

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**

**ANDRÉ VINÍCIUS CRISPINIANO DE OLIVEIRA**

**METAIS PESADOS EM SOLOS DOS BIOMAS BRASILEIROS  
MONITORADOS PELO PROGRAMA DE PESQUISA EM  
BIODIVERSIDADE**

**RECIFE**

**2025**

André Vinícius Crispiniano de Oliveira  
Geógrafo

**Metais pesados em solos dos biomas brasileiros monitorados pelo Programa de Pesquisa  
em Biodiversidade**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientadora: Caroline Miranda Biondi

Coorientador: Nathan Castro Fonseca

**Recife  
2025**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Bibliotecário(a): Lorena Teles – CRB-4 1774

O48m Oliveira, André Vinícius Crispiniano de.  
Metais pesados em solos dos biomas brasileiros monitorados pelo programa de pesquisa em biodiversidade / André Vinícius Crispiniano de Oliveira. – Recife, 2025.  
88 f.; il.

Orientador(a): Caroline Miranda Biondi.  
Co-orientador(a): Nathan Castro Fonseca.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Metais pesados - Aspectos ambientais. 2. Biodiversidade - Conservação. 3. Solos - Descontaminação. 4. Pesquisa ecológica - Levantamentos I. Biondi, Caroline Miranda, orient. II. Fonseca, Nathan Castro, coorient. III. Título

CDD 631.4

ANDRÉ VINÍCIUS CRISPINIANO DE OLIVEIRA

**Metais pesados em solos dos biomas brasileiros monitorados pelo Programa de Pesquisa em Biodiversidade**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 28 de fevereiro de 2025

---

Profa. Dra. Caroline Miranda Biondi

Orientadora

Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dra. Ana Carolina B. Lins e Silva

Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Dra. Clarissa Buarque Vieira

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dedico esse trabalho a família e amigos que foram, são e serão a minha base para que eu possa conquistar meus sonhos e compartilhar com eles as minhas felicidades.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por colocar pessoas tão incríveis na minha vida, que me faz todos os dias querer ser o melhor que posso ser e por não abandonar meus sonhos. Por guardar e proteger aqueles que eu amo e iluminar meu caminho.

Gostaria de agradecer também ao Programa de Pesquisa em Biodiversidade e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia, por dar bases ao desenvolvimento da minha pesquisa. E a Universidade Federal Rural de Pernambuco por ser minha segunda casa e ser a base onde ocorreram minhas pesquisas e crescimento como pessoa e pesquisador.

Agradeço a Pós-graduação em Ciência do Solo por ter profissionais qualificados que conseguem compartilhar suas experiências e conhecimentos e acolher tão bem as necessidades da minha pesquisa.

Gostaria de agradecer ao grupo de pesquisa o qual faço parte, o Grupo de Pesquisa em Química Ambiental de Solos por disponibilizar a infraestrutura para a realização da minha dissertação e as trocas de conhecimento, através das conversas e discussões.

Obrigado por todo o apoio não só em relação ao profissional, mas todo o suporte emocional também a você Prof. Doutora Caroline Miranda Biondi e ao Doutor Nathan Castro. Vocês além de um ótimo suporte em relação à orientação, foram de extrema importância para conversas e meu desenvolvimento como pessoa. Outrossim, agradeço a Gabriel e Adriana por me auxiliarem tanto com minhas análises quanto me dando o suporte para a construção do meu trabalho.

Não poderia deixar de agradecer as amigas que eu fiz nestes dois anos, os quais me trouxeram diversas experiências. Desde as aulas com a minha turma, como os momentos de descontração vocês foram muito importantes para mim.

Gostaria de agradecer aos meus familiares, principalmente as mulheres da minha família, por serem exemplos de força, coragem e determinação para não desistir. E que por mais que o mundo fosse injusto, elas motivaram e ainda motivam as pessoas ao seu redor.

Agradeço também aos meus amigos e amigas que tanto amo desde o tempo de escola por sempre me escutar, da mesma forma que minha família e estarem comigo para dividir minhas alegrias e tristezas. Vocês também são um dos motivos pelos quais eu estou onde estou. Sou muito grato por ter vocês em minha vida.

Muito obrigado por tudo, principalmente pelo apoio e carinho de Ana Luiza, Lohana Torquato e Karina Bispo. Saibam que vocês são as melhores irmãs científicas que eu poderia ter. Sem vocês, iriam ser menos coloridos esses dois anos de aventuras e experiências. Agradeço

muito a Deus por ter conhecido vocês, minhas irmãs e companheiras que vão além da pós-graduação, vocês são para minha vida toda.

Gostaria de agradecer a minha família, Ana Carla e Ezi Oliveira por serem a minha base, por sempre me apoiarem, me amar e cuidar de mim, mesmo sendo um ser humano pequeno com muito o que aprender. Amo vocês mais do que vocês conseguem imaginar. Podem ter certeza de que se não fossem vocês, não teria conseguido nem ser nem metade da pessoa que sou hoje. O carinho de vocês chega até mim e me faz querer continuar a trilhar o caminho que escolhi.

“Durante toda nossa jornada, percebemos que recebemos muito carinho e auxílio de várias pessoas em diversos lugares. Por isso agora é a nossa vez de devolver essa felicidade” (Hiromu Arakawa, 2010, adaptado).

## **Metais pesados em solos dos biomas brasileiros monitorados pelo Programa de Pesquisa em Biodiversidade.**

### **RESUMO GERAL**

Os metais pesados podem representar risco à micro e macrofauna devido à sua toxicidade e potencial de bioacumulação, entrando na cadeia trófica e prejudicando a saúde humana. Sua presença pode ser natural, decorrente do intemperismo de rochas, ou advinda de atividades antrópicas. O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação criou, em 2004, o Programa de Pesquisa em Biodiversidade (PPBIO), para atender às metas da Convenção sobre Diversidade Biológica, em resposta a crescente preocupação global em relação ao uso e conservação dos recursos naturais, tornando-se uma importante iniciativa de monitoramento da biodiversidade no Brasil. O presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise abrangente sobre a presença de metais pesados nos biomas brasileiros, a partir de duas abordagens complementares: (i) uma revisão bibliométrica da literatura científica relacionada à ocorrência de metais pesados nos seis biomas do Brasil; e (ii) a avaliação dos teores totais e ambientalmente disponíveis de metais pesados no solo do Parque Estadual de Dois Irmãos (PEDI), localizado no município de Recife, Pernambuco, representando um fragmento do bioma Mata Atlântica. O estudo bibliométrico incluiu a análise de 400 publicações em bancos de dados distintos. O período selecionado para a mineração das publicações foi entre 1950 a 2024. Os biomas Amazônia, Mata Atlântica e Cerrado se destacaram como os biomas mais pesquisados com 176, 104 e 83 trabalhos, respectivamente. E os metais mais estudados foram zinco, com 220 trabalhos, seguidos do cobre, com 208, e do manganês, com 178 menções, devido ao fato de serem considerados micronutrientes para as plantas. A segunda parte do trabalho, que aborda os teores de metais pesados encontrados nos solos do PEDI, foi baseada na obtenção de dados primários. Inicialmente, foram realizadas análises químicas e granulométricas com o intuito de caracterizar os solos. Posteriormente foram quantificados os valores teores totais de metais pesados através da metodologia de fluorescência de raios-X com o aparelho S1 TITAN, modelo 800, e determinados os teores ambientalmente disponíveis de Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn utilizando o método 3051A (EPA, 1998). Os solos analisados apresentaram baixos valores de pH, baixas saturações por bases e textura variando entre arenosa e muito arenosa. Os teores totais disponíveis no solo do PEDI variaram entre 0,002 a 107,00 mg kg<sup>-1</sup> para Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn. Os teores ambientalmente disponíveis dos metais variaram entre 0,35 a 32,60 mg kg<sup>-1</sup> para os elementos estudados. Além disso, foi possível observar diferenças significativas entre os estágios sucessionais da floresta. Os teores de metais pesados na área do PEDI foram inferiores aos valores de referência de qualidade do solo, indicando a inexistência de contaminação, por esses metais, na área de estudo.

Palavras-chave: Ambiente. Contaminação. Bibliometria. RAPELD

## **Heavy Metals in Soils of Brazilian Biomes Monitored by the Biodiversity Research Program**

### **GENERAL ABSTRACT**

Heavy metals may pose risks to micro and macrofauna due to their toxicity and bioaccumulation potential, entering the trophic chain and harming human health. Their presence may be natural, resulting from rock weathering, or derived from anthropogenic activities. The Ministry of Science, Technology, and Innovation established, in 2004, the Biodiversity Research Program (PPBIO), to meet the goals of the Convention on Biological Diversity, in response to the growing global concern regarding the use and conservation of natural resources, becoming an important biodiversity monitoring initiative in Brazil. This study aimed to conduct a comprehensive analysis on the presence of heavy metals in Brazilian biomes, based on two complementary approaches: (i) a bibliometric review of scientific literature related to heavy metal occurrence in Brazil's six biomes; and (ii) the assessment of total and environmentally available concentrations of heavy metals in the soil of Dois Irmãos State Park (PEDI), located in the municipality of Recife, Pernambuco, representing a fragment of the Atlantic Forest biome. The bibliometric study included the analysis of 400 publications from different databases. The selected period for mining the publications ranged from 1950 to 2024. The Amazon, Atlantic Forest, and Cerrado biomes stood out as the most researched, with 176, 104, and 83 studies, respectively. The most studied metals were zinc (220 studies), followed by copper (208), and manganese (178 mentions), due to being considered micronutrients for plants. The second part of the study, addressing heavy metal concentrations in PEDI soils, was based on primary data collection. Initially, chemical and granulometric analyses were carried out to characterize the soils. Subsequently, total heavy metal concentrations were quantified using X-ray fluorescence (XRF) with the S1 TITAN 800 device, and environmentally available concentrations of Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, and Zn were determined using Method 3051A (EPA, 1998). The analyzed soils exhibited low pH values, low base saturation, and texture ranging from sandy to very sandy. The total concentrations in PEDI soils varied between 0.002 and 107.00 mg kg<sup>-1</sup> for Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, and Zn. The environmentally available concentrations of the metals ranged from 0.35 to 32.60 mg kg<sup>-1</sup> for the studied elements. Additionally, significant differences were observed between the forest's successional stages. The heavy metal levels in PEDI were below the soil quality reference values, indicating no contamination by these metals in the study area.

**Keywords:** Environment. Contamination. Bibliometrics. RAPELD.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Esquema ilustrativo da estratégia de busca adotada no trabalho.....	36
<b>Figura 2</b> – Esquema de informações retiradas dos materiais selecionados.....	36
<b>Figura 3</b> – Regressão de contagem por ano dos estudos verificados .....	39
<b>Figura 4</b> – Distribuição geográfica dos locais de estudos com dados de metais pesados nos solos de diferentes biomas brasileiros .....	41
<b>Figura 5</b> – Distribuição da quantidade de estudos científicos com dados de metais pesados em solo, por bioma no Brasil.....	42
<b>Figura 6</b> – Número de citações dos metais pesados, destacando a frequência de estudo de cada metal .....	46
<b>Figura 7</b> – Campo de atuação das pesquisas dos estudos selecionados .....	46
<b>Figura 8</b> – Classificação do solo como objeto de estudo.....	48
<b>Figura 9</b> – Classificação dos objetos de estudo secundários selecionados .....	48
<b>Figura 10</b> – Mapa de localização do Parque Estadual de Dois Irmãos, Recife/PE	63
<b>Figura 11</b> – Unidade geológica da área de estudo .....	64
<b>Figura 12</b> – Mapa de localização das trilhas dentro do sistema RAPELD, utilizadas na coleta de solos no Parque Estadual de Dois Irmãos - PE.....	65
<b>Figura 13</b> – Caracterização química e fração granulométrica do estágio sucessional jovem na profundidade 0 a 10 centímetros do Parque Estadual de Dois Irmãos com médias no formato losangular vermelho .....	70
<b>Figura 14</b> – Caracterização química e fração granulométrica do estágio sucessional maduro na profundidade 0 a 10 centímetros do Parque Estadual de Dois Irmãos, com médias no formato losangular vermelho .....	71
<b>Figura 15</b> – Análise de Componentes Principais sobre os diferentes estágios de sucessão do PEDI e os metais pesados na profundidade 0 a 10 cm .....	74
<b>Figura 16</b> – Correlação de Pearson entre os teores de metais pesados ambientalmente disponíveis, atributos químicos e fração do solo nos solos do PEDI .....	75
<b>Figura 17</b> – Análise de Componente Principal entre as parcelas do PEDI e os metais pesados, na profundidade 0 a 10 cm .....	76

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Número de trabalhos sobre metais pesados em solo dos biomas brasileiros, no período entre 1979-2024 .....	40
<b>Tabela 2</b> - Análise descritiva dos teores ambientalmente disponíveis nos diferentes estágios sucessionais do Parque Estadual de Dois Irmãos na profundidade 0 a 10 centímetros ..	71
<b>Tabela 3</b> - Comparação entre os teores de metais pesados do PEDI com valores de referência de qualidade pelo país .....	72
<b>Tabela 4</b> - Valores de teores totais no solo do Parque estadual de dois irmãos em diferentes estágios sucessionais na profundidade 0 a 10 centímetros .....	77

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	14
1.1 Hipóteses.....	16
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	17
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
2.1 Metais Pesados, características gerais.....	18
2.2 Investigação de metais pesados nos solos mundiais.....	19
2.3 Investigação de Metais Pesados no Solos Brasileiros.....	20
Referências bibliográficas.....	23
3 METAIS PESADOS EM BIOMAS BRASILEIROS: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA .....	31
Resumo .....	31
Abstract.....	32
3.1 Introdução .....	33
3.2 Material e Métodos .....	35
3.3 Resultados e Discussão .....	38
3.4 Conclusões .....	50
Referências Bibliográficas .....	51
4 ANÁLISE DOS TEORES DE METAIS PESADOS NOS SOLOS DE FRAGMENTO FLORESTAL URBANO MONITORADO PELO PROGRAMA DE PESQUISA EM BIODIVERSIDADE.....	58
Resumo .....	58
Abstract.....	59
4.1 Introdução .....	60
4.2 Material e Métodos .....	62

4.2.1 Área de estudo.....	62
4.2.2 Coleta do solo.....	64
4.2.3 Caracterização química e física do solo do PEDI.....	65
4.2.4 Análise de teores totais e ambientalmente disponíveis (pseudo-totais) de metais pesados .....	66
4.2.5 Análises estatísticas .....	67
4.3 Resultado e Discussão .....	69
4.3.1 Características químicas avaliadas no solo do PEDI .....	69
4.4 Conclusões.....	78
Referências bibliográficas .....	79
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	86

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é um país detentor de uma vasta biodiversidade, possuindo seis biomas terrestres: Amazônia, Mata Atlântica, Cerrado, Caatinga, Pampas e Pantanal e uma extensa costa marinha. Segundo Mucina (2019), biomas são conjuntos de vida animal e vegetal, constituídos por agrupamentos fitogeográficos semelhantes, moldadas por processos históricos de formação da paisagem, resultando em uma composição biológica característica de cada região. No entanto, esses sistemas vêm sendo impactados por diversas pressões ambientais, com destaque para a poluição dos ecossistemas, majoritariamente associada às atividades antrópicas.

O bioma Amazônia é o maior em extensão no território brasileiro e, por apresentar grande diversidade de nichos ecológicos, tem o status de maior reserva ecológica do planeta. Este bioma, no Brasil, está presente nos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Roraima, Maranhão, Mato Grosso, Rondônia e Tocantins. O bioma está exposto a diversas pressões humanas: o desmatamento para expansão agropecuária, especialmente a pecuária extensiva e agricultura; a exploração madeireira ilegal; a mineração, muitas vezes realizada de forma clandestina; além da construção de grandes empreendimentos de infraestrutura, como hidrelétricas e rodovias. (BARDY PRADO, 2021).

O bioma Mata Atlântica, por sua vez, possuía uma floresta exuberante, com área de aproximadamente de 1.350.000 km<sup>2</sup>, restando, atualmente, cerca de 28% de sua cobertura original, abrigando algumas das maiores cidades brasileiras (REZENDE et al., 2018).

Historicamente a Mata Atlântica é marcada pela sua exploração, urbanização, industrialização e expansão agrícola. Essas pressões resultaram em expressivas perdas de habitat, ao mesmo tempo em que a região abriga uma elevada riqueza de espécies endêmicas.

Por essas razões, a Mata Atlântica é considerada uma área prioritária para a conservação da biodiversidade, sendo classificada como um hotspot de biodiversidade (RIBEIRO et al. 2011).

