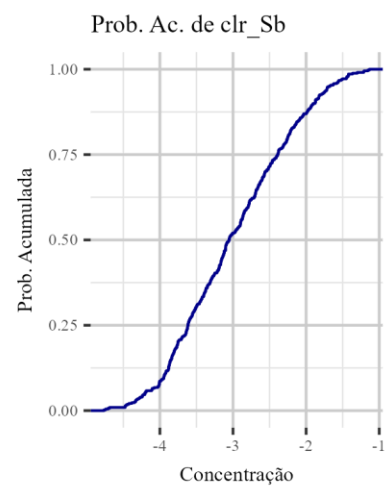
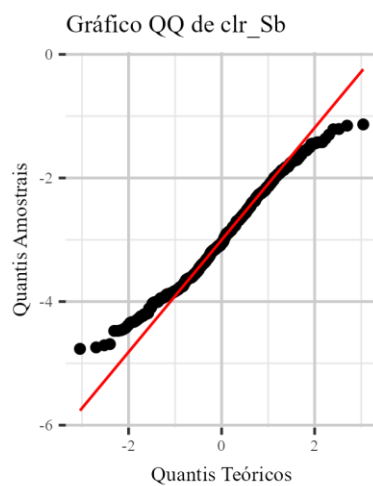
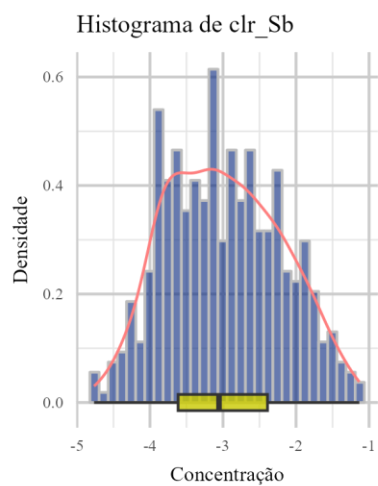


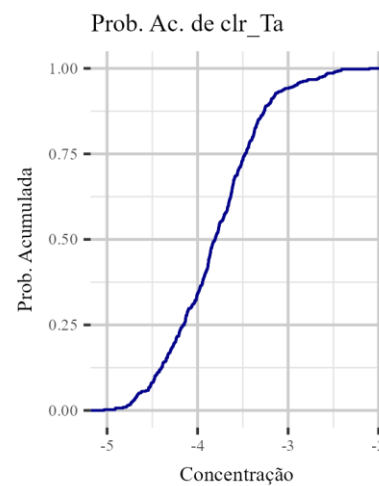
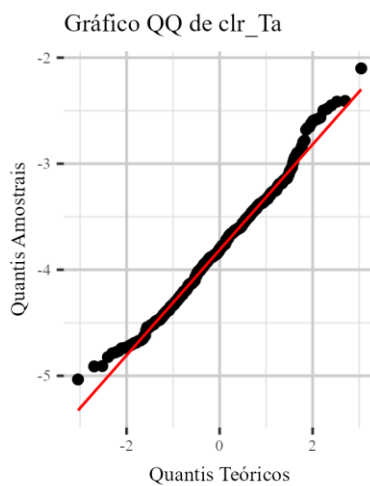
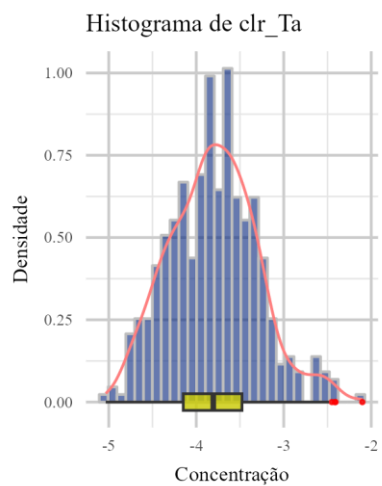
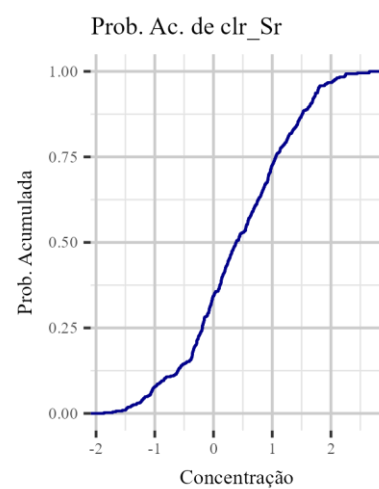