O Cerrado, segundo maior bioma brasileiro, está distribuído entre os estados do Maranhão, Piauí, Tocantins, Bahia, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e São Paulo. Os solos desse bioma são altamente visados para agricultura intensiva, como soja, ou pecuária resultando em um progressivo aumento de áreas desmatadas, também sendo considerado um *hotspot* de biodiversidade.

O bioma Caatinga ocorre na região Nordeste do país. Possui uma biodiversidade adaptada principalmente ao clima quente e seco da região. O bioma tem apresentado uma perda contínua de vegetação nativa, devido a prática extensiva da pecuária e extrativismo de madeira.

O Pantanal é uma área úmida com aproximadamente 150.000 km<sup>2</sup>, localizada no centro da América do Sul, que recebe influência em relação a biodiversidade dos demais biomas. Uma das maiores atividades que contribuiu para a mudança da paisagem da região e, conseqüente, aumentando a degradação foi a expansão da pecuária, com a queima da vegetação nativa (MENDES; OLIVEIRA, 2019).

Os Pampas brasileiros ocupam aproximadamente uma área de 176.000 km<sup>2</sup>, representando 2% do território brasileiro, localizado na região Sul do país. As vegetações predominantes na região são arbustivas propiciando a agropecuária como principal atividade econômica e conseqüentemente a degradação do ecossistema, junto com o crescimento urbano (SANTOS et al., 2024).

Desde a Rio-92, com a Convenção sobre Diversidade Biológica, os países intensificaram a coleta de dados sobre biodiversidade. No Brasil, uma das iniciativas tomadas foi a criação do Programa de Pesquisa em Biodiversidade (PPBio) em 2004. O programa tem como objetivo ampliar e divulgar o conhecimento sobre a biodiversidade brasileira utilizando pesquisas de curta e longa duração, que apoiam a tomada de decisões sobre o uso dos recursos naturais (ROSA et al., 2021). Apesar de ser um dos pioneiros na criação de políticas de conservação, o Brasil ainda possui poucas informações sobre os solos em seus diferentes biomas.

O solo é um recurso natural essencial, participando de todos os ciclos de nutrientes e servindo como base para os ecossistemas e a biodiversidade. Diante da crescente pressão antrópica sobre os biomas, a contaminação por metais pesados surge como uma possibilidade preocupante, capaz de comprometer a qualidade ambiental e a integridade dos ecossistemas. A acumulação desses metais pode levar à degradação do solo, afetando diretamente os organismos que dele dependem. No entanto, ainda carecemos de um levantamento amplo e sistemático que permita conhecer com precisão a condição atual dos solos nos diferentes biomas do país.

Os metais pesados são um grupo de elementos químicos que possuem alta densidade e que dependendo de sua concentração podem causar problemas de contaminação e poluição nos ecossistemas. Esses elementos, podem ter origem em diversas fontes, sejam elas naturais ou antrópicas. A contaminação do solo advinda desse grupo de elementos não só prejudica a qualidade do solo, mas também em alguns casos compromete a água e a atmosfera.

Os metais pesados não são degradáveis, ou seja, uma vez encontrado no ambiente tendem a permanecer no ambiente, aumentando o risco de contaminação e conseqüente poluição. Além disso, os metais pesados acumulam-se ao longo da cadeia alimentar. Os efeitos deletérios dos metais pesados são encontrados em diversos países.

Pesquisas bibliométricas são fundamentais para reconhecer as lacunas acerca de determinados temas na Ao analisar a produção científica existente, esses estudos permitem mapear o interesse da comunidade acadêmica, direcionar novas pesquisas e subsidiar ações de monitoramento e tomada de decisão, contribuindo para a gestão ambiental e a preservação dos ecossistemas. Por outro lado, as pesquisas baseadas em dados primários permitem o preenchimento das lacunas relacionadas ao tema

Logo, é importante que sejam analisadas não só o estado da arte sobre os metais pesados nos solos brasileiros, mas também gerar dados que permitam ampliar o entendimento sobre a presença destes potenciais contaminantes nos solos, contribuindo para o auxílio de tomadas de decisões e preservação das áreas dos biomas brasileiros. O estudo visa, primeiramente, mostrar avanços e entraves em relação aos metais pesados nos biomas brasileiros, através de uma revisão bibliométrica. E, em uma segunda etapa, elencar os teores totais e ambientalmente disponíveis de metais pesados do fragmento florestal do bioma Mata Atlântica, monitorados pelo PPBio, em Pernambuco.

### **1.1 Hipóteses**

1. Na análise bibliométrica da produção científica sobre metais pesados em solos brasileiros, espera-se que o bioma Amazônia apresente o maior número de publicações, devido ao seu destaque como área de interesse global em questões ambientais, superando os demais biomas do país em representatividade científica.;
2. No fragmento florestal da Mata Atlântica monitorado pelo PPBio em Pernambuco, os teores de metais pesados, de fonte antropogênica, nos solos da Mata Atlântica, variam conforme os estágios sucessionais da floresta, com teores mais altos observados em áreas de estágios iniciais de sucessão, devido à maior exposição a fontes de poluição, e menores teores em estágios mais avançados de sucessão.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo Geral***

Analisar a produção científica sobre a presença dos metais pesados em solos de biomas brasileiros, identificando tendências de pesquisa, principais áreas de estudo e as lacunas de conhecimento relacionados ao tema, enquanto se determina os teores de metais pesados e sua disponibilidade no sítio do Programa de Pesquisa em Biodiversidade, em Recife, com o intuito de contribuir para o entendimento dos impactos ambientais e avanço das pesquisas sobre a contaminação por metais nos ecossistemas brasileiros.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

1. Verificar os biomas brasileiros que possuem as maiores contribuições e lacunas em relação às pesquisas sobre metais pesados em solos;
2. Determinar as concentrações dos metais pesados cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), chumbo (Pb), manganês (Mn), níquel (Ni) e zinco (Zn) nos solos do Parque Estadual Dois Irmãos, em duas profundidades (0-10 e 10-20 cm).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Metais Pesados, características gerais

Os metais pesados são definidos como elementos químicos caracterizados por possuírem densidade superior a  $5\text{g cm}^{-3}$  (BALALI-MOOD et al., 2021; HAWKES, 1997). Esses elementos ocorrem naturalmente no ambiente, estando presentes em minerais de rochas, adsorvidos em superfícies minerais ou orgânicas, imobilizados pelos microrganismos e plantas e na solução do solo (TANG et al., 2019; ZINN et al., 2020).

Dentro desse grupo de elementos, alguns são essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas e animais, sendo conhecidos como micronutrientes, enquanto outros não possuem funções metabólicas, ambos são considerados potencialmente tóxicos (ALLOWAY, 2012; CHRYSARGYRIS et al., 2022). No entanto, é importante destacar que a toxicidade desses elementos depende da concentração e do tempo de exposição a esses contaminantes, e do organismo-alvo (BALALI-MOOD et al., 2021).

Os efeitos tóxicos dos metais pesados em plantas variam entre as espécies, mas geralmente incluem interferência na absorção de nutrientes essenciais, como fósforo (P) e potássio (K), danos à estrutura dos cloroplastos, redução da taxa fotossintética e geração de espécies reativas de oxigênio, que podem danificar componentes celulares (CHRYSARGYRIS et al., 2022). Em seres humanos, a exposição a metais pesados pode causar danos às membranas celulares e ao DNA, além de afetar as funções de proteínas e enzimas, resultando em doenças neurológicas, problemas de fertilidade, doenças cardiovasculares e câncer (ENGWA et al., 2019; PAITHANKAR et al., 2021).

Os teores de metais pesados na crosta terrestre e nos solos variam significativamente. A disponibilidade desses elementos no solo é influenciada principalmente pelo pH. O aumento da atividade do íon  $\text{OH}^-$  leva à precipitação dos metais, reduzindo sua disponibilidade. Além disso, fatores como a presença de matéria orgânica, teores de argila e óxidos de ferro (Fe) e manganês (Mn) (ALLOWAY, 2012; DENG; WANG; LIU, 2023; RIZWAN; USMAN; ALSAFRAN, 2024; YANG et al., 2022; ZINN et al., 2020).

As principais fontes antrópicas de metais pesados incluem a queima de combustíveis fósseis, atividades industriais, mineração e o uso indiscriminado de fertilizantes (ALLOWAY, 2012). Essas práticas têm contribuído para o acúmulo de metais pesados no ambiente, conseqüentemente, aumentando o risco para a poluição dos ecossistemas e saúde humana.

## 2.2 Investigação de metais pesados nos solos mundiais

A contaminação por metais pesados é considerada. Esse cenário se agravou com o desenvolvimento dos países e o crescimento populacional, que intensificam a poluição decorrente das atividades antrópicas (TANG et al., 2019; YANG et al., 2022; ZINN et al., 2020). Os solos florestais, segundo Kang et al (2022), são de extrema importância, pois desempenham um papel crucial na ciclagem biogeoquímica de elementos químicos, os quais realizam funções metabólicas significativas, e no fluxo de energia. A qualidade desses solos impacta diretamente a segurança ecológica, os recursos hídricos e a produção de alimentos. Segundo Mazurek et al. (2017), diferentes metais pesados penetram áreas preservadas por serem transportados a longas distâncias na forma de gases e aerossóis ou por meio do movimento de corpos d'água contaminados.

Além disso, estudos realizados nos solos do Parque Nacional Roztocze, localizado na Polônia, apontam que os metais pesados provenientes da ação antrópica se concentram nos horizontes superficiais do solo (O e A), com redução de seus teores nos horizontes subsuperficiais. Esses achados corroboram os resultados de Yang et al. (2022), que identificaram, na China, teores de Cu, Zn, Pb e Cd mais elevados na superfície, independentemente da distância da fonte de emissão dos poluentes, neste caso, metais pesados derivados da queima de combustíveis fósseis. Neste trabalho, foi constatada a mobilidade dos metais para horizontes subsuperficiais em virtude dos elevados teores de matéria orgânica, que facilitou sua movimentação.

Ao analisar correlações entre o uso da terra e a concentração de metais pesados, Dai et al. (2019), verificaram, na China, que, dentre as seis áreas estudadas (área cultivada, florestal, arbustiva, herbácea, inundada e área urbana desenvolvida), a floresta apresentou os menores teores dos metais estudados (Cr, Cu, Cd, Pb e Zn), tanto na superfície (0 - 20 cm) quanto na subsuperfície (20 - 40 cm). Por outro lado, os maiores valores foram encontrados nas áreas cultivadas e nos centros urbanos, o que foi atribuído ao uso de aditivos agrícolas e à presença de indústrias nesses locais. Adicionalmente, os teores dos elementos estudados excederam os valores pré-estabelecidos para os solos da região, evidenciando a influência antrópica na contaminação do solo. Esses resultados estão em consonância com os achados de Wang et al. (2020), que identificaram diferenças significativas nos teores de contaminantes em diferentes usos da terra.

Globalmente, os efeitos dos metais pesados nos ecossistemas e na saúde humana já são amplamente reconhecidos e, atualmente, vêm sendo investigados com maior rigor. E seus impactos variam de acordo com o organismo afetado (OKEREAFOR et al., 2020). Uma das

formas de analisar a produção científica sobre esses contaminantes é por meio de análises bibliométricas. A bibliometria consiste em um conjunto de leis e princípios empíricos que contribuem para estabelecer os fundamentos teóricos da Ciência da Informação (FERNANDES et al., 2021; GUEDES; BORSCHIVER, 2005). Essa ferramenta permite analisar tendências na academia sobre determinadas questões, possibilitando a realização de ações e incentivos a temas e áreas de pesquisa que, de certa forma, têm sido negligenciados (GUEDES, 2012).

### **2.3 Investigação de Metais Pesados no Solos Brasileiros**

No Brasil, diversos estudos têm investigado os teores naturais de metais pesados no solo, estabelecendo valores de referência que servem como base para políticas públicas e investigações sobre contaminação e poluição nos biomas. Esses valores são essenciais para avaliar os impactos ambientais e orientar ações de preservação. A problemática dos metais pesados está presente em todos os biomas brasileiros, sendo agravada por atividades antrópicas, como desmatamento, agricultura e mineração (ELLWANGER; CHIES, 2023).

O bioma Amazônico, reconhecido mundialmente por sua biodiversidade e importância socioambiental, abrange mais de 6 milhões de km<sup>2</sup>, dos quais 60% estão no território brasileiro (PINTO, 2014). Os solos amazônicos apresentam grande diversidade geoquímica, influenciada por diferentes processos de formação e contextos geológicos (DO NASCIMENTO et al., 2018). No entanto, atividades como desmatamento, queimadas, agricultura e mineração têm elevado os teores de metais pesados no solo, destacando a necessidade de compreender os valores naturais desses elementos (MELLO et al., 2020).

Nascimento et al. (2018) investigaram os teores de referência de metais pesados em solos sedimentares aluviais do sudoeste da Amazônia brasileira, analisando Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb e Zn. Foram coletadas 128 amostras de solo (0-20 cm de profundidade) em áreas com mínima interferência antrópica. Os resultados indicaram concentrações na seguinte ordem: Fe > Ba > Mn > Cr > Zn > Pb > Cu > Ni > Sb > Cd, com valores considerados baixos em comparação a outras regiões do Brasil, devido à natureza dos sedimentos da Bacia do Rio Madeira. Esses dados corroboram estudos como os de Sahoo et al. (2020) e Santos e Alleoni (2013), que também identificaram variações nos teores de metais pesados em diferentes regiões da Amazônia.

A Mata Atlântica, originalmente distribuída por mais de 1,3 milhão de km<sup>2</sup> no leste do Brasil, sofreu intensa degradação desde o Período Colonial, com a expansão da agricultura e urbanização (PINTO, 2014; REZENDE et al., 2018). Atualmente, atividades como agricultura,

silvicultura e mineração são as principais fontes de impacto nesse bioma (FERREIRA et al., 2024; REZENDE et al., 2018).

O Cerrado, com aproximadamente 2 milhões de km<sup>2</sup>, é outro hotspot de biodiversidade no Brasil. No entanto, cerca de 54% de sua vegetação nativa foi desmatada, principalmente para agricultura e pastagens (CABALLERO et al., 2023; MARTINS et al., 2021). Estudos como o de Wilcke et al. (1999) evidenciaram que atividades industriais e a queima de combustíveis fósseis elevam as concentrações de metais pesados, como Mn, Zn, Cu e Pb, em solos urbanos do Cerrado. Além disso, Martins et al. (2021) destacaram a influência de rochas máficas na composição dos solos da Bacia do Parnaíba, que apresentam teores mais elevados de metais pesados (Cr, Mn, Ni) em comparação com outras regiões. Esses tipos de rochas são caracterizados por terem baixo teor de sílica e altas concentrações de minerais ricos em ferro e magnésio. Os solos derivados dessas rochas possuem elevados teores de Ni, Cr e Co baixos teores de macronutrientes (PESSOA-FILHO et al., 2015).

O bioma Pampas ocupa uma área de aproximadamente 170.000 km<sup>2</sup>, representando cerca de 2% do território do país. Possui formações arbustivas e arbóreas espalhadas e ocorrência de 10 das 13 classes de solos oficiais do Brasil (ANDRADE et al., 2023; ROESCH et al., 2009). O ambiente geológico do Pampas é diverso, o que resulta em diferentes teores de metais pesados em seu solo. Em um estudo realizado por Althaus et al. (2018), foi observado que os solos superficiais (0-20 cm) derivados de um basalto obtiveram maiores teores de Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn em comparação a solos derivados de rochas sedimentares.

O bioma Caatinga, localizado no Nordeste brasileiro, possui solos jovens devido ao baixo intemperismo químico (BARBOSA; FILHO, 2022; FRANCISCO; CHAVES; CHAVES, 2020). Estudos como os de Cardoso et al. (2023) e da Silva et al. (2022) identificaram teores naturais de metais pesados, como Mn, Cr, Zn e Cu, que variam conforme a litologia e os processos pedogenéticos da região Cardoso et al (2023) identificou teores (mg kg<sup>-1</sup>) de Mn (124,59)>Cr (54,51)>Zn (31,66)>Cu (7,89)>Ni (7,20)>Pb (5,98)>As (4,05)> Co (3,40)> Cd (0,10).

No Pantanal, estudos como o de Coringa et al. (2014) revelaram que os teores de metais pesados, como Mn, Cr, Zn e Ni, estão relacionados à presença de minerais argilosos do tipo 2:1, que retêm esses elementos no solo. A mineração e a agricultura são as principais fontes de contaminação nesse bioma.