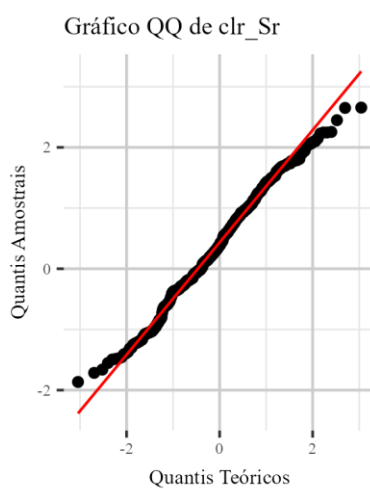
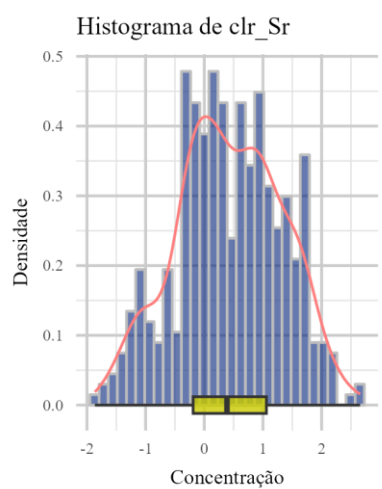
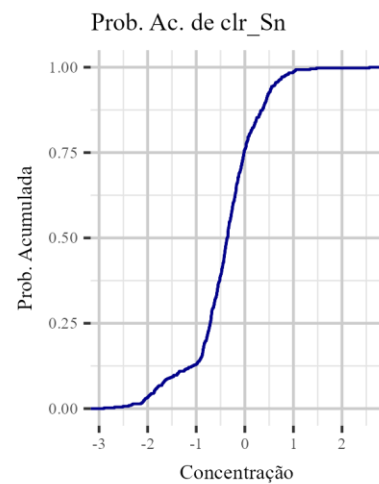
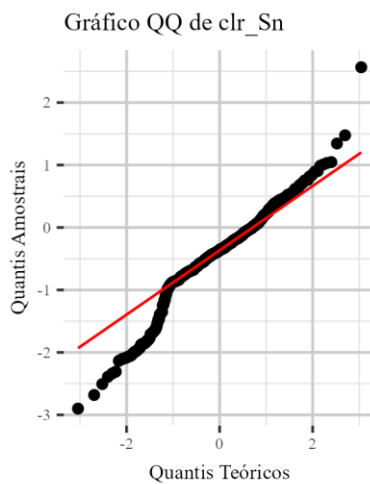
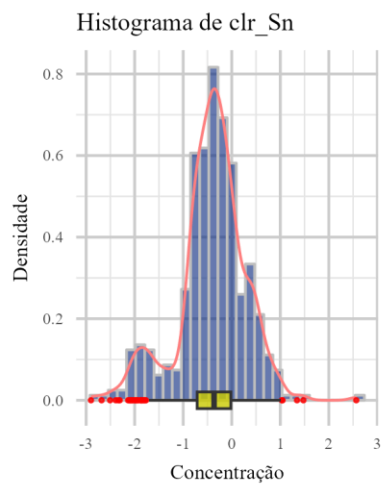


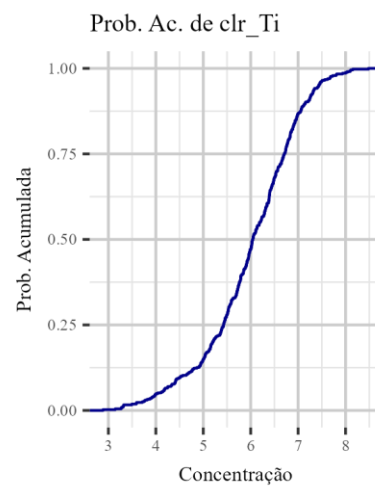
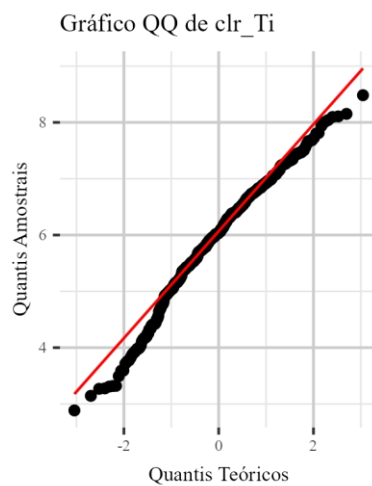