As atividades humanas têm influenciado diretamente os teores de metais pesados nos solos brasileiros. Na Amazônia, por exemplo, o mercúrio (Hg) é um dos principais contaminantes, associado à mineração de ouro. Durante as décadas de 1970 e 1980, o uso

intensivo de Hg na extração de ouro resultou na contaminação de solos e rios, com impactos significativos para a saúde humana e o ecossistema (GOMES et al., 2020; GUIMARAES, 2020). Na Mata Atlântica, estudos como o de Nakazato et al. (2021) evidenciaram que a proximidade de áreas urbanas e industriais aumenta as concentrações de metais pesados no solo e na vegetação. Da mesma forma, Vasconcellos et al. (2021) observaram que solos de fragmentos florestais urbanos no Rio de Janeiro apresentam teores elevados de Ni, Cu, Zn e Pb, associados à queima de combustíveis fósseis e atividades industriais, mais próximos à fonte poluidora.

A agricultura é uma das principais fontes de contaminação por metais pesados no Brasil, devido ao uso de fertilizantes e defensivos agrícolas. Onde essa prática e consequente contaminação foi possível ser identificadas em todos os biomas (ELLWANGER; CHIES, 2023). No Pampas, o uso excessivo de fungicidas à base de cobre (Cu) tem causado fitotoxicidade em plantas nativas, afetando processos metabólicos e nutricionais (DE CONTI et al., 2018).

### Referências bibliográficas

ALLOWAY, BRIAN J. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

ALOVISI, ALESSANDRA MAYUMI TOKURA; CASSOL, CLEIDIMAR JOÃO; NASCIMENTO, JAQUELINE SILVA; SOARES, NATANAEL BORGES; DA SILVA JUNIOR, IZAIAS RODRIGUES; DA SILVA, ROBERVALDO SOARES; DA SILVA, JOÃO AUGUSTO MACHADO. Soil factors affecting phosphorus adsorption in soils of the Cerrado, Brazil. Geoderma Regional, [s. l.], vol. 22, p. e00298, 1 Sep. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00298>.

ALTHAUS, DAIANA; GIANELLO, CLESIO; TEDESCO, MARINO JOSÉ; SILVA, KELLY JUSTIN DA; BISSANI, CARLOS ALBERTO; FELISBERTO, REGINA. Natural Fertility and Metals Contents in Soils of Rio Grande do Sul (Brazil). Revista Brasileira de Ciência do Solo, [s. l.], vol. 42, p. e0160418, 1 Feb. 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160418>.

ANDRADE, BIANCA O.; DRÖSE, WILLIAM; AGUIAR, CASSIANA ALVES DE; AIRES, ELISA TEIXEIRA; ALVARES, DIEGO JANISCH; BARBIERI, ROSA LIA; CARVALHO, CLAUDIO JOSÉ BARROS DE; BARTZ, MARIE; BECKER, FERNANDO GERTUM; BENCKE, GLAYSON ARIEL; BENEDUZI, ANELISE; SILVA, JORGE BERNARDO; BLOCHTEIN, BETINA; BOLDRINI, ILSI IOB; BOLL, PITER KEHOMA; BORDIN, JUÇARA; SILVEIRA, ROSA MARA BORGES DA; MARTINS, MÁRCIO BORGES; BOSENBECKER, CAMILA; BRACCINI, JOÃO; BRAUN, BRUNA; BRITO, ROSÂNGELA; BROWN, GEORGE G.; BÜNEKER, HENRIQUE MALLMANN; BUZATTO, CRISTIANO ROBERTO; CAVALLERI, ADRIANO; CECHIN, SONIA ZANINI; COLOMBO, PATRICK; CONSTANTINO, REGINALDO; COSTA, CÍNTIA FERNANDA DA; DALZUCHIO, MARINA S.; OLIVEIRA, MARCELO GEHLEN DE; DIAS, RAFAEL ANTUNES; SANTOS, LUANA AMARAL DOS; DUARTE, ADRIANE DA FONSECA; DUARTE, JULIANO LESSA PINTO; DURIGON, JAQUELINE; DA SILVA, MAYARA ESCOBAR; FERREIRA, PRISCILA PORTO ALEGRE; FERREIRA, TALITA; FERRER, JULIANO; FERRO, VIVIANE G.; FONTANA, CARLA SUERTEGARAY; FREIRE, MARCELO DUARTE; FREITAS, THALES RENATO OCHOTORENA; GALIANO, DANIEL; GARCIA, MARINÊS; DOS SANTOS, TIAGO GOMES; GOMES, LUCAS ROBERTO PEREIRA; GONZATTI, FELIPE; GOTTSCHALK, MARCO SILVA; GRACIOLLI, GUSTAVO; GRANADA, CAMILLE E.; GRINGS, MARTIN; GUIMARÃES, PABLO SANTOS; HEYDRICH, INGRID; IOP, SAMANTA; JARENKOW, JOÃO ANDRÉ; JUNGBLUTH, PATRÍCIA; KÄFFER, MÁRCIA ISABEL; KAMINSKI, LUCAS AUGUSTO; KENNE, DIEGO COSTA; KIRST, FREDERICO DUTRA; KROLOW, TIAGO KÜTTER; KRÜGER, RODRIGO FERREIRA; KUBIAK, BRUNO BUSNELLO; LEAL-ZANCHET, ANA MARIA; LOEBMANN, DANIEL; LUCAS, DIÓBER BORGES; LUCAS, ELAINE MARIA; LUZA, ANDRÉ LUÍS; MACHADO, IBERE FARINA; MADALOZZO, BRUNO; MAESTRI, RENAN; MALABARBA, LUIZ R.; MANEYRO, RAÚL; MARINHO, MARCO ANTONIO TONUS; MARQUES, ROBERTA; MARTA, KIMBERLY DA SILVA; MARTINS, DIEGO DA SILVEIRA; MARTINS, GIOVANA DA SILVA; MARTINS, THIAGO RAMBO; MELLO, ANDERSON SANTOS DE; MELLO, RAMON LUCIANO; MENDONÇA JUNIOR, MILTON DE SOUZA. 12,500+ and counting: biodiversity of the Brazilian Pampa. *Frontiers of Biogeography*, [s. l.], vol. 15, no. 2, 2023. DOI 10.21425/F5FBG59288. Available at: <https://escholarship.org/uc/item/7tp2k884>. Accessed on: 13 Mar. 2025.

BALALI-MOOD, MAHDI; NASERI, KOBRA; TAHERGORABI, ZOYA; KHAZDAIR, MOHAMMAD REZA; SADEGHI, MAHMOOD. Toxic Mechanisms of Five Heavy Metals: Mercury, Lead, Chromium, Cadmium, and Arsenic. *Frontiers in Pharmacology*, [s. l.], vol. 12, p. 643972, 13 Apr. 2021. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>.

BARBOSA, TAÍSA ANDRADE; FILHO, RAIMUNDO RODRIGUES GOMES. Biodiversidade e conservação da Caatinga: revisão sistemática. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, [s. l.], vol. 7, no. 4, p. 177–189, 11 Nov. 2022. <https://doi.org/10.24221/jeap.7.4.2022.5228.177-189>.

BIONDI, CAROLINE MIRANDA; NASCIMENTO, CLÍSTENES WILLIAMS ARAÚJO DO; FABRICIO NETA, ADELAZIL DE BRITO; RIBEIRO, MATEUS ROSAS. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni E Co em solos de referência de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [s. l.], vol. 35, p. 1057–1066, Jun. 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300039>.

CABALLERO, CASSIA BROCCA; BIGGS, TRENT WADE; VERGOPOLAN, NOEMI; WEST, THALES A. P.; RUHOFF, ANDERSON. Transformation of Brazil's biomes: The dynamics and fate of agriculture and pasture expansion into native vegetation. *Science of The Total Environment*, [s. l.], vol. 896, p. 166323, 20 Oct. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166323>.

CASAGRANDE, GABRIELA CRISTINA RABELLO; DAMBROS, JULIANE; DE ANDRADE, EDNALDO ANTÔNIO; MARTELLO, FELIPE; SOBRAL-SOUZA, THADEU; MORENO, MARIA INÊS CRUZEIRO; BATTIROLA, LEANDRO DÊNIS; DE ANDRADE, RICARDO LOPES TORTORELA. Atmospheric mercury in forests: accumulation analysis in a gold mining area in the southern Amazon, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, [s. l.], vol. 195, no. 4, p. 477, 17 Mar. 2023. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11063-6>.

CHRYSARGYRIS, ANTONIOS; HÖFTE, MONICA; TZORTZAKIS, NIKOS; PETROPOULOS, SPYRIDON A.; DI GIOIA, FRANCESCO. Editorial: Micronutrients: The Borderline Between Their Beneficial Role and Toxicity in Plants. *Frontiers in Plant Science*, [s. l.], vol. 13, p. 840624, 11 Feb. 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.840624>.

CORINGA, ELAINE DE ARRUDA OLIVEIRA; COUTO, EDUARDO GUIMARÃES; TORRADO, PABLO VIDAL. Geoquímica de solos do pantanal norte, Mato Grosso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [s. l.], vol. 38, p. 1784–1793, Dec. 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000600013>.

COSTA, FLÁVIO SILVA; MACEDO, MARIA WANNA FIGUEIREDO SENA; ARAÚJO, ANA CAROLINA MOREIRA; RODRIGUES, CASSIMIRA ALBUQUERQUE; KURAMAE, EIKO EURYA; DE BARROS ALCANFOR, SILVIA KELI; PESSOA-FILHO, MARCO; BARRETO, CRISTINE CHAVES. Assessing nickel tolerance of bacteria isolated from serpentine soils. *Brazilian Journal of Microbiology*, [s. l.], vol. 50, no. 3, p. 705–713, 1 Jul. 2019. <https://doi.org/10.1007/s42770-019-00111-4>.

DAI, LIJUN; WANG, LINGQING; LIANG, TAO; ZHANG, YONGYONG; LI, JING; XIAO, JUN; DONG, LINLIN; ZHANG, HAIDONG. Geostatistical analyses and co-occurrence correlations of heavy metals distribution with various types of land use within a watershed in eastern QingHai-Tibet Plateau, China. *Science of The Total Environment*, [s. l.], vol. 653, p. 849–859, 25 Feb. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.386>.

DE CONTI, L.; MELO, G.W.; CERETTA, C.A.; TAROUCO, C.P.; MARQUES, A.C.R.; NICOLOSO, F.T.; TASSINARI, A.; TIECHER, T.L.; CESCO, S.; MIMMO, T.; BRUNETTO, G. Photosynthesis and growth of young grapevines intercropped with native grasses in soils contaminated with copper. *Acta Horticulturae*, [s. l.], no. 1217, p. 179–184, Oct. 2018. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1217.23>.

DENG, WENBO; WANG, FENGXIAN; LIU, WENJUAN. Identification of factors controlling heavy metals/metalloid distribution in agricultural soils using multi-source data. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, [s. l.], vol. 253, p. 114689, 15 Mar. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114689>.

DO NASCIMENTO, CLÍSTENES WILLIAMS ARAÚJO; LIMA, LUIZ HENRIQUE VIEIRA; DA SILVA, FRANKLONE LIMA; BIONDI, CAROLINE MIRANDA; CAMPOS, MILTON CÉSAR COSTA. Natural concentrations and reference values of heavy metals in sedimentary soils in the Brazilian Amazon. *Environmental Monitoring and Assessment*, [s. l.], vol. 190, no. 10, p. 606, 24 Sep. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6989-4>.

DOS SANTOS, SABRINA NOVAES; ALLEONI, LUÍS REYNALDO FERRACCIÚ. Reference values for heavy metals in soils of the Brazilian agricultural frontier in Southwestern Amazônia. *Environmental Monitoring and Assessment*, [s. l.], vol. 185, no. 7, p. 5737–5748, 1 Jul. 2013. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2980-7>.

ELLWANGER, JOEL HENRIQUE; CHIES, JOSÉ ARTUR BOGO. Brazil's heavy metal pollution harms humans and ecosystems. *Science in One Health*, [s. l.], vol. 2, p. 100019, 1 Jan. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.soh.2023.100019>.

ENGWA, GODWILL AZEH; FERDINAND, PASCHALINE UDOKA; NWALO, FRIDAY NWEKE; UNACHUKWU, MARIAN N.; ENGWA, GODWILL AZEH; FERDINAND, PASCHALINE UDOKA; NWALO, FRIDAY NWEKE; UNACHUKWU, MARIAN N. Mechanism and Health Effects of Heavy Metal Toxicity in Humans. *Poisoning in the Modern World - New Tricks for an Old Dog?* [S. l.]: IntechOpen, 2019. DOI 10.5772/intechopen.82511. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/64762>. Accessed on: 11 Mar. 2025.

FERNANDES, IARA OLIVEIRA; GOMES, LEONARDO FERNANDES; MONTEIRO, LUCAS CABRERA; DÓREA, JOSÉ GARROFE; BERNARDI, JOSÉ VICENTE ELIAS. A Scientometric Analysis of Research on World Mercury (Hg) in Soil (1991–2020). *Water, Air, & Soil Pollution*, [s. l.], vol. 232, no. 7, p. 254, 17 Jun. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05222-z>.

FERREIRA, PAULA FERNANDA ALVES; ROCHA, FERNANDO IGNE; HOWE, ADINA; BARBOSA, DANIELE RODRIGUES; DA CONCEIÇÃO JESUS, EDERSON; DO AMARAL SOBRINHO, NELSON MOURA BRASIL; DA SILVA COELHO, IRENE. Chemical attributes, bacterial community, and antibiotic resistance genes are affected by intensive use of soil in agro-ecosystems of the Atlantic Forest, Southeastern Brazil. *Environmental Geochemistry and Health*, [s. l.], vol. 46, no. 4, p. 123, 14 Mar. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01894-8>.

FRANCISCO, PAULO ROBERTO MEGNA; CHAVES, IÊDE DE BRITO; CHAVES, LÚCIA HELENA GARÓFALO. Bioma caatinga e degradação: modelo de mapeamento. [s. l.], 2020. Available at: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/27064>. Accessed on: 13 Mar. 2025.

GLOAGUEN, THOMAS VINCENT; PASSE, JOSÉ JOÃO. Importance of lithology in defining natural background concentrations of Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in sedimentary soils, northeastern Brazil. *Chemosphere*, [s. l.], vol. 186, p. 31–42, 1 Nov. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.134>.

GOMES, DIEGO FERREIRA; MOREIRA, RAQUEL APARECIDA; SANCHES, NATHALIE APARECIDA OLIVEIRA; DO VALE, CRISTIANO ANDREY; DAAM, MICHIEL ADRIAAN; GORNI, GUILHERME ROSSI; BASTOS, WANDERLEY RODRIGUES. Dynamics of (total and methyl) mercury in sediment, fish, and crocodiles in an Amazonian Lake and risk assessment of fish consumption to the local population. *Environmental Monitoring and Assessment*, [s. l.], vol. 192, no. 2, p. 101, 8 Jan. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8066-z>.

GUEDES, VÂNIA L S; BORSCHIVER, SUZANA. BIBLIOMETRIA: UMA FERRAMENTA ESTATÍSTICA PARA A GESTÃO DA INFORMAÇÃO E DO CONHECIMENTO, EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO, DE COMUNICAÇÃO E DE AVALIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA. Encontro nacional de ciência da informação, [s. l.], vol. 6, p. 18, 2005.

GUEDES, VANIA LISBOA DA SILVEIRA. A BIBLIOMETRIA E A GESTÃO DA INFORMAÇÃO E DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO: uma revisão da literatura. *PontodeAcesso*, [s. l.], vol. 6, no. 2, p. 74–109, 8 Nov. 2012.

GUIMARAES, JEAN R. D. Mercury in the Amazon: Problem or opportunity? A commentary on 30 years of research on the subject. *Elementa: Science of the Anthropocene*, [s. l.], vol. 8, no. 1, p. 032, 20 Nov. 2020. <https://doi.org/10.1525/elementa.032>.

HAWKES, STEPHEN J. What Is a “Heavy Metal”? *Journal of Chemical Education*, [s. l.], vol. 74, no. 11, p. 1374, 1 Nov. 1997. <https://doi.org/10.1021/ed074p1374>.

KANG, JIAN; DING, XIAOGANG; MA, HONGYAN; DAI, ZHIMING; LI, XIAOCHUAN; HUANG, JIANGUO. Characteristics and Risk of Forest Soil Heavy Metal Pollution in Western Guangdong Province, China. *Forests*, [s. l.], vol. 13, no. 6, p. 884, Jun. 2022. <https://doi.org/10.3390/f13060884>.