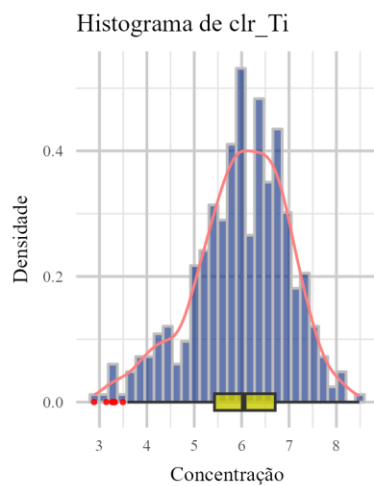
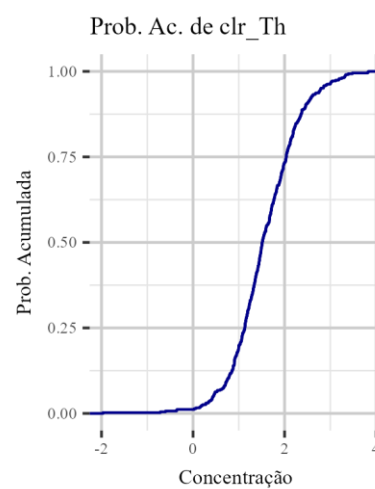
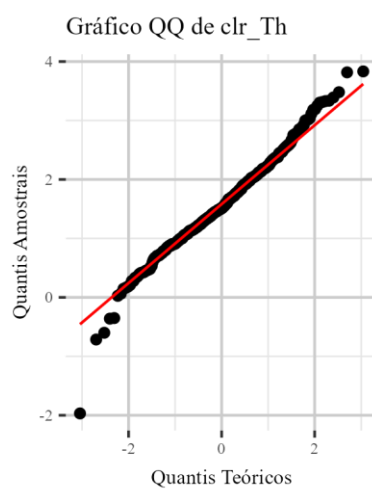
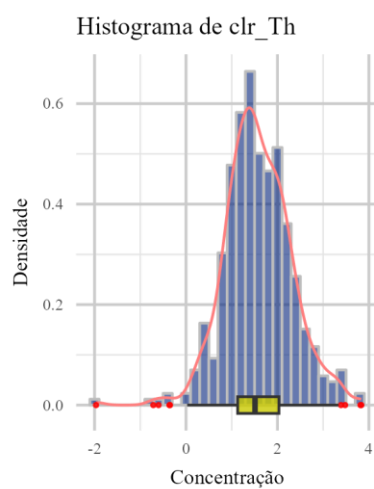
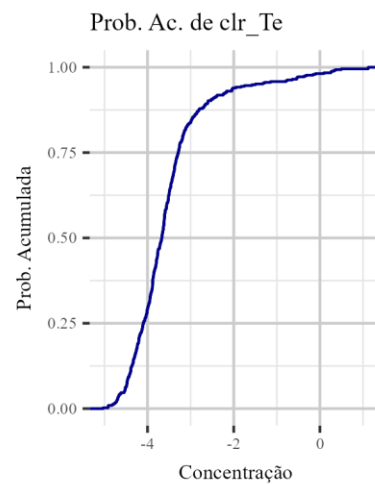
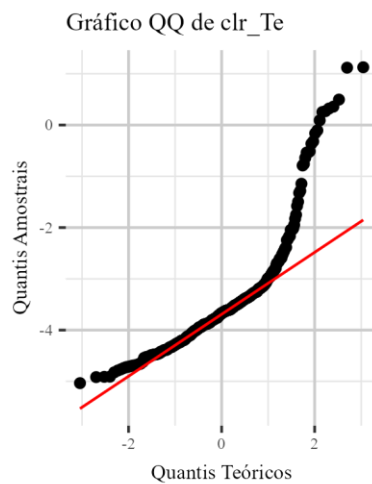
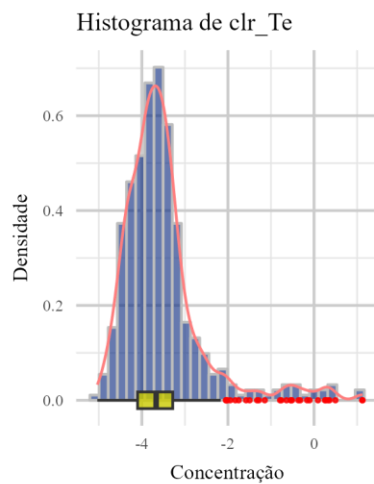