MARTINS, VANESSA; BARBOSA, RONNY SOBREIRA; COSTA JR, OZEAS S.; DA SILVA, YURI JACQUES AGRA BEZERRA; DA SILVA, YGOR JACQUES AGRA BEZERRA; DE SOUSA, JULIO CÉSAR GALDINO; NARDOTO, GABRIELA BIELEFELD. Potentially toxic elements and rare earth elements in sandy soils from the Brazilian Cerrado. *Environmental Monitoring and Assessment*, [s. l.], vol. 193, no. 12, p. 780, 8 Nov. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09583-0>.

MAZUREK, RYSZARD; KOWALSKA, JOANNA; GAŚSIOREK, MICHAŁ; ZADROŻNY, PAWEŁ; JÓZEFOWSKA, AGNIESZKA; ZALESKI, TOMASZ; KĘPKA, WOJCIECH; TYMCZUK, MARYLA; ORŁOWSKA, KALINA. Assessment of heavy metals contamination in surface layers of Roztocze National Park forest soils (SE Poland) by indices of pollution. *Chemosphere*, [s. l.], vol. 168, p. 839–850, 1 Feb. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.126>.

MELLO, FERNANDO MACHADO DE; TEODORO, MARIA EDUARDA L. R.; MESQUITA, GUSTAVO N. C.; PINHEIRO, HELENA SARAIVA KOENOW; BILAL, ESSAID. Heavy metals backgrounds and guiding values in southwestern amazonian soils – A comparative study. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, [s. l.], vol. 15, no. 1, p. 71 à 86, 2020. <https://doi.org/10.26471/cjees/2020/015/110>.

MENDES, PEDRO PUTTINI; OLIVEIRA, MICHEL ANGELO CONSTANTINO DE. Pantanal: bioma constitucional. *Revista Direito Ambiental e Sociedade*, [s. l.], vol. 9, no. 2, 28 Oct. 2019. Available at: <https://sou.ucs.br/etc/revistas/index.php/direitoambiental/article/view/7885>. Accessed on: 22 Apr. 2025.

MUCINA, LADISLAV. Biome: evolution of a crucial ecological and biogeographical concept. *New Phytologist*, [s. l.], vol. 222, no. 1, p. 97–114, 2019. <https://doi.org/10.1111/nph.15609>.

NAKAZATO, RICARDO KEIICHI; LOURENÇO, ISABELA S.; ESPOSITO, MARISIA P.; LIMA, MARCOS E. L.; FERREIRA, MAURICIO L.; CAMPOS, RAFAELA DE O. A.; RINALDI, MIRIAN C. S.; DOMINGOS, MARISA. Trace metals at the tree-litter-soil-interface in Brazilian Atlantic Forest plots surrounded by sources of air pollution. *Environmental Pollution*, [s. l.], vol. 268, p. 115797, 1 Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115797>.

OKEREAFOR, UCHENNA; MAKHATHA, MAMOOKHO; MEKUTO, LUKHANYO; UCHE-OKEREAFOR, NKEMDINMA; SEBOLA, TENDANI; MAVUMENGWANA, VUYO. Toxic Metal Implications on Agricultural Soils, Plants, Animals, Aquatic life and Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, [s. l.], vol. 17, no. 7, p. 2204, Jan. 2020. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072204>.

PAITHANKAR, JAGDISH GOPAL; SAINI, SANJAY; DWIVEDI, SHIWANGI; SHARMA, ANURAG; CHOWDHURI, DEBAPRATIM KAR. Heavy metal associated health hazards: An interplay of oxidative stress and signal transduction. *Chemosphere*, [s. l.], vol. 262, p. 128350, 1 Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128350>.

PESSOA-FILHO, MARCO; BARRETO, CRISTINE CHAVES; DOS REIS JUNIOR, FÁBIO BUENO; FRAGOSO, RODRIGO ROCHA; COSTA, FLÁVIO SILVA; DE CARVALHO MENDES, IEDA; DE ANDRADE, LEIDE ROVÊNIA MIRANDA. Microbiological functioning, diversity, and structure of bacterial communities in ultramafic soils from a tropical savanna. *Antonie van Leeuwenhoek*, [s. l.], vol. 107, no. 4, p. 935–949, 1 Apr. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10482-015-0386-6>.

PINTO, LUIZ. Status e os novos desafios das unidades de conservação na Amazônia e Mata Atlântica. [S. l.: s. n.], 2014.

REZENDE, C.L.; SCARANO, F.R.; ASSAD, E.D.; JOLY, C.A.; METZGER, J.P.; STRASSBURG, B.B.N.; TABARELLI, M.; FONSECA, G.A.; MITTERMEIER, R.A. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. *Perspectives in Ecology and Conservation*, [s. l.], vol. 16, no. 4, p. 208–214, Oct. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.10.002>.

RIZWAN, MUHAMMAD; USMAN, KAMAL; ALSAFRAN, MOHAMMED. Ecological impacts and potential hazards of nickel on soil microbes, plants, and human health. *Chemosphere*, [s. l.], vol. 357, p. 142028, 1 Jun. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142028>.

ROESCH, LUIZ FERNANDO WURDIG; VIEIRA, FREDERICO COSTA BEBER; PEREIRA, VILMAR ALVES; SCHÜNEMANN, ADRIANO LUIS; TEIXEIRA, ITALO FILIPPI; SENNA, ANA JULIA TEIXEIRA; STEFENON, VALDIR MARCOS. The Brazilian Pampa: A Fragile Biome. *Diversity*, [s. l.], vol. 1, no. 2, p. 182–198, Dec. 2009. <https://doi.org/10.3390/d1020182>.

SAHOO, PRAFULLA KUMAR; DALL'AGNOL, ROBERTO; SALOMÃO, GABRIEL NEGREIROS; DA SILVA FERREIRA JUNIOR, JAIR; DA SILVA, MARCIO SOUZA; MARTINS, GABRIEL CAIXETA; E SOUZA FILHO, PEDRO WALFIR MARTIN; POWELL, MIKE A.; MAURITY, CLOVIS WAGNER; ANGELICA, RÔMULO SIMÕES; DA COSTA, MARLENE FURTADO; SIQUEIRA, JOSÉ OSWALDO. Source and background threshold values of potentially toxic elements in soils by multivariate statistics and GIS-based mapping: a high density sampling survey in the Parauapebas basin, Brazilian Amazon. *Environmental Geochemistry and Health*, [s. l.], vol. 42, no. 1, p. 255–282, 1 Jan. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00345-z>.

SANTOS, TAUANA ISABEL SOARES; SILVA, LILIANE; MOMBAQUE, CAROLINE; TREVISAN, ADRIANA CARLA DIAS. Reflexões sobre o uso sustentável do Bioma Pampa: desafios, valores e possibilidades de uso sustentável. *Cadernos de Agroecologia*, [s. l.], vol. 19, no. 1, 26 Nov. 2024. Available at: <https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/8508>. Accessed on: 22 Apr. 2025.

TANG, JIAYI; ZHANG, JIACHAO; REN, LIHENG; ZHOU, YAOYU; GAO, JUN; LUO, LIN; YANG, YUAN; PENG, QINGHUI; HUANG, HONGLI; CHEN, ANWEI. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution. *Journal of Environmental Management*, [s. l.], vol. 242, p. 121–130, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.061>.

VASCONCELLOS, THAÍS JORGE DE; MOREIRA, NATTACHA DOS SANTOS; SANTOS, RAMON SILVA DOS; ANJOS, MARCELINO JOSÉ DOS; CALLADO, CÁTIA HENRIQUES. CHEMICAL ELEMENTS ANALYSIS OF THE SOIL AT AN URBANIZATION GRADIENT IN THE ATLANTIC FOREST. *Revista Árvore*, [s. l.], vol. 45, p. e4504, 19 Apr. 2021. <https://doi.org/10.1590/1806-908820210000004>.

WANG, ZHAN; XIAO, JUN; WANG, LINGQING; LIANG, TAO; GUO, QINGJUN; GUAN, YUNLAN; RINKLEBE, JÖRG. Elucidating the differentiation of soil heavy metals under different land uses with geographically weighted regression and self-organizing map. *Environmental Pollution*, [s. l.], vol. 260, p. 114065, 1 May 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114065>.

WILCKE, WOLFGANG; LILIENFEIN, JULIANE; DO CARMO LIMA, SAMUEL; ZECH, WOLFGANG. Contamination of highly weathered urban soils in Uberlândia, Brazil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, [s. l.], vol. 162, no. 5, p. 539–548, 1999. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-2624\(199910\)162:5<539::AID-JPLN539>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-2624(199910)162:5<539::AID-JPLN539>3.0.CO;2-O).

YANG, QINGCHUN; ZHANG, LIANGMIAO; WANG, HUALIN; MARTÍN, JORDI DELGADO. Bioavailability and health risk of toxic heavy metals (As, Hg, Pb and Cd) in urban soils: A Monte Carlo simulation approach. *Environmental Research*, [s. l.], vol. 214, p. 113772, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113772>.

ZINN, YURI LOPES; FARIA, JÉSSICA AMARAL DE; ARAUJO, MARLA ALESSANDRA DE; SKORUPA, ALBA LUCIA ARAUJO. Soil parent material is the main control on heavy metal concentrations in tropical highlands of Brazil. *CATENA*, [s. l.], vol. 185, p. 104319, Feb. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104319>.

### 3 METAIS PESADOS EM BIOMAS BRASILEIROS: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

#### Resumo

O solo faz parte de todas as ciclagens de nutrientes sendo um recurso natural de extrema importância e um berço para a vida na terra. O Brasil é um país detentor de uma vasta diversidade, possuindo seis biomas terrestres e uma vasta costa marinha, contudo enfrenta diversos entraves sobre o ambiente natural e seu uso sustentável. A contaminação do solo por metais pesados é uma problemática que tange a qualidade ambiental dos ecossistemas e os serviços ecossistêmicos por eles desempenhados. A sua acumulação pode causar degradação no solo, acarretando problemas para as plantas e microbiota, na saúde de animais e seres humanos pelo potencial de acumulação entre organismos. Os metais pesados possuem uma grande variedade de fontes, desde naturais a *inputs* antrópicos. O estudo em questão, baseado em pesquisa bibliométrica, teve como objetivo observar o histórico e perspectivas nas pesquisas referentes a presença de metais pesados nos solos dos diferentes biomas brasileiros: Amazônia, Mata Atlântica, Caatinga, Pampas, Cerrado e Pantanal. Foram consideradas publicações presentes nos bancos de dados de indexação *Crossref* e *Google Scholar*, realizadas no período de janeiro de 1950 a abril de 2024, para a síntese científica. Ademais, foi executada uma estratégia de pesquisa com a cadeia de consulta incluindo a ocorrência de termos relacionados no título, resumo, palavras-chave, ou texto completo, com o intuito de obtenção da lista de trabalhos publicados, os metais listados foram: cádmio (Cd), arsênio (As), chumbo (Pb), cromo (Cr), cobre (Cu), mercúrio (Hg), níquel (Ni), manganês (Mn) e zinco (Zn). Como resultado, foram obtidos 2028 artigos, sendo destes 410 selecionados por se tratar exclusivamente de trabalhos ocorridos no Brasil. O bioma amazônico foi mais estudado em relação aos teores de metais pesados com 170 aparições, seguidos pela Mata Atlântica com 109, associados pela contaminação proveniente de atividades antrópicas como a mineração e urbanização. Os metais mais estudados foram Zn, Cu e Mn com 238, 225 e 196 menções, respectivamente, relacionados não só a sua utilização como micronutrientes para culturas, mas também seu efeito adverso no ambiente. Com esse estudo verificou-se a evolução e lacunas, principalmente relacionados ao quantitativo de estudos sobre Cd e As nos biomas brasileiros em relação a contaminação por esses metais. Bem como a escassez de pesquisas relacionadas à presença destes metais pesados nos biomas Caatinga, Pantanal e Pampa.

Palavras-chave: Contaminação. Poluição. Ambiente. Solos

## HEAVY METALS IN BRAZILIAN BIOMES: A BIBLIOMETRIC REVIEW

### Abstract

The soil is part of all nutrient cycles, being a natural resource of extreme importance and a cradle for life on Earth. Brazil is a country with vast diversity, possessing six terrestrial biomes and an extensive marine coast, yet it faces several challenges regarding the natural environment and its sustainable use. Soil contamination by heavy metals is an issue that affects the environmental quality of ecosystems and the ecosystem services they provide. Their accumulation can cause soil degradation, leading to problems for plants and microbiota, as well as for the health of animals and humans due to their potential for bioaccumulation among organisms. Heavy metals have a wide variety of sources, ranging from natural to anthropogenic inputs. The present study, based on bibliometric research, aimed to examine the history and perspectives of research related to the presence of heavy metals in the soils of different Brazilian biomes: Amazon, Atlantic Forest, Caatinga, Pampas, Cerrado, and Pantanal. Publications indexed in the Crossref and Google Scholar databases, published between January 1950 and April 2024, were considered for scientific synthesis. Additionally, a search strategy was implemented using a query chain that included the occurrence of related terms in the title, abstract, keywords, or full text, with the goal of obtaining a list of published works. The listed metals were: cadmium (Cd), arsenic (As), lead (Pb), chromium (Cr), copper (Cu), mercury (Hg), nickel (Ni), manganese (Mn), and zinc (Zn). As a result, 2028 articles were obtained, of which 410 were selected for being exclusively related to studies conducted in Brazil. The Amazon biome was the most studied in terms of heavy metal content, with 170 occurrences, followed by the Atlantic Forest with 109, associated with contamination from anthropogenic activities such as mining and urbanization. The most studied metals were Zn, Cu, and Mn, with 238, 225, and 196 mentions, respectively, related not only to their use as micronutrients for crops but also to their adverse effects on the environment. This study revealed the evolution and gaps, particularly regarding the quantity of studies on Cd and As in Brazilian biomes in relation to contamination by these metals, as well as the scarcity of research on the presence of these heavy metals in the Caatinga, Pantanal, and Pampa biomes.

**Keywords:** Contamination. Pollution. Environment. Soils.

### 3.1 Introdução

Os solos são essenciais para que aconteça a vida no planeta, pois neles habitam diversos conjuntos de organismos, desde bactérias até invertebrados, e fornecem diferentes serviços ecossistêmicos que são essenciais para o bem-estar da biosfera como um todo. Os serviços ecossistêmicos podem ser definidos, segundo Días et al. (2018), como benefícios tangíveis ou intangíveis obtidos pelo homem por meio das interações dinâmicas entre o funcionamento dos ecossistemas. Além de fornecer base para estruturas urbanas, o solo também pode oferecer a regulação de nutrientes essenciais, a filtragem de água e a manutenção da qualidade do ambiente, além de fornecer matérias-primas para medicamentos (MUÑOZ; FREITAS, 2017; VEZZANI, 2015). Entretanto, os solos são altamente vulneráveis à ação antrópica, como no uso da terra, erosão e poluição (GUERRA et al., 2022).

A crescente necessidade de atender às demandas da humanidade tem levado à modificação do ambiente, tornando maior a degradação nos ecossistemas naturais. Assim, com o esgotamento gradual dos recursos, por causa dos metais pesados introduzidos nos ambientes, surge a necessidade de monitoramento ambiental (CÔTÉ; DARLING; BROWN, 2016).

Os metais pesados são um grupo de elementos provenientes da crosta terrestre, com densidade acima de 5 g/cm<sup>3</sup>, que são considerados poluentes ambientais, dependendo de sua concentração no solo (ALLOWAY, 2012). Neste grupo, podemos encontrar elementos que são fundamentais em pequenas doses para o funcionamento enzimático dos organismos (ALLOWAY, 2012; ZINN et al., 2020). Esses elementos têm ganhado maior atenção nas últimas décadas por suas características químicas, sendo persistentes no ecossistema, bioacumuláveis e tóxicos para diversos organismos (LIN et al., 2019; YANG et al., 2022). Atividades de mineração, industriais e agrícolas geram resíduos, e a emissão acentuada desses contaminantes pode deteriorar a qualidade de todo o ecossistema (LEMESSA et al., 2022)

O Brasil, com sua extensão territorial continental, possui seis biomas terrestres, com diferentes fitofisionomias e um grande número de espécies endêmicas, sendo uma referência global em biodiversidade. Entretanto, com o aumento populacional, ocorre a supressão desses biomas e o aumento das ações antrópicas no entorno e, conseqüentemente, a contaminação desses ecossistemas, o que pode ser evidenciado em trabalhos relacionados à fauna e à flora. Contudo, o efeito dos metais pesados nos solos brasileiros é pouco conhecido (DRUMMOND et al., 2022; LANA-COSTA et al., 2021).