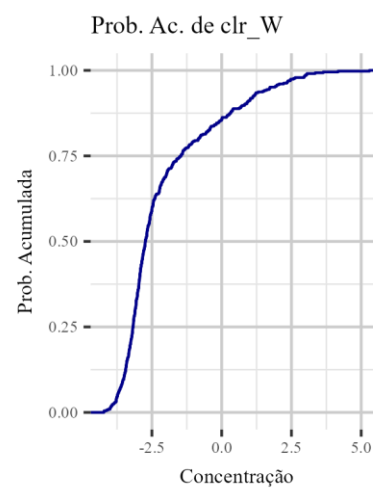
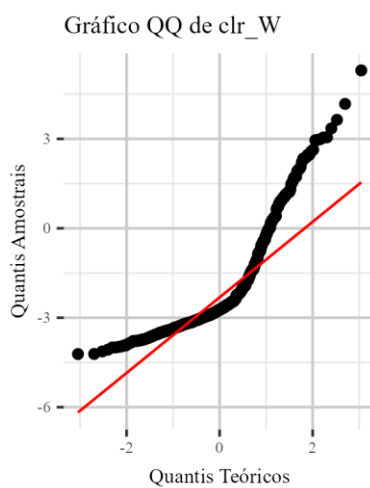
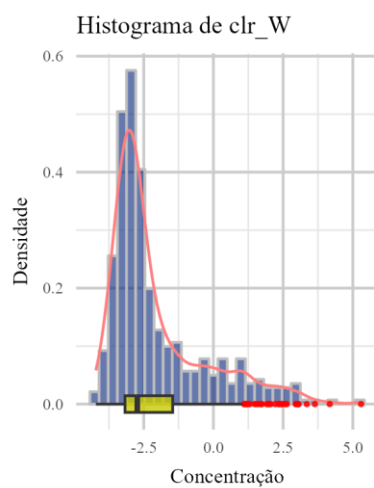
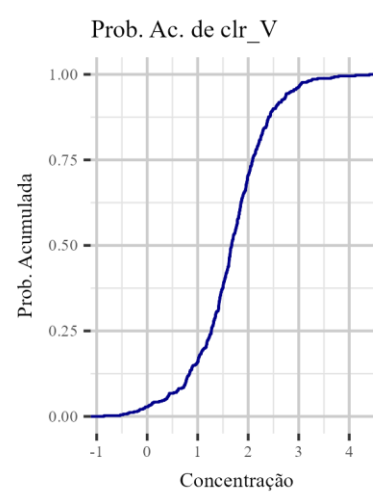
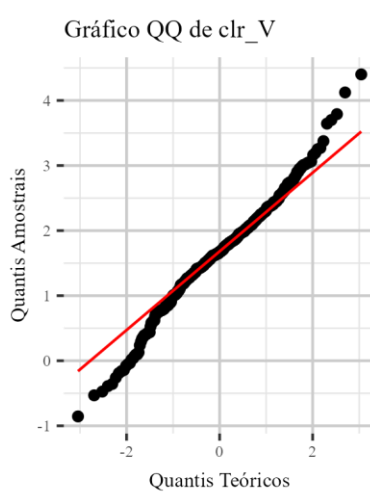
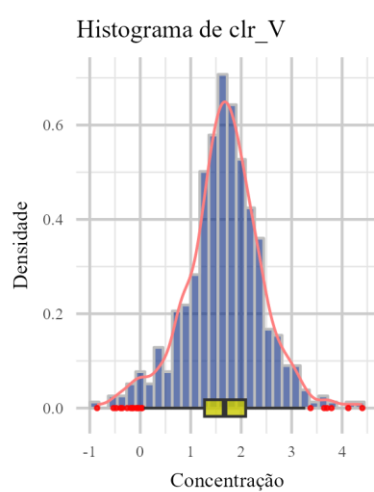
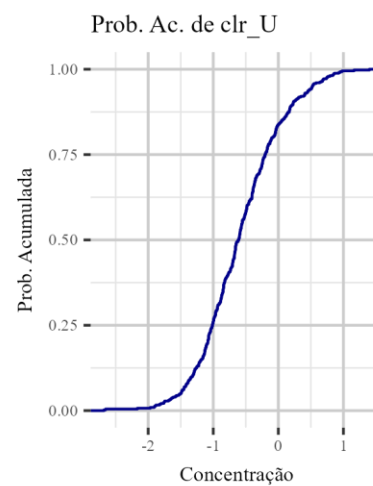
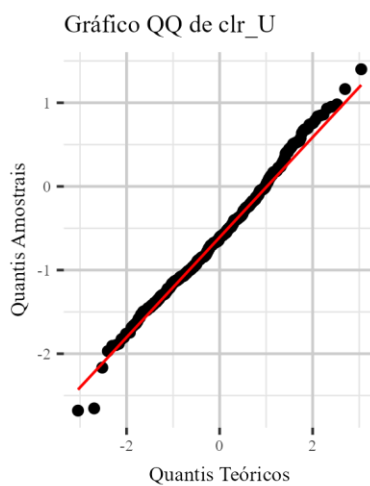
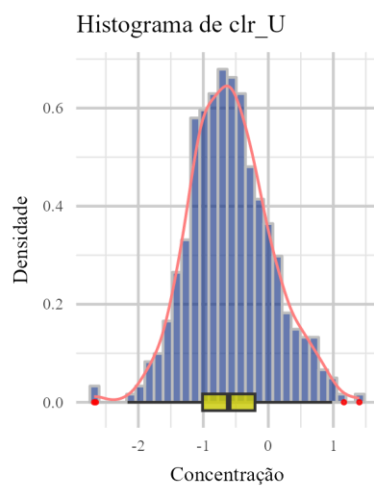


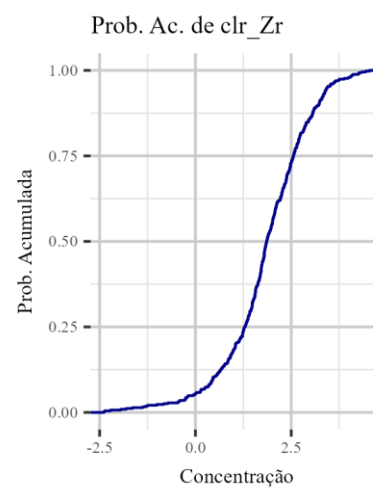
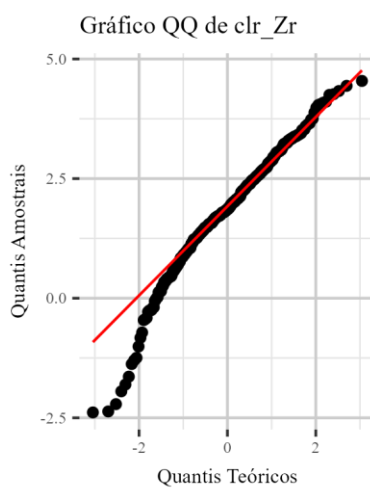
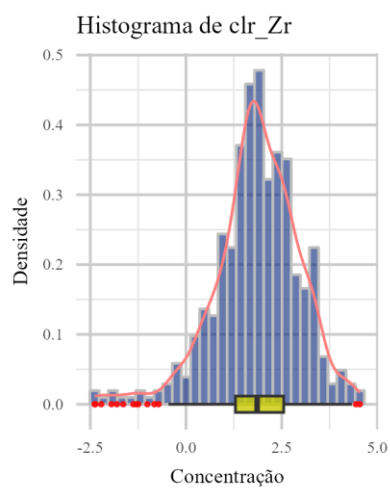
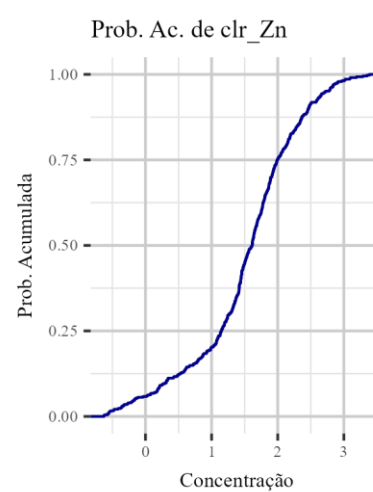