Para a avaliação dos progressos e desafios da ciência em temas específicos, os estudos bibliométricos possibilitam a análise das relações entre desenvolvimento econômico e social.

Com os avanços tecnológicos, a bibliometria tornou-se mais acessível e interdisciplinar, permitindo estudos mais complexos (GUEDES; BORSCHIVER, 2005).

Portanto, neste contexto, considerando que os periódicos são um dos canais de comunicação mais utilizados na academia para o compartilhamento dos resultados de pesquisas e sua abrangência, este estudo teve o intuito levantar informações e sistematizar como a comunidade científica tem abordado a problemática da contaminação por metais pesados nos seis biomas brasileiros: Amazônia, Mata Atlântica, Caatinga, Cerrado, Pantanal e Pampas. Por meio de uma análise bibliométrica, buscamos mapear a produção científica sobre o tema, identificar tendências de pesquisa e verificar a distribuição e o impacto das publicações ao longo do tempo.

### 3.2 Material e Métodos

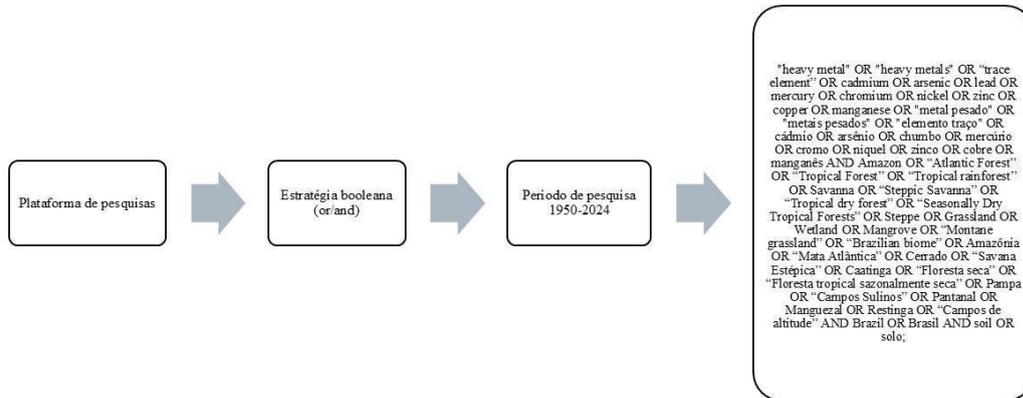
Para a síntese científica foram selecionados os bancos de dados de indexação Crossref, Google Scholar, Scielo, Web of Science e Elsevier, devido às suas abrangências e relevâncias na área de pesquisa. A estratégia de pesquisa envolveu a elaboração de uma consulta incluindo, no mínimo, dois termos relevantes, ocorrendo no texto completo dos artigos. Essa abordagem foi fundamentada na lógica booleana, com o objetivo de assegurar uma coleta abrangente e sistemática dos trabalhos publicados (FONSÊCA et al., 2024).

Como resultado foi definido um conjunto de palavras-chave, com termos em português e inglês, conforme a seguinte estratégia de busca:

"heavy metal" OR "heavy metals" OR "trace element" OR cadmium OR arsenic OR lead OR mercury OR chromium OR nickel OR zinc OR copper OR manganese OR "metal pesado" OR "metais pesados" OR "elemento traço" OR cádmio OR arsênio OR chumbo OR mercúrio OR cromo OR níquel OR zinco OR cobre OR manganês AND Amazon OR "Atlantic Forest" OR "Tropical Forest" OR "Tropical rainforest" OR Savanna OR "Steppic Savanna" OR "Tropical dry forest" OR "Seasonally Dry Tropical Forests" OR Steppe OR Grassland OR Wetland OR Mangrove OR "Montane grassland" OR "Brazilian biome" OR Amazônia OR "Mata Atlântica" OR Cerrado OR "Savana Estépica" OR Caatinga OR "Floresta seca" OR "Floresta tropical sazonalmente seca" OR Pampa OR "Campos Sulinos" OR Pantanal OR Manguezal OR Restinga OR "Campos de altitude" AND Brazil OR Brasil AND soil OR solo.

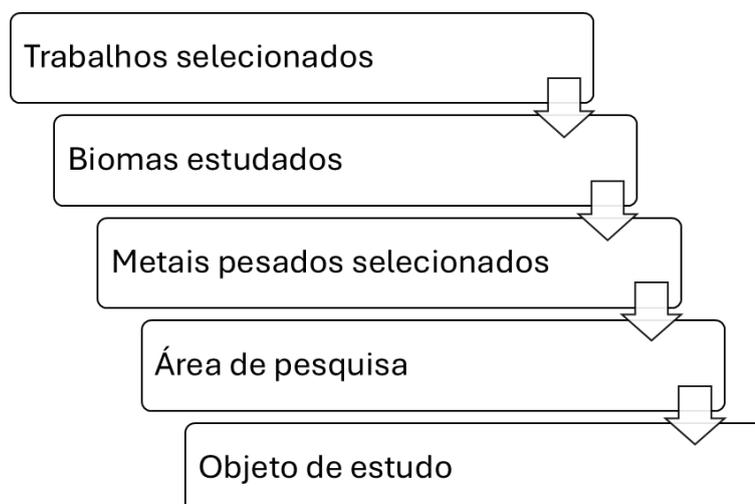
O período de publicação utilizado nessa pesquisa foi de 01/01/1950 a 04/2024. Após a aquisição da lista de trabalhos publicados foi realizada a exclusão de publicações repetidas com o intuito de obter as informações totais na base de dados da pesquisa (**Figura 1**).

**Figura 1** – Esquema ilustrativo da estratégia de busca adotada no trabalho



Os trabalhos selecionados foram analisados individualmente para verificar as seguintes informações: quais os metais pesados foram estudados; informações de latitude e longitude; se os estudos abordam os metais como contaminantes ou micronutrientes; qual/quais o(s) bioma(s) contemplados na pesquisa, inclusive, se um ou mais biomas foram trabalhados em um único artigo (**Figura 2**).

**Figura 2** – Esquema de informações retiradas dos materiais selecionados



Os dados foram selecionados com auxílio do *software* Microsoft Excel. A posteriori, foi realizada uma análise descritiva para descrever o número de trabalhos em cada bioma. Além disso foi elaborado uma análise de regressão exponencial também por meio do Microsoft Excel, sendo este último utilizado também para a produção de todas as representações gráficas. Para a realização do mapa dos trabalhos publicados foi utilizado o *software* QGIS 3.40.

### 3.3 Resultados e Discussão

Foram obtidos 2028 artigos, sendo 154 deles provenientes da literatura cinza. O quantitativo dessa literatura está relacionado a trabalhos produzidos em formatos eletrônicos e impressos não controlados pela publicação comercial. Um total de 410 trabalhos foram selecionados para o estudo em questão, levando-se em consideração apenas aqueles que ocorreram no Brasil e que possuíam dados quantitativos dos teores de metais pesados em solos.

As primeiras pesquisas sobre metais pesados em solos dos biomas brasileiros foram publicadas em 1979, com o estudo intitulado: “*The chemistry of some brazilian soil: element Mobility during intense weathering*”, realizado por Kronberg et al. (1979). Os autores destacam a importância do intemperismo químico no ciclo geoquímico, ressaltando que esse processo resulta na formação de minerais argilosos, os quais influenciam as características do solo. O estudo se estende a alguns solos dos biomas Amazônico, Mata Atlântica e Cerrado. Os autores observaram que as relações entre a intensidade de intemperismo e os 56 elementos estudados, dentre os quais nove metais pesados (As, Sb, Pb, Cu, Zn, Ni, Co, Cr e Ag), são fundamentais para compreender as características dos solos brasileiros. Nesse estudo, identificaram-se os principais fatores que interferem na mobilidade dos elementos nos solos: mineralogia, grau de intemperismo, características dos elementos, condições ambientais e processos biológicos.

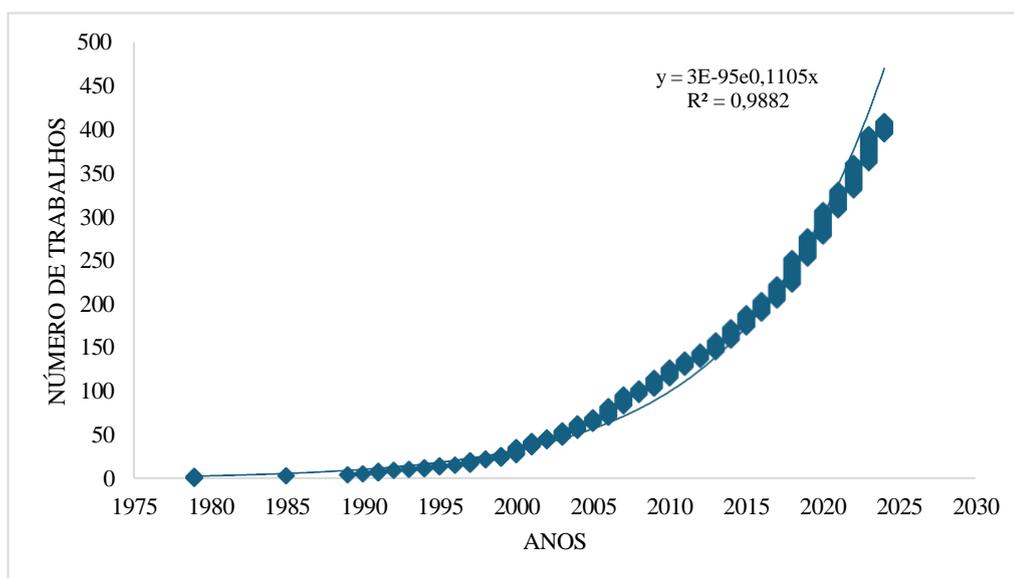
O segundo trabalho publicado no período, intitulado “*Accumulation of nutrients by Eucalyptus seedlings from acid and calcareous soils of the cerrado region of Central Brazil*” (HARIDASAN, 1985), apresenta dados de metais pesados classificados como micronutrientes para plantas, como Fe, Mn, Zn e Cu, e suas relações com o desenvolvimento do eucalipto. O trabalho relacionou o uso de micronutrientes ao crescimento ótimo das culturas em diferentes solos. O autor utilizou o solo como objeto de estudo secundário, dando maior importância às respostas encontradas no desenvolvimento das espécies de eucalipto e ao potencial de uso da espécie em programas de reflorestamento da região, uma prática vinculada ao desmatamento para ampliação das áreas agrícolas.

Em 1989, foi publicado o artigo de Pfeiffer et al. intitulado “*Mercury concentrations in inland waters of gold-mining areas in Rondônia, Brazil*”, que abordou o mercúrio (Hg) como um poluente de elevada toxicidade, mesmo em baixas concentrações. O estudo foi realizado em uma área de mineração, registrando teores de Hg na água, solos e peixes da região, com valores entre 80 e 1600  $\mu\text{g kg}^{-1}$  de Hg nos solos analisados.

Este estudo marcou uma mudança na perspectiva sobre os metais pesados nas pesquisas realizadas no país: se até então as pesquisas se ocupavam apenas daqueles que também são

micronutrientes, iniciaram-se as pesquisas voltadas para os estritamente contaminantes ambientais. Esse estudo pode ser visto como um reflexo da crescente conscientização ambiental, que no mesmo período resultou na criação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) na Lei nº 6.938, de agosto de 1981. Os estudos sobre os metais pesados nos solos dos biomas brasileiros, embora inicialmente incipientes, cresceram significativamente ao longo das décadas. Inicialmente, as pesquisas estavam focadas principalmente nos elementos presentes no solo como nutrientes para as plantas. No entanto, com o tempo, houve uma mudança no foco dessas investigações, que passaram a incluir também a análise de metais pesados e seu impacto ambiental, refletindo uma crescente preocupação com os efeitos adversos desses elementos no ambiente (Figura 3).

**Figura 3** – Regressão de contagem por ano dos estudos verificados



Ao analisar os trabalhos selecionados, observou-se um aumento na quantidade de estudos sobre esses elementos, especialmente entre 2010 e 2020, período em que o número de publicações quase dobrou (Tabela 1). Esse crescimento pode ser atribuído ao aumento do conhecimento mundial sobre os efeitos tóxicos dos metais pesados na saúde dos ecossistemas e na vida humana.

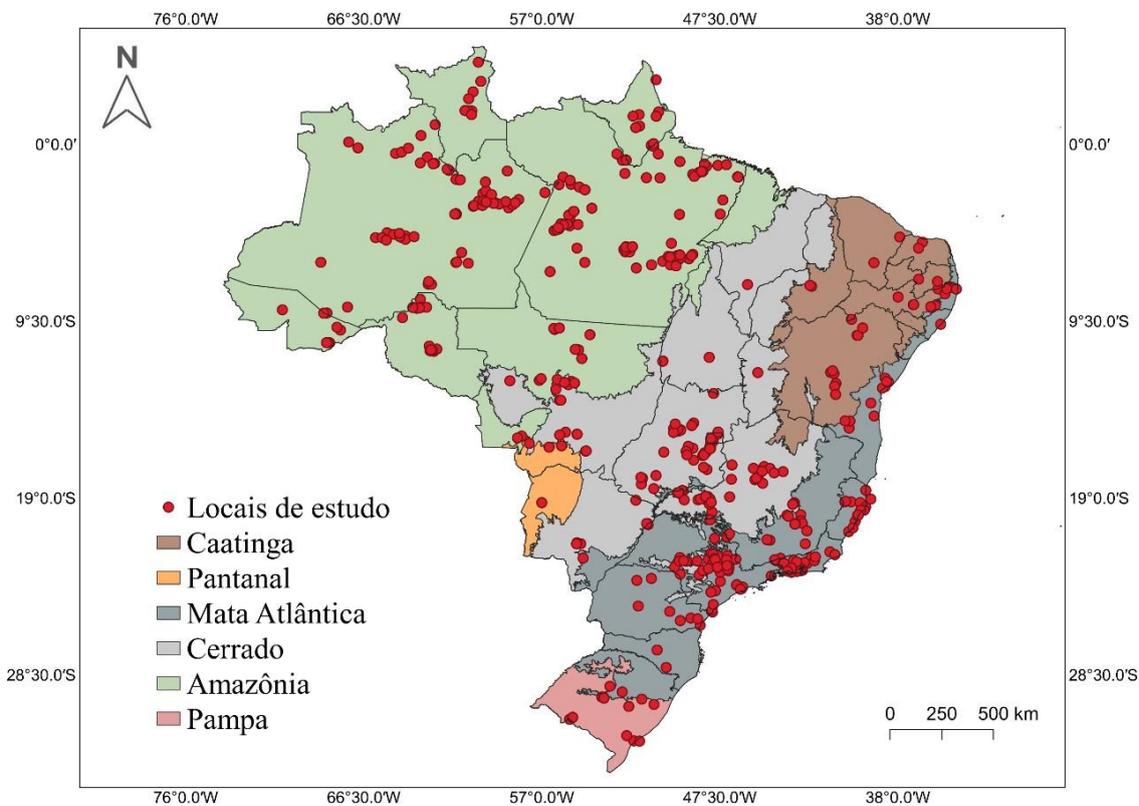
Esse crescimento também reflete a implementação de políticas e a criação de instituições voltadas para a preservação dos recursos naturais do país, impulsionadas pelas Conferências das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, como a Rio+20.

**Tabela 1** - Número de trabalhos sobre metais pesados em solo dos biomas brasileiros, no período entre 1979-2024

	Amazônia	Mata Atlântica	Cerrado	Pampas	Caatinga	Pantanal
<b>1979-1990</b>	3	2	2	0	0	0
<b>1991-2000</b>	20	3	5	0	0	2
<b>2001-2010</b>	42	23	21	1	3	1
<b>2011-2020</b>	69	48	39	12	7	5
<b>2021-2024</b>	36	34	16	9	3	4
<b>Total</b>	410					

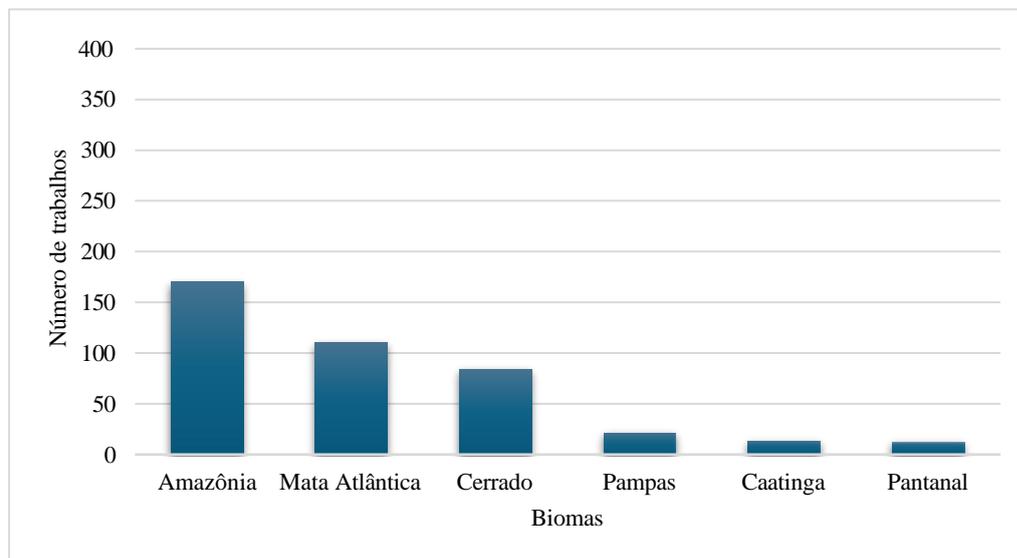
Ao observar a distribuição dos trabalhos no Brasil (Figura 4), foi possível identificar que, em relação ao bioma Amazônico, os trabalhos se distribuem principalmente em duas unidades federativas, Pará e Amazonas, possivelmente por terem as maiores áreas naturais desse bioma. Em relação à Mata Atlântica, os estados de São Paulo e Rio de Janeiro têm maior destaque em pesquisas. Nos estados de Goiás e Minas Gerais estão concentrados os dados sobre metais pesados em solos do Cerrado, atrelados principalmente à fronteira agrícola do país. Na Caatinga, houve uma distribuição semelhante do quantitativo de trabalhos nos estados onde o bioma está presente. Já no Mato Grosso do Sul concentram-se os trabalhos, no tema, referentes ao Pantanal.

**Figura 4** – Distribuição geográfica dos locais de estudos com dados de metais pesados nos solos de diferentes biomas brasileiros



O bioma amazônico foi o mais estudado, seguido pela Mata Atlântica, Cerrado, Pampa, Caatinga e, por último, o Pantanal, com 170, 110, 83, 21, 14 e 12 estudos, respectivamente (Figura 5).

**Figura 5** – Distribuição da quantidade de estudos científicos com dados de metais pesados em solo, por bioma no Brasil.



O maior número de estudos sobre os biomas Amazônia e Mata Atlântica, totalizando 282 trabalhos, pode ser explicado pelo fato de que, juntos, eles formam complexos florestais que representam mais de 65% do território brasileiro e abrigam aproximadamente 70% da população do Brasil (PINTO, 2014). Apesar das diferentes formas de uso da terra e das ocupações históricas, esses biomas compartilham semelhanças nas problemáticas e nos desafios para a implementação de redes de proteção (PINTO, 2014).

A floresta amazônica estende-se por mais de 6 milhões de km<sup>2</sup>, distribuídos em nove países da América do Sul, sendo que cerca de 60% dessa área está no território brasileiro (PINTO, 2014). Além de estudos que focam nos teores naturais dos metais pesados encontrados no bioma, como os trabalhos realizados por Nascimento et al. (2018) e Mello et al. (2020), percebe-se estudos voltados principalmente para a contaminação por Hg.

Segundo Guimarães (2020), no início dos anos de 1980, ocorreu um aumento na extração do ouro, causado pelo incremento significativo do preço desse metal em todo o mundo. O mercúrio é frequentemente utilizado no processo de extração do ouro de maneira artesanal, para a separação desse minério dos sedimentos dos rios. Posteriormente o amálgama Hg-Au é aquecido, e o Hg evaporado, o que acarreta a liberação desse poluente tanto na atmosfera quanto em corpos hídricos e no solo. Quando liberado no ambiente, o Hg pode viajar por grandes distâncias antes de ser transformado em formas mais tóxicas, como o metilmercúrio (MeHg), o qual pode se acumular na cadeia alimentar, afetando peixes e outros organismos aquáticos, que, por sua vez, impactam as comunidades que dependem desse recurso para sua alimentação

(GUIMARÃES, 2020). Ao avaliar a dinâmica do Hg em peixes e o risco à saúde humana da população ribeirinha do Rio Madeira na Amazônia, Gomes et al. (2020) perceberam que os teores totais de mercúrio (THg) nas espécies estudadas (*Mylossoma aureum* e *Cichla monoculus*) estavam abaixo das normas nacionais e internacionais para o consumo de peixe. Entretanto, o metilmercúrio representou entre 84% e 94% do teor total de mercúrio.

O bioma Mata Atlântica é marcado principalmente pela história da colonização do país e pelo crescimento das mais importantes capitais do Brasil, o que ocasionou a degradação de suas florestas, onde atualmente restam cerca de 26% de seus remanescentes florestais (REZENDE et al., 2018). Por ser considerado um *hotspot* de biodiversidade, o bioma é um dos mais estudados, pois, como seus fragmentos estão geralmente próximos de grandes centros urbanos, tende a ocorrer uma maior deposição e contaminação por metais pesados (REZENDE et al., 2018; VASCONCELLOS et al., 2021). Ao investigar a interação dos metais pesados na interface solo-serrapilheira-árvore, Nakazato et al. (2021) constataram que as plantas amostradas de todos os sítios florestais acumularam vestígios de metais pesados (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn), tanto advindos da deposição de partículas suspensas quanto da absorção do solo. O estudo foi desenvolvido em quatro parcelas de Mata Atlântica, localizadas no sudeste do país, sendo elas: Parque Estadual de Itacolomi, Parque Estadual das Fontes do Ipiranga, Parque Natural Municipal Nascentes de Paranapiacaba e a Mata de Santa Genebra. Corroborando Vasconcellos et al. (2021), ao comparar dois fragmentos de remanescentes florestais com uma área de parque urbano no Rio de Janeiro, perceberam que a área urbana recebeu maiores teores de Ni, Pb, Zn e Mn, atrelados à queima de combustíveis fósseis.

O bioma Cerrado foi o terceiro mais estudado. Solos ultramáficos são caracterizados por altos valores de Ni, Co, Cr e baixos valores de macronutrientes, como N, P, K e Ca (PESSOA-FILHO et al., 2015). Esses solos são considerados um grupo especial de solos os quais se originam de rochas ricas em Fe e Mg, enquanto apresentam baixos teores de Si e Al, ocorrendo em aproximadamente 3% da superfície terrestre (NASCIMENTO et al., 2022).

Um dos aspectos mais estudados em relação a esse bioma foi como os altos valores de metais pesados, provenientes de fontes naturais, podem influenciar a biologia do solo, principalmente a microbiota. Com o objetivo de entender como os altos teores de Ni em um solo ultramáfico de Goiás podem afetar a microbiota do solo, Pessoa Filho et al. (2015) observaram que, mesmo com elevados teores de Ni, não ocorreu um efeito significativo sobre a biomassa microbiana e as atividades enzimáticas analisadas, o que está relacionado à adaptação dessas comunidades aos altos teores desse elemento. Além disso, as mudanças no funcionamento da microbiota do solo estavam mais ligadas ao teor e tipo da matéria orgânica

do solo, ao invés da disponibilidade do Ni, indicando que a qualidade do solo foi um fator mais determinante do que a toxicidade potencial desse metal pesado.

No Pampa, Althaus et al. (2018), avaliaram as propriedades químicas, físicas e mineralógicas dos solos do Rio Grande do Sul e identificaram que os teores médios de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V e Zn foram mais altos nos solos desenvolvidos sobre basaltos do que nos demais. Além disso, o Cd apresentou o menor valor médio ( $0,41 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

No bioma Caatinga, além de pesquisas relacionadas às características naturais dos solos, como realizado por Silva et al. (2022), também foram observados estudos relacionados à ação da agricultura, como presente no trabalho de Morais et al. (2014). No trabalho de Silva et al. (2022), com o objetivo de compreender a influência do material parental na fertilidade natural dos solos da região da Caatinga, os autores observaram que os solos originados de arenitos, gnaisses e granitos foram mais ácidos e menos férteis que os solos derivados de harzburgitos, mármores e anortositos, os quais apresentaram maiores teores de nutrientes. Em relação aos metais pesados, a disponibilidade de Cd e Pb foi baixa; contudo, foram encontradas concentrações elevadas de níquel em solos derivados de harzburgitos, o que pode representar riscos para o meio ambiente. Além disso, houve a predominância do intemperismo físico, pois os solos da região apresentaram um baixo índice de alteração química.

Ao analisar uma área de cultivo agrícola, Morais et al. (2014) tiveram como objetivo avaliar e comparar as alterações químicas em áreas com diferentes tempos de uso com bananeira no projeto de irrigação Baixo-Açu. No trabalho em questão, foram estudados os elementos Pb, Ni, Cd, Cu, Zn e Mn, e foi possível identificar que existe uma relação inversa entre a qualidade do solo e a intensidade de uso, ou seja, quanto mais tempo o solo é utilizado para cultivo de banana irrigada, menor sua qualidade. Isso foi observado com a diminuição do índice de qualidade do solo (IQS) utilizado na pesquisa, o qual iniciou com 0,524 e diminuiu para 0,360. Além disso, os metais pesados estudados (Pb, Ni, Cd, Cu, Zn, Mn) obtiveram maiores valores nas áreas cultivadas em comparação com a área de vegetação nativa, o que os autores relacionaram com a adubação, especialmente as fosfatadas.

Por fim, o bioma menos estudado foi o Pantanal, com apenas 12 pesquisas. Seu primeiro estudo foi realizado por Hylander et al. (1994), intitulado “*Mercury Levels in Alto Pantanal: A Screening Study*”, abordando o Hg em diferentes matrizes ambientais dentro da Bacia do Alto Paraguai, destacando o impacto causado pela mineração de ouro no ecossistema local. Nos solos, os autores identificaram que os teores de Hg variaram de 7,5 a  $40,0 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$ , com média de  $24,5 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$  e erro padrão de 2,6, sendo maiores os níveis no horizonte superficial do solo. Além disso, a espécie de peixe estudada (*Pseudo-Platystoma coruscans*) apresentou níveis

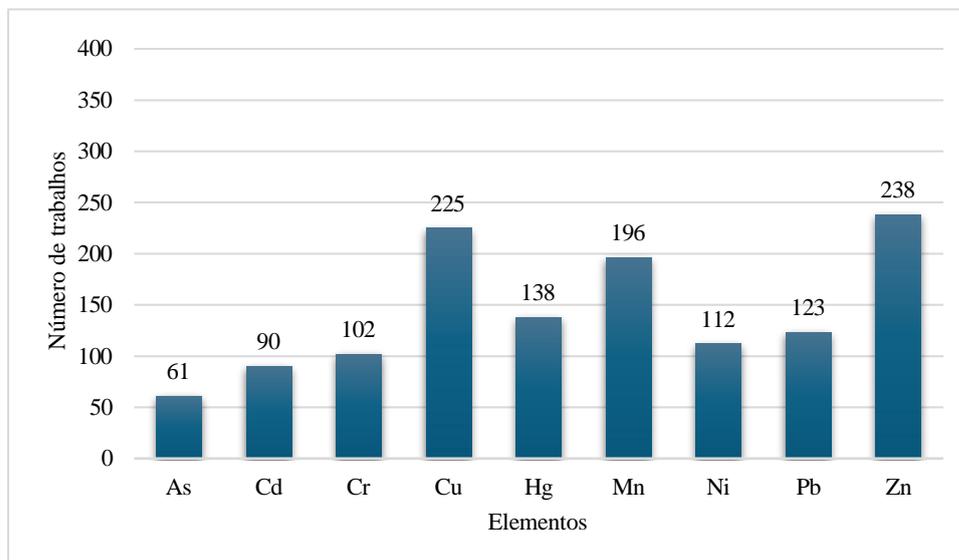
acima do limite recomendado para o consumo humano (0,5 ppm). Os autores concluíram que o mercúrio proveniente da mineração do ouro está entrando na cadeia alimentar, representando riscos para a vida selvagem e as populações humanas na região.

Entre os anos de 2011 e 2020, foi a década em que foram realizados a maior quantidade de trabalhos acerca do Pantanal, com 5 publicações. Mesmo sendo uma área com uma rica biodiversidade e sendo um ecótono circundado pelos outros biomas brasileiros, é possível perceber uma falta de investigações sobre os teores de metais pesados encontrados (ALHO et al., 2019) O primeiro trabalho sobre os teores naturais encontrados no bioma aparece com o trabalho de Coringa, Couto e Torrado (2014), que procuraram estudar a geoquímica dos solos da região norte do Pantanal do Mato Grosso, caracterizando e interpretando a composição geoquímica total de elementos na sub-região do Barão de Melgaço. Em seu estudo, foi possível observar que houve a presença de dois tipos de solos distintos: um com textura arenosa a franco-arenosa, com teor elevado de  $\text{SiO}_2$  e baixos teores de macro e micronutrientes; e um segundo tipo, mais argiloso, com maiores quantidades de minerais 2:1 e metais pesados (Mn, Cu, Zn, Ni, Cr).

Mesmo com poucos trabalhos, uma das principais atividades notificadas por lançarem metais pesados no ecossistema do bioma são a agricultura e a mineração. Em um estudo realizado por Pierangeli et al. (2009), comparando os teores de As, Pb, Cd e Hg de áreas de vegetação nativa com áreas de pastagem, culturas anuais e áreas de mineração de ouro, foi possível observar que os maiores teores desses elementos tóxicos foram encontrados nas áreas de mineração. Contudo, as áreas de vegetação nativa obtiveram valores de As de  $43,9 \text{ mg kg}^{-1}$ , o que está acima do valor de referência da região ( $15 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Os autores concluíram que os solos da região do Vale do Alto Guaporé são afetados por metais pesados, principalmente associados às atividades antrópicas e práticas agrícolas, ressaltando também a importância de um monitoramento contínuo desses elementos na região.

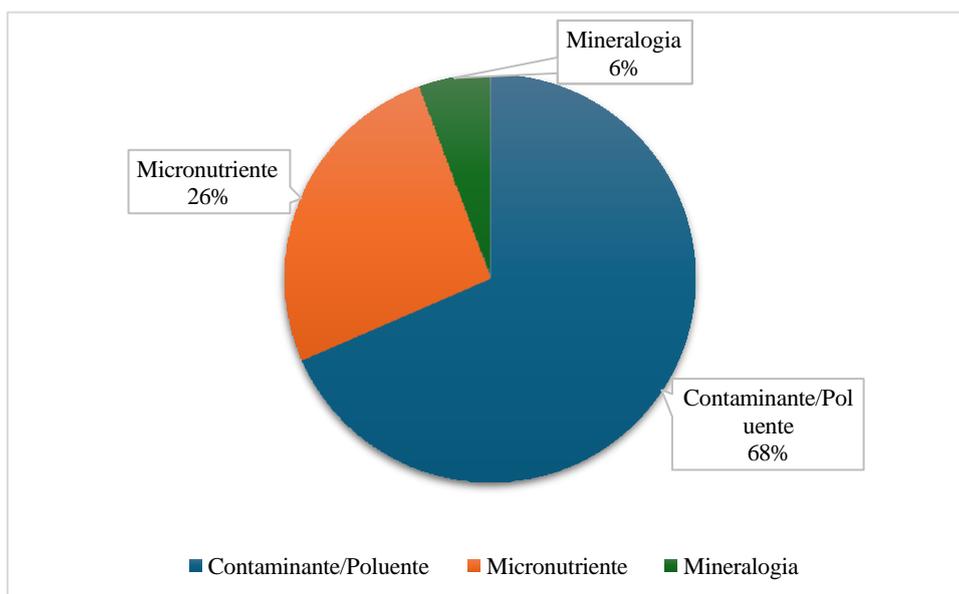
Em relação aos metais pesados estudados, o que teve maior aparição foi o Zn, seguido por Cu, Mn, Hg, Pb, Ni, Cr, Cd e As (Figura 6).

**Figura 6** – Número de citações dos metais pesados, destacando a frequência de estudo de cada metal



A quantidade de artigos que abordam a temática de metais pesados em solos e sua área de estudo pode ser dividida em três grandes grupos temáticos: micronutrientes, contaminantes/poluentes e trabalhos referentes à mineralogia do solo (Figura 7).