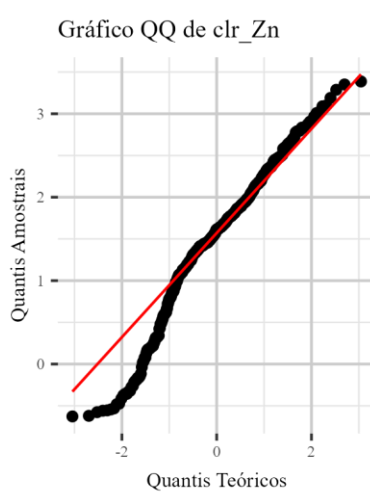
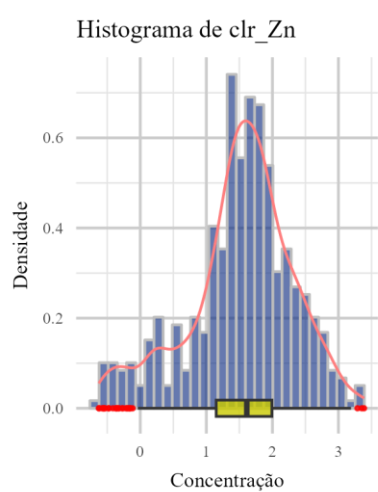
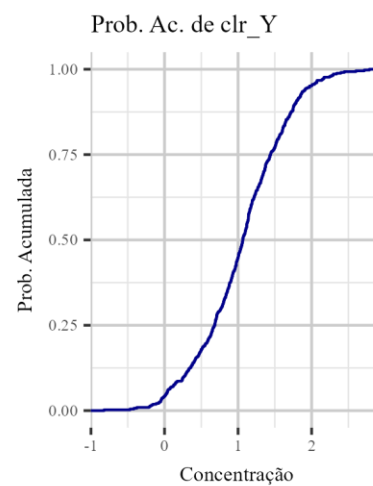
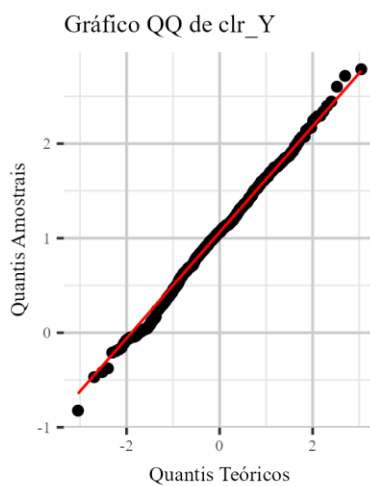
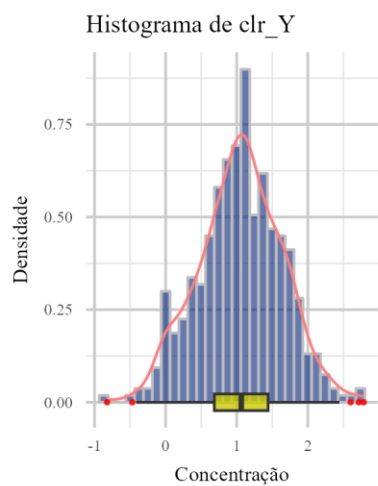




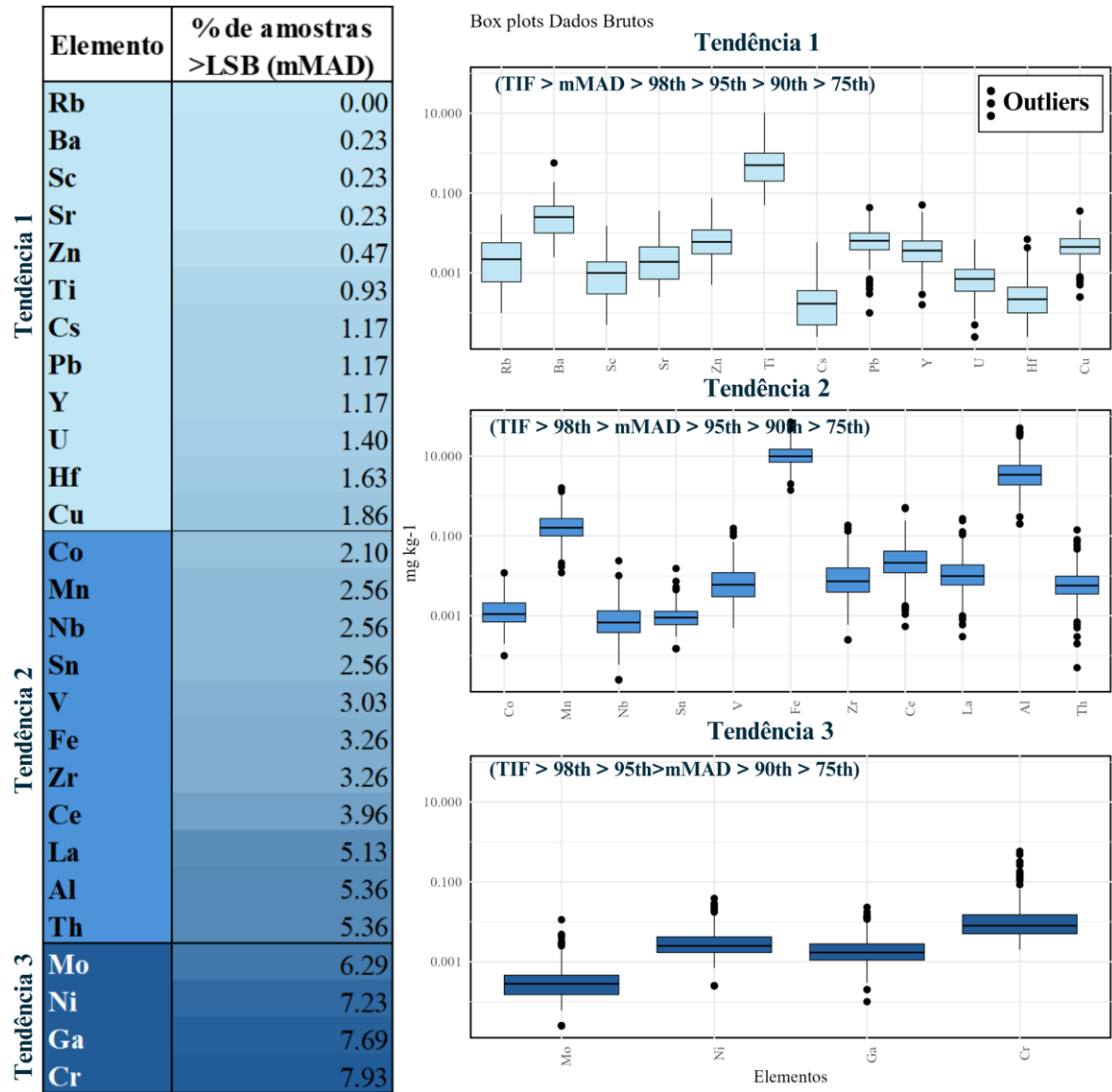






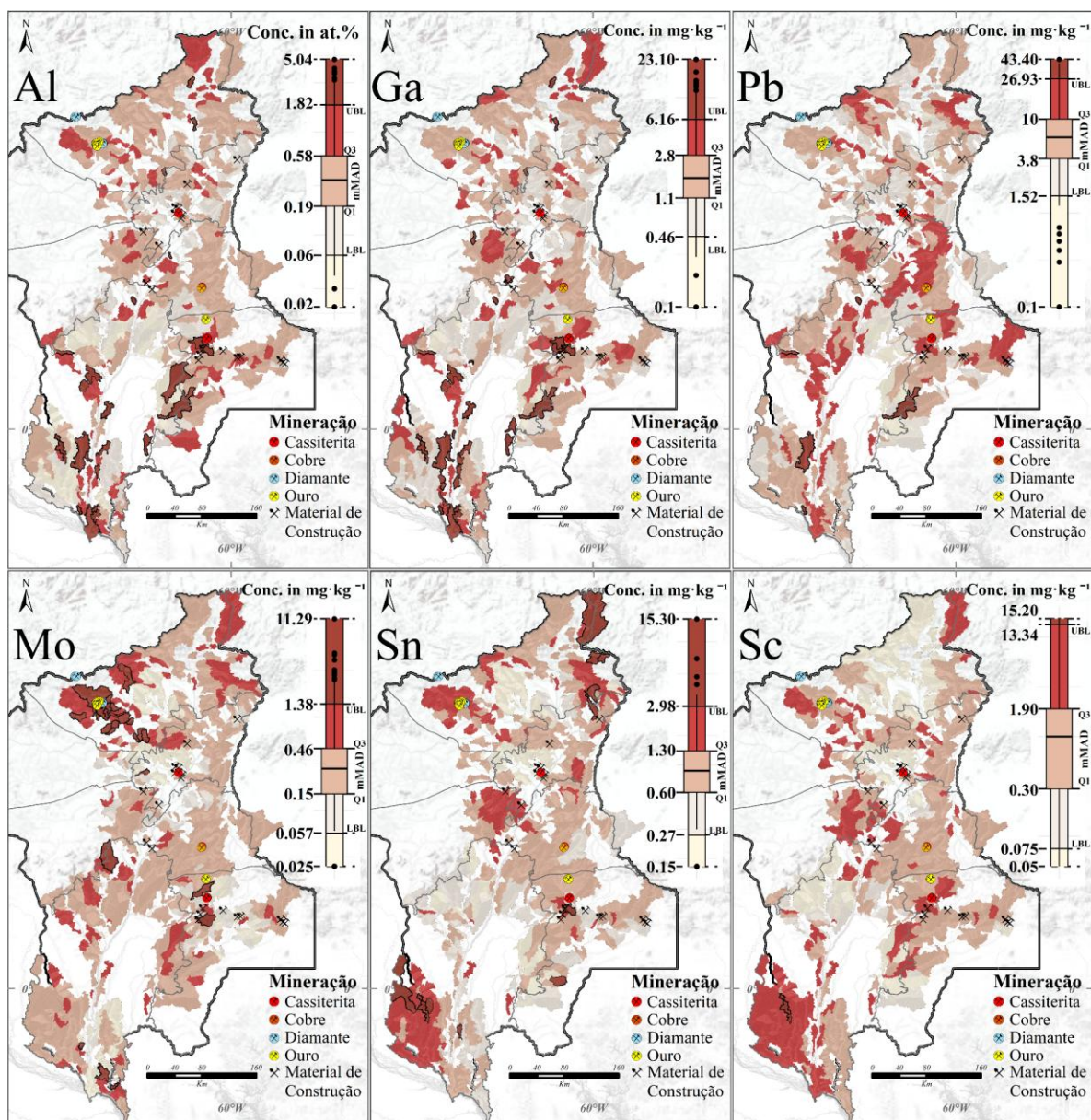


APÊNDICE B - TENDÊNCIAS NOS LIMITES SUPERIORES DOS MÉTODOS DE DEFINIÇÃO DE BACKGROUND/BASELINE: MMAD, TIF, PERCENTIS 75TH, 90TH, 95TH E 98TH

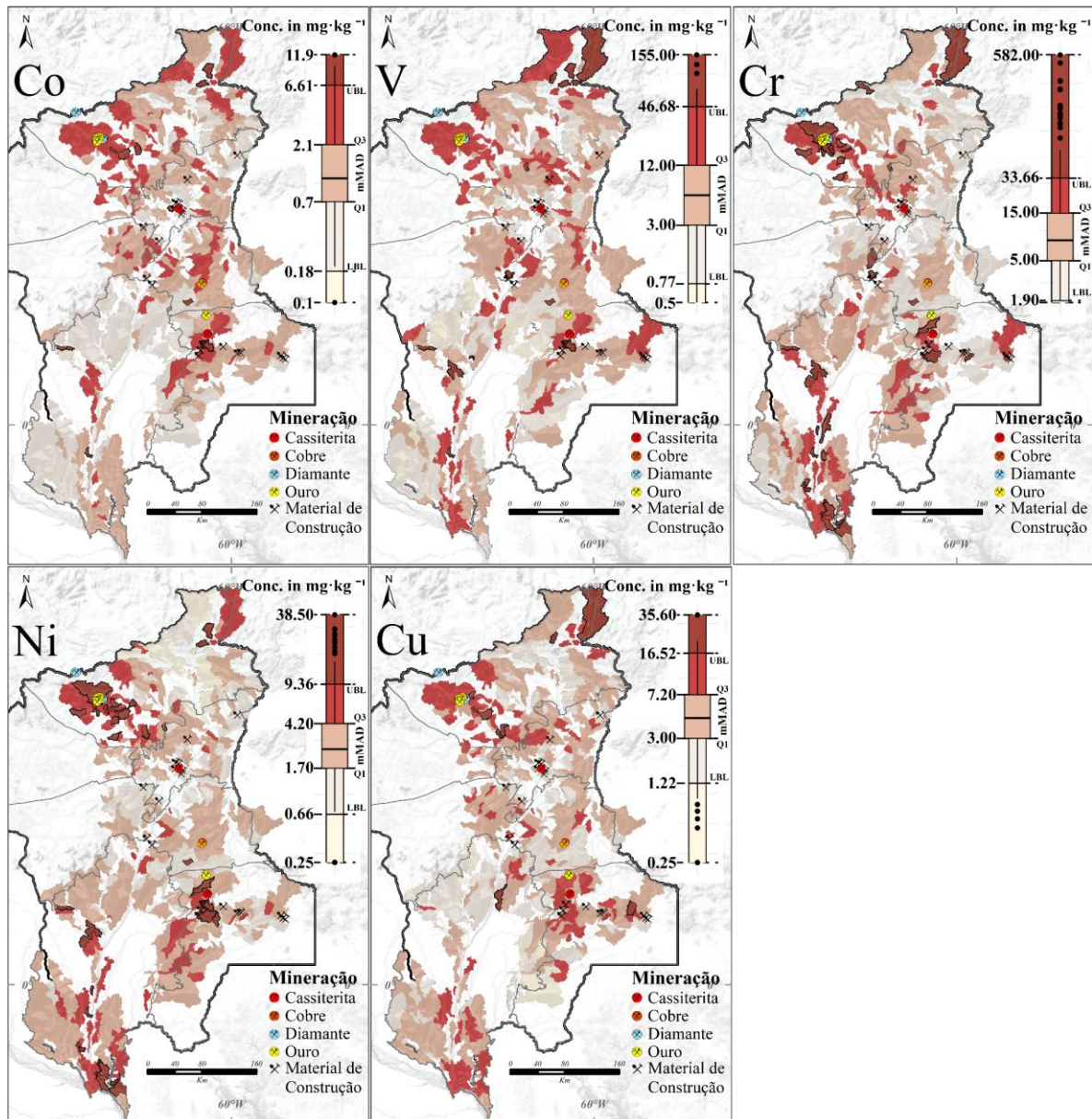


**APÊNDICE C - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO UNIELEMENTAR DE ACORDO