**Figura 7** – Campo de atuação das pesquisas dos estudos selecionados



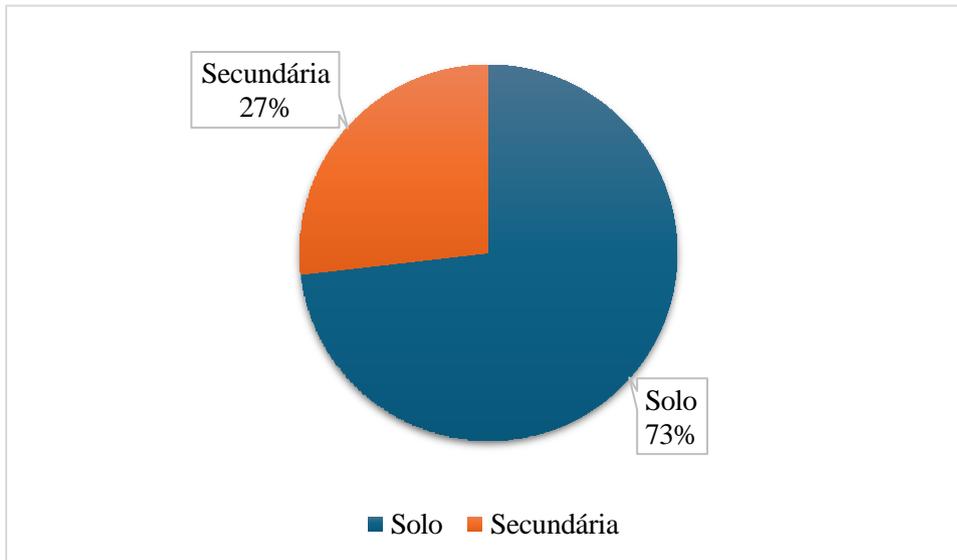
O número de trabalhos relacionados aos teores de metais pesados como fonte poluidora pode ser explicado pelo aumento dos estudos ligados aos efeitos deletérios dos metais nos ecossistemas, afetando os serviços ecossistêmicos do local de estudo ou seus efeitos sobre a

fauna, flora e seres humanos (DE ANDRADE LIMA et al., 2021). Em contrapartida, o número reduzido de trabalhos relacionados aos micronutrientes e à mineralogia diz respeito à área da ciência do solo ligada à nutrição das culturas comerciais do país (GUPTA; MONTEIRO; WERNER, 2021). Por mais que o termo “metais pesados” possa remeter a algo negativo, dentre esse grande grupo de elementos, existem aqueles que são essenciais, em baixos teores, para o metabolismo de diversas espécies, tanto vegetais quanto animais, e aqueles que são conhecidos apenas por terem efeitos toxicológicos (ALLOWAY, 2012).

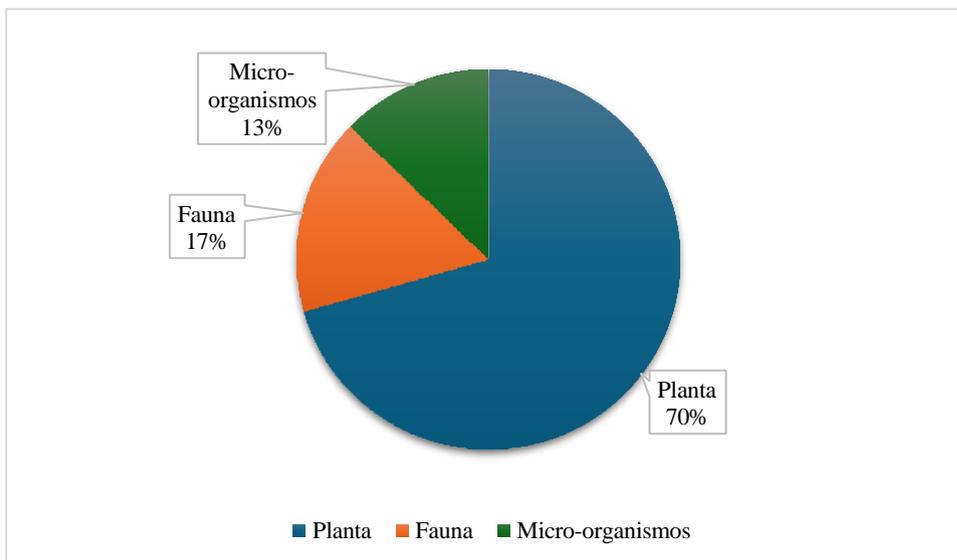
Os micronutrientes Zn, Cu, Mn e Ni são importantes para o metabolismo dos organismos e desempenham papéis semelhantes. Solos com baixos teores desses elementos podem causar perdas na agricultura, especialmente em sistemas intensivos (GUPTA; MONTEIRO; WERNER, 2021). Já o As, Pb, Cd, Hg e Cr são classificados como metais pesados sem função metabólica.

Esses elementos podem ocorrer de forma natural na litosfera como parte de rochas ou minérios. Suas concentrações em rochas máficas e ultramáficas geralmente são maiores do que em rochas félsicas. Além disso, nas rochas sedimentares, sua concentração é variável, no entanto, é mais alta em sedimentos com granulação fina. Em grande parte, suas formas nos solos variam entre íons monovalentes a hexavalentes, sendo mais encontrados em suas formas bivalentes (ALLOWAY, 2012).

Os efeitos tóxicos desses metais dependem de sua disponibilidade no solo e da sensibilidade dos organismos, podendo causar, nas plantas, queimaduras, manchas, danos na parede celular, necrose nos tecidos vegetais, degradação do aparato fotossintético e desequilíbrio nutricional (DE CONTI et al., 2018; XU et al., 2022). Pode-se observar, inclusive, que, dentre os estudos selecionados, ocorre uma divisão sobre como o solo é abordado nas pesquisas: a maior parte dos trabalhos avaliou diretamente os teores de metais pesados no solo, enquanto a minoria utilizou o solo como um fator secundário, relacionando-o com outros aspectos naturais (Figura 8).

**Figura 8** – Classificação do solo como objeto de estudo

Dentre os trabalhos classificados que abordam os metais pesados nos solos de maneira secundária, pode-se perceber que 70% dos trabalhos avaliaram o efeito desses elementos nas plantas, enquanto 17% avaliaram a fauna e 13% os microrganismos do solo (Figura 9).

**Figura 9** – Classificação dos objetos de estudo secundários selecionados

A diferença entre como o solo é tratado nos diversos estudos se deve ao viés de como o solo é observado, muitas vezes relacionado com o momento atual da ciência e dos temas relevantes naquele período. O solo pode ser considerado um sistema aberto que faz parte dos

diversos ciclos de nutrientes da natureza. Logo, dentro da ciência, existem trabalhos que avaliam de diferentes formas os metais pesados encontrados.

### 3.4 Conclusões

O levantamento bibliométrico evidenciou avanços e desafios na pesquisa sobre a presença de metais pesados nos solos dos biomas brasileiros. Embora tenha havido um aumento significativo no número de publicações no país, a produção científica ainda se mostra incipiente, o que limita a compreensão dos impactos desses elementos sobre os ecossistemas.

As pesquisas realizadas até o momento têm se concentrado principalmente na Amazônia, Mata Atlântica e Cerrado, biomas de grande relevância nacional e internacional. Destaca-se, nesse contexto, o maior volume de estudos sobre mercúrio (Hg) no bioma amazônico, quando comparado aos demais. Por outro lado, observa-se uma escassez de informações sobre metais pesados nos solos de outros biomas, como o Pantanal. Essa lacuna de conhecimento dificulta ações efetivas de proteção e manejo sustentável.

Além disso, é notável a carência de estudos mais aprofundados sobre cádmio (Cd) e arsênio (As), que figuram entre os metais menos abordados na literatura científica. Dada a toxicidade desses elementos e seus potenciais efeitos sobre os organismos presentes nos diferentes biomas, torna-se urgente ampliar as investigações nessa área. Para uma gestão mais eficiente dos ambientes naturais, é essencial fortalecer os investimentos em pesquisa, com foco nas pressões antrópicas sofridas pelos biomas.

## Referências Bibliográficas

ALHO, CLEBER J. R.; MAMEDE, SIMONE B.; BENITES, MARISTELA; ANDRADE, BRUNA S.; SEPÚLVEDA, JOSE J. O. AMEAÇAS À BIODIVERSIDADE DO PANTANAL BRASILEIRO PELO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA. **Ambiente & Sociedade**, [s. l.], v. 22, p. e01891, 25 nov. 2019. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc201701891vu2019L3AO>.

ALLOWAY, BRIAN J. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. [S. l.]: **Springer Science & Business Media**, 2012.

ALOVISI, ALESSANDRA MAYUMI TOKURA; CASSOL, CLEIDIMAR JOÃO; NASCIMENTO, JAQUELINE SILVA; SOARES, NATANAEL BORGES; DA SILVA JUNIOR, IZAIAS RODRIGUES; DA SILVA, ROBERVALDO SOARES; DA SILVA, JOÃO AUGUSTO MACHADO. Soil factors affecting phosphorus adsorption in soils of the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, [s. l.], v. 22, p. e00298, 1 set. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00298>.

ALTHAUS, DAIANA; GIANELLO, CLESIO; TEDESCO, MARINO JOSÉ; SILVA, KELLY JUSTIN DA; BISSANI, CARLOS ALBERTO; FELISBERTO, REGINA. Natural Fertility and Metals Contents in Soils of Rio Grande do Sul (Brazil). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 42, p. e0160418, 1 fev. 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160418>.

BUCH, ANDRESSA CRISTHY; NIEMEYER, JÚLIA CARINA; FERNANDES CORREIA, MARIA ELIZABETH; SILVA-FILHO, EMMANOEL VIEIRA. Ecotoxicity of mercury to *Folsomia candida* and *Proisotoma minuta* (Collembola: Isotomidae) in tropical soils: Baseline for ecological risk assessment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s. l.], v. 127, p. 22–29, 1 maio 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.01.009>.

CORINGA, ELAINE DE ARRUDA OLIVEIRA; COUTO, EDUARDO GUIMARÃES; TORRADO, PABLO VIDAL. Geoquímica de solos do pantanal norte, Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 38, n. 6, p. 1784–1793, dez. 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000600013>.

COSTA, FLÁVIO SILVA; MACEDO, MARIA WANNA FIGUEIREDO SENA; ARAÚJO, ANA CAROLINA MOREIRA; RODRIGUES, CASSIMIRA ALBUQUERQUE; KURAMAE, EIKO EURYA; DE BARROS ALCANFOR, SILVIA KELI; PESSOA-FILHO, MARCO; BARRETO, CRISTINE CHAVES. Assessing nickel tolerance of bacteria isolated from serpentine soils. **Brazilian Journal of Microbiology**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 705–713, jul. 2019. <https://doi.org/10.1007/s42770-019-00111-4>.

CÔTÉ, ISABELLE M.; DARLING, EMILY S.; BROWN, CHRISTOPHER J. Interactions among ecosystem stressors and their importance in conservation. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, [s. l.], v. 283, n. 1824, p. 20152592, 10 fev. 2016. <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.2592>.

DA SILVA, RAYANNA JACQUES AGRA BEZERRA; DA SILVA, YGOR JACQUES AGRA BEZERRA; VAN STRAATEN, PETER; DO NASCIMENTO, CLÍSTENES WILLIAMS ARAÚJO; BIONDI, CAROLINE MIRANDA; DA SILVA, YURI JACQUES AGRA BEZERRA; DE ARAÚJO FILHO, JOSÉ COELHO. Influence of parent material on soil chemical characteristics in a semi-arid tropical region of Northeast Brazil.

**Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 194, n. 5, p. 331, maio 2022. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09914-9>.

DE ANDRADE LIMA, LUIZ ROGÉRIO PINHO; MENEZES FILHO, JOSÉ ANTÔNIO; MERTENS, FRÉDÉRIC; PASSOS, CARLOS JOSÉ SOUZA. Investigation of lead sources in manioc flour from riparian communities in the Tapajós Region, Brazilian Amazon.

**Environmental Earth Sciences**, [s. l.], v. 80, n. 4, p. 158, fev. 2021. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09458-0>.

DE CONTI, L.; MELO, G.W.; CERETTA, C.A.; TAROUCO, C.P.; MARQUES, A.C.R.; NICOLOSO, F.T.; TASSINARI, A.; TIECHER, T.L.; CESCO, S.; MIMMO, T.; BRUNETTO, G. Photosynthesis and growth of young grapevines intercropped with native grasses in soils contaminated with copper. **Acta Horticulturae**, [s. l.], n. 1217, p. 179–184, out. 2018. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1217.23>.

DÍAZ, SANDRA; PASCUAL, UNAI; STENSEKE, MARIE; MARTÍN-LÓPEZ, BERTA; WATSON, ROBERT T.; MOLNÁR, ZSOLT; HILL, ROSEMARY; CHAN, KAI M. A.; BASTE, IVAR A.; BRAUMAN, KATE A.; POLASKY, STEPHEN; CHURCH, ANDREW; LONSDALE, MARK; LARIGAUDERIE, ANNE; LEADLEY, PAUL W.; VAN OUDENHOVEN, ALEXANDER P. E.; VAN DER PLAAT, FELICE; SCHRÖTER, MATTHIAS; LAVOREL, SANDRA; AUMEERUDDY-THOMAS, YILDIZ; BUKVAREVA, ELENA; DAVIES, KIRSTEN; DEMISSEW, SEBSEBE; ERPUL, GUNAY; FAILLER, PIERRE; GUERRA, CARLOS A.; HEWITT, CHAD L.; KEUNE, HANS; LINDLEY, SARAH; SHIRAYAMA, YOSHIHISA. Assessing nature's contributions to people. **Science**, [s. l.], v. 359, n. 6373, p. 270–272, 19 jan. 2018. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>.

DO NASCIMENTO, CLÍSTENES WILLIAMS ARAÚJO; LIMA, LUIZ HENRIQUE VIEIRA; DA SILVA, FRANKLONE LIMA; BIONDI, CAROLINE MIRANDA; CAMPOS, MILTON CÉSAR COSTA. Natural concentrations and reference values of heavy metals in sedimentary soils in the Brazilian Amazon. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 190, n. 10, p. 606, 24 set. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6989-4>.

DRUMMOND, LEANDRO DE OLIVEIRA; MEIRE, RODRIGO ORNELLAS; BRAGA, CARYNE; REZENDE, CARLOS EDUARDO DE; MALM, OLAF; CERQUEIRA, RUI. Trophic position, altitudinal distribution, and water dependence as determining factors for mercury concentrations in tropical montane anurans. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 806, p. 151356, 1 fev. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151356>.

DUTRA SILVA, SANDRO; BARBOSA, ALTAIR SALES. Paisagens e fronteiras do Cerrado: ciência, biodiversidade e expansão agrícola nos chapadões centrais do Brasil. **Estudos Ibero-Americanos**, [s. l.], v. 46, n. 1, seq. Estudos Ibero-Americanos, p. 5, 2020.

FIGUEIREDO, MAURILIO ASSIS; DINIZ, ADRIANA PEDROSA; ABREU, ADRIANA TRÓPIA DE; MESSIAS, MARIA CRISTINA TEIXEIRA BRAGA; KOZOVITS, ALESSANDRA RODRIGUES. Growing *Periandra mediterranea* on post-mining substrate: native Fabaceae with potential for revegetation of degraded rupestrian grasslands in Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, [s. l.], v. 32, p. 232–239, 15 jan. 2018. <https://doi.org/10.1590/0102-33062017abb0381>.

FONSÊCA, NATHAN C.; CUNHA, JÉSSICA STÉFANE A.; ALBUQUERQUE, ELIZA R.G.M. DE; LINS-E-SILVA, ANA CAROLINA B. Carbon stock in aboveground biomass and necromass in the Atlantic Forest: an analysis of data published between 2000 and 2021. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [s. l.], v. 96, n. 1, p. e20220761, 2024. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420220761>.

GOMES, DIEGO FERREIRA; MOREIRA, RAQUEL APARECIDA; SANCHES, NATHALIE APARECIDA OLIVEIRA; DO VALE, CRISTIANO ANDREY; DAAM, MICHEL ADRIAAN; GORNI, GUILHERME ROSSI; BASTOS, WANDERLEY RODRIGUES. Dynamics of (total and methyl) mercury in sediment, fish, and crocodiles in an Amazonian Lake and risk assessment of fish consumption to the local population. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 192, n. 2, p. 101, 8 jan. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8066-z>.