COM O LIMITE DO MÉTODO MMAD, APRESENTADOS COM BASE NOS
CRITÉRIOS DE AGRUPAMENTO DEFINIDOS PELA ANÁLISE DE
CLUSTER**

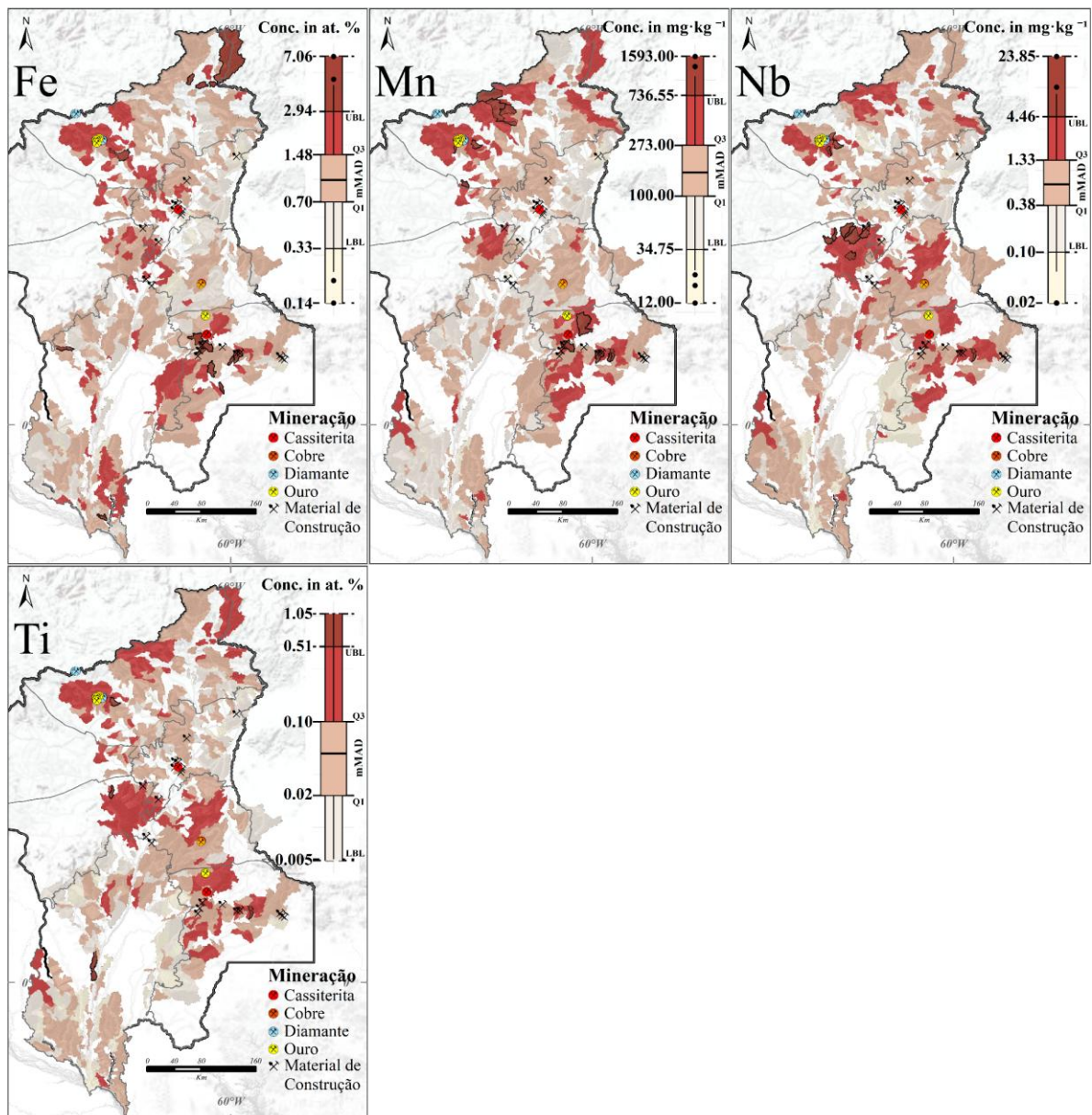
Al-Ga-Pb-Mo-Sn-Sc



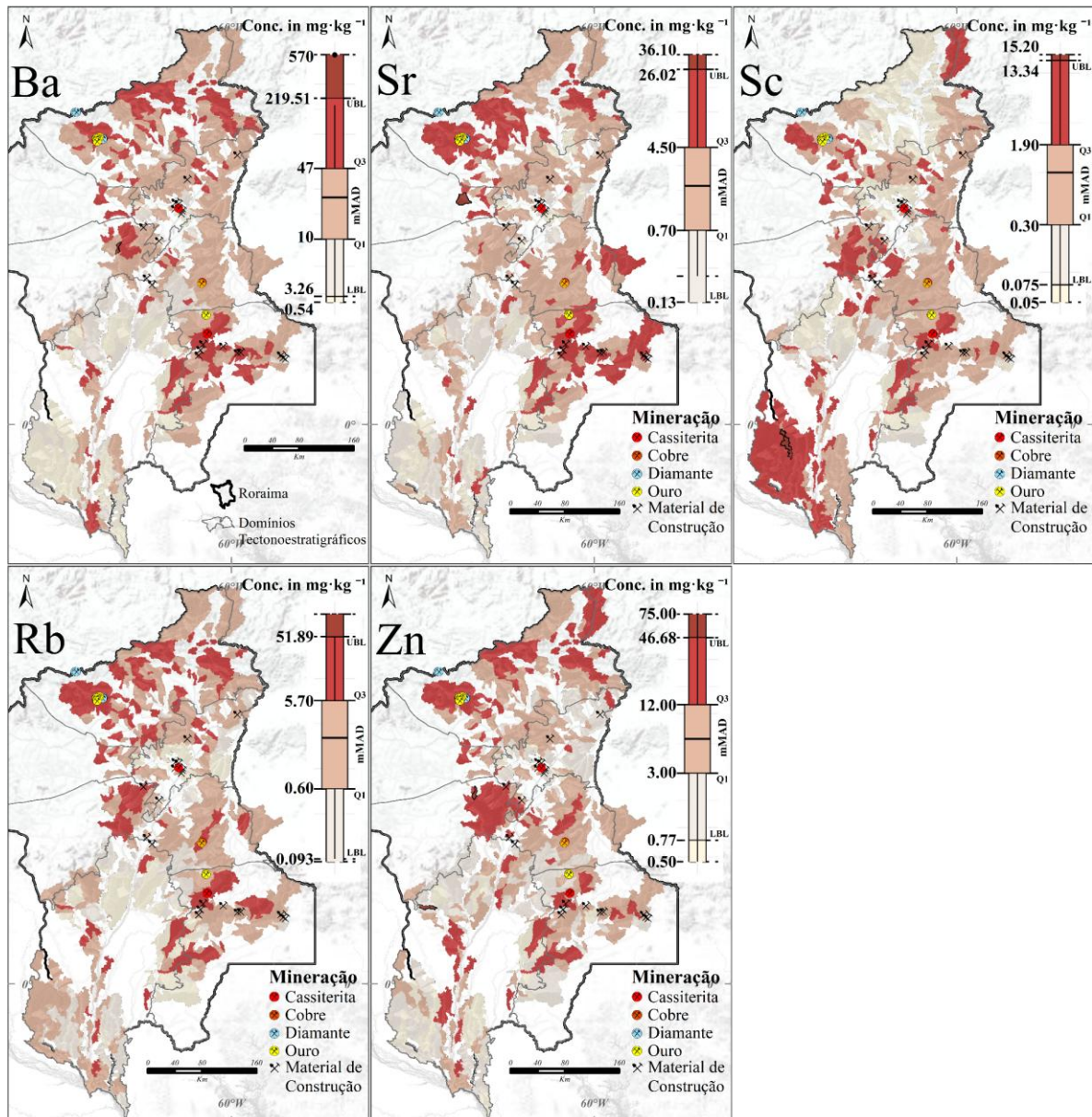
Co-V-Cr-Ni-Cu



Fe-Mn-Nb-Ti



Ba-Sr-Sc-Rb-Zn



Ce-La-Y-Th-U