GUEDES, Vânia L S; BORSCHIVER, Suzana. BIBLIOMETRIA: UMA FERRAMENTA ESTATÍSTICA PARA A GESTÃO DA INFORMAÇÃO E DO CONHECIMENTO, EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO, DE COMUNICAÇÃO E DE AVALIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA. **Encontro nacional de ciência da informação**, [s. l.], v. 6, p. 18, 2005.

GUERRA, CARLOS A.; BERDUGO, MIGUEL; ELDRIDGE, DAVID J.; EISENHAUER, NICO; SINGH, BRAJESH K.; CUI, HAIYING; ABADES, SEBASTIAN; ALFARO, FERNANDO D.; BAMIGBOYE, ADEBOLA R.; BASTIDA, FELIPE; BLANCO-PASTOR, JOSÉ L.; DE LOS RÍOS, ASUNCIÓN; DURÁN, JORGE; GREBENC, TINE; ILLÁN, JAVIER G.; LIU, YU-RONG; MAKHALANYANE, THULANI P.; MAMET, STEVEN; MOLINA-MONTENEGRO, MARCO A.; MORENO, JOSÉ L.; MUKHERJEE, ARPAN; NAHBERGER, TINA U.; PEÑALOZA-BOJACÁ, GABRIEL F.; PLAZA, CÉSAR; PICÓ, SERGIO; VERMA, JAY PRAKASH; REY, ANA; RODRÍGUEZ, ALEXANDRA; TEDERSOO, LEHO; TEIXIDO, ALBERTO L.; TORRES-DÍAZ, CRISTIAN; TRIVEDI, PANKAJ; WANG, JUNTAO; WANG, LING; WANG, JIANYONG; ZAADY, ELI; ZHOU, XIAOBING; ZHOU, XIN-QUAN; DELGADO-BAQUERIZO, MANUEL. Global hotspots for soil nature conservation. **Nature**, [s. l.], v. 610, n. 7933, p. 693–698, out. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05292-x>.

GUIMARAES, JEAN R. D. Mercury in the Amazon. **Elem Sci Anth**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 032, 20 nov. 2020. <https://doi.org/10.1525/elementa.032>.

GUPTA, U.; MONTEIRO, F.; WERNER, J. Micronutrients in Grassland Production. **IGC Proceedings (1989-2023)**, [s. l.], 19 set. 2021. Disponível em: <https://uknowledge.uky.edu/igc/19/4/28>.

HARIDASAN, M. Accumulation of nutrients by eucalyptus seedlings from acidic and calcareous soils of the cerrado region of Central Brazil. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 86, n. 1, p. 35–45, 1 fev. 1985. <https://doi.org/10.1007/BF02185023>.

HYLANDER, LARS D.; SILVA, EDINALDO C.; OLIVEIRA, LÁZARO J.; SILVA, SUZANA A.; KUNTZE, ELLEN K.; SILVA, DONIZETE X. Mercury Levels in Alto Pantanal: A Screening Study. **Ambio**, [s. l.], v. 23, n. 8, p. 478–484, 1994. .

KRONBERG, B. I.; FYFE, W. S.; LEONARDOS, O. H.; SANTOS, A. M. The chemistry of some Brazilian soils: Element mobility during intense weathering. **Chemical Geology**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 211–229, 1 fev. 1979. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(79\)90124-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(79)90124-4).

KUBIER, ANDREAS; WILKIN, RICHARD T.; PICHLER, THOMAS. Cadmium in soils and groundwater: A review. **Applied Geochemistry**, [s. l.], v. 108, p. 104388, 1 set. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104388>.

LANA-COSTA, JACIARA; DA SILVA, MARIELA MATTOS; MARTINS, AUXILIADORA OLIVEIRA; GUARNIER, JULIA CRISTINA; SILVA JUNIOR, ROMÁRIO DE OLIVEIRA; SILVA, DIOLINA MOURA; NUNES-NESI, ADRIANO; ARAÚJO, WAGNER L. Biochemical and physiological aspects of restinga herbaceous plants tolerance to iron ore tailing plume along the coastal region of Espírito Santo-Brazil. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 191, p. 104618, 1 nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104618>.

LEMESSA, FITUMA; SIMANE, BELAY; SEYOUM, ASSEFA; GEBRESENBET, GIRMA. Analysis of the concentration of heavy metals in soil, vegetables and water around the bole Lemi industry park, Ethiopia. **Heliyon**, [s. l.], v. 8, n. 12, 1 dez. 2022. DOI 10.1016/j.heliyon.2022.e12429. Disponível em: [https://www.cell.com/heliyon/abstract/S2405-8440\(22\)03717-3](https://www.cell.com/heliyon/abstract/S2405-8440(22)03717-3). Acesso em: 19 mar. 2025.

LILIENFEIN, JULIANE; WILCKE, WOLFGANG; ANGELO AYARZA, MIGUEL; VILELA, LOURIVAL; DO CARMO LIMA, SAMUEL; ZECH, WOLFGANG. Soil acidification in *Pinus caribaea* forests on Brazilian savanna Oxisols. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 128, n. 3, p. 145–157, 1 abr. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00143-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00143-7).

LIN, WENTING; WU, KANGMING; LAO, ZHILANG; HU, WEI; LIN, BOJI; LI, YANLIANG; FAN, HONGBO; HU, JUNJIE. Assessment of trace metal contamination and ecological risk in the forest ecosystem of dexing mining area in northeast Jiangxi Province, China. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s. l.], v. 167, p. 76–82, jan. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.001>.

LINS, CLÁUDIA ELIZABETE LIMA; CAVALCANTE, UIDED MAAZE T.; SAMPAIO, EVERARDO V. S. B.; MESSIAS, ARMINDA SACCONI; MAIA, LEONOR COSTA. Growth of mycorrhized seedlings of *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. in a copper contaminated soil. **Applied Soil Ecology**, [s. l.], v. 31, n. 3, p. 181–185, 1 mar. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.06.004>.

MELLO, FERNANDO MACHADO DE; TEODORO, MARIA EDUARDA L. R.; MESQUITA, GUSTAVO N. C.; PINHEIRO, HELENA SARAIVA KOENOW; BILAL, ESSAID. Heavy metals backgrounds and guiding values in southwestern amazonian soils – A comparative study. **Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 71 à 86, 2020. <https://doi.org/10.26471/cjees/2020/015/110>.

MORAIS, ELIS R. C. DE; OLIVEIRA, ARTHUR A. S.; MAIA, CELSEMY E. Qualidade do solo cultivado com banana irrigada e sua relação com áreas de caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 18, p. 887–891, set. 2014. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n09p887-891>.

MUÑOZ, ANGELICA MARIA MOSQUERA; FREITAS, SIMONE RODRIGUES DE. Importância dos Serviços Ecosistêmicos nas Cidades: Revisão das Publicações de 2003 a 2015. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 89–104, 1 ago. 2017. <https://doi.org/10.5585/geas.v6i2.853>.

NAKAZATO, RICARDO KEIICHI; LOURENÇO, ISABELA S.; ESPOSITO, MARISIA P.; LIMA, MARCOS E. L.; FERREIRA, MAURICIO L.; CAMPOS, RAFAELA DE O. A.; RINALDI, MIRIAN C. S.; DOMINGOS, MARISA. Trace metals at the tree-litter-soil-interface in Brazilian Atlantic Forest plots surrounded by sources of air pollution. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 268, p. 115797, 1 jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115797>.

NASCIMENTO, CLÍSTENES WILLIAMS ARAÚJO DO; LIMA, LUIZ HENRIQUE VIEIRA; SILVA, YGOR JACQUES AGRA BEZERRA DA; BIONDI, CAROLINE MIRANDA. Ultramafic soils and nickel phytomining opportunities: A review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], vol. 46, p. e0210099, 20 Apr. 2022. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210099>.

NOGUEIRA, LAIS MENEGHINI; FILHO, MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA; MEGDA, MÁRCIO MAHMOUD; GALINDO, FERNANDO SHINTATE; BUZZETTI, SALATIÉR; ALVES, CLEITON JOSÉ. Nutritional assessment and yield of corn as a function of boron rates and zinc fertilization. **Semina: Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 40, n. 6, p. 2545–2560, 29 ago. 2019. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n6p2545>.

PESSOA-FILHO, MARCO; BARRETO, CRISTINE CHAVES; DOS REIS JUNIOR, FÁBIO BUENO; FRAGOSO, RODRIGO ROCHA; COSTA, FLÁVIO SILVA; DE CARVALHO MENDES, IEDA; DE ANDRADE, LEIDE ROVÊNIA MIRANDA. Microbiological functioning, diversity, and structure of bacterial communities in ultramafic soils from a tropical savanna. **Antonie van Leeuwenhoek**, [s. l.], v. 107, n. 4, p. 935–949, 1 abr. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10482-015-0386-6>.

PFEIFFER, WOLFGANG C.; DRUDE DE LACERDA, LUIZ; MALM, OLAF; SOUZA, CRISTINA MARIA M.; DA SILVEIRA, ENE GLORIA; BASTOS, WANDERLEY R. Mercury concentrations in inland waters of gold-mining areas in Rondônia, Brazil. **Science of The Total Environment**, Trace Metals in Lakes. [s. l.], v. 87–88, p. 233–240, 1 nov. 1989. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(89\)90238-6](https://doi.org/10.1016/0048-9697(89)90238-6).

PIERANGELI, MARIA APARECIDA PEREIRA; EGUCHI, EDSON SADAYUKI; RUPPIN, RODRIGO FROEDE; COSTA, RAYAN BRUNO FERREIRA; VIEIRA, DAIANE FERREIRA. Teores de As, Pb, Cd e Hg e fertilidade de solos da região do Vale do Alto Guaporé, sudoeste do estado de Mato Grosso. **Acta Amazonica**, [s. l.], v. 39, p. 61–69, mar. 2009. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000100006>.

PINTO, LUIZ. Status e os novos desafios das unidades de conservação na Amazônia e Mata Atlântica. [S. l.: s. n.], 2014.

REZENDE, C. L.; SCARANO, F. R.; ASSAD, E. D.; JOLY, C. A.; METZGER, J. P.; STRASSBURG, B. B. N.; TABARELLI, M.; FONSECA, G. A.; MITTERMEIER, R. A. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 208–214, 1 out. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.10.002>.

RIZWAN, MUHAMMAD; USMAN, KAMAL; ALSAFRAN, MOHAMMED. Ecological impacts and potential hazards of nickel on soil microbes, plants, and human health. **Chemosphere**, [s. l.], v. 357, p. 142028, 1 jun. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142028>.

RODER, LUDMILA RIBEIRO; GUERRINI, IRAÊ AMARAL; LOZANO SIVISACA, DEICY CAROLINA; YAGUANA PUGLLA, CELSO ANIBAL; GÓES DE MORAES, FELIPE; PINHEIRO DA SILVA, JAQUELINE; BATISTA FONSECA, RENATA CRISTINA; UMBELINO, MARIA TEREZA; JAMES, JASON NATHANIEL; CAPRA, GIAN FRANCO; GANGA, ANTONIO. Atlantic rainforest natural regeneration in fragmented formations affected by increasing human disturbance. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 325, p. 116521, 1 jan. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116521>.

TIECHER, TADEU L.; CERETTA, CARLOS A.; TIECHER, TALES; FERREIRA, PAULO A. A.; NICOLOSO, FERNANDO T.; SORIANI, HILDA H.; ROSSATO, LIANA V.; MIMMO, TANJA; CESCO, STEFANO; LOURENZI, CLEDIMAR R.; GIACHINI, ADMIR J.; BRUNETTO, GUSTAVO. Effects of zinc addition to a copper-contaminated vineyard soil on sorption of Zn by soil and plant physiological responses. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s. l.], v. 129, p. 109–119, 1 jul. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.03.016>.

VASCONCELLOS, THAÍS JORGE DE; MOREIRA, NATTACHA DOS SANTOS; SANTOS, RAMON SILVA DOS; ANJOS, MARCELINO JOSÉ DOS; CALLADO, CÁTIA HENRIQUES. CHEMICAL ELEMENTS ANALYSIS OF THE SOIL AT AN URBANIZATION GRADIENT IN THE ATLANTIC FOREST. **Revista Árvore**, [s. l.], v. 45, p. e4504, 19 abr. 2021. <https://doi.org/10.1590/1806-908820210000004>.

VEZZANI, FABIANE MACHADO. Soils and the Ecosystem Services. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 8, p. 673–684, 2015. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20150023>.

WUNDER, DENISE A.; DROSTE, ANNETTE; WINDISH, PAULO G. Megaspore germination and initial development of *Regnellidium diphyllum* Lindman (Pteridophyta, Marsileaceae) sporophytes in the presence of cadmium. **Brazilian Journal of Botany**, [s. l.], v. 32, p. 177–181, mar. 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042009000100017>.

XU, JUN; ZHANG, QIAN; WANG, SHENGLI; NAN, ZHONGREN; LONG, SONG; WU, YINING; DONG, SUHANG. Bioavailability, transfer, toxicological effects, and contamination assessment of arsenic and mercury in soil-corn systems. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 30, n. 4, p. 10063–10078, 6 set. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22847-7>.

YANG, QINGCHUN; ZHANG, LIANGMIAO; WANG, HUALIN; MARTÍN, JORDI DELGADO. Bioavailability and health risk of toxic heavy metals (As, Hg, Pb and Cd) in urban soils: A Monte Carlo simulation approach. **Environmental Research**, [s. l.], v. 214, p. 113772, nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113772>.

ZINN, YURI LOPES; FARIA, JÉSSICA AMARAL DE; ARAUJO, MARLA ALESSANDRA DE; SKORUPA, ALBA LUCIA ARAUJO. Soil parent material is the main control on heavy metal concentrations in tropical highlands of Brazil. **CATENA**, [s. l.], v. 185, p. 104319, fev. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104319>.

#### **4 ANÁLISE DOS TEORES DE METAIS PESADOS NOS SOLOS DE FRAGMENTO FLORESTAL URBANO MONITORADO PELO PROGRAMA DE PESQUISA EM BIODIVERSIDADE.**

##### **Resumo**

O bioma Mata Atlântica, foi historicamente degradado e fragmentado devido ao aumento das cidades e industrialização brasileiras, o que pode levar a aumentos significativos de contaminantes em seus solos, afetando os serviços ecossistêmicos por ele desempenhados. Por isso, se faz de extrema importância o conhecimento acerca dos teores de metais pesados encontrados neste bioma. O trabalho foi realizado no Parque Estadual de Dois Irmãos (PEDI) no município de Recife, Pernambuco e teve como objetivo a quantificação dos teores de metais pesados nos solos, nas profundidades de 0 a 10 e 10 a 20 centímetros realizou-se a caracterização química (pH, COT, P, K, Na, Al, Ca e Mg) e análise granulométrica dos solos estudados. A seguir foram quantificados os teores totais e ambientalmente disponíveis de Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn. A metodologia utilizada para quantificação dos teores totais no solo foi o método de fluorescência de raios-X, e para a obtenção dos teores ambientalmente disponíveis foi utilizada a metodologia do 3051a da USEPA. As amostras já maceradas e pesadas, foram transferidas para tubos de teflon e adicionados ácidos nítricos e clorídricos, com o intuito de acessar os teores de metais disponíveis de curto a médio prazo. A dosagem foi realizada via Espectrômetro de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). Os resultados revelaram que o PEDI contém, baixo pH, variando entre 3 e 5. Além disso, possui alto alumínio disponível ( $1,13 \text{ cmolc dm}^{-3}$ ) e baixas concentrações de bases ( $1,33 \text{ cmolc dm}^{-3}$ ) e de carbono orgânico, devido à intensa lixiviação destes elementos. Em relação aos teores ambientalmente disponíveis, o PEDI teve teores considerados baixos. Suas médias totais foram (em  $\text{mg.kg}^{-1}$ ) de 0,015 para Cd, 10,37 para Cr, 177 para Cu, 8,33 para Mn, 0,66 para Ni, 5,01 para Pb e 4,72 para Zn. Além disso, foi possível observar uma diferença significativa entre estágios de sucessão florestal diferentes no PEDI. Os solos do PEDI possuem baixos teores de metais pesados, mesmo estando localizado em uma área urbana e próximo de fontes antrópicas indicando que os mesmos não estão contaminados com os metais estudados.

Palavras-chave: RAPELD. Poluição. Preservação.

## **ANALYSIS OF HEAVY METAL LEVELS IN SOILS OF AN URBAN FOREST FRAGMENT MONITORED BY THE BIODIVERSITY RESEARCH PROGRAM.**

### **Abstract**

The Atlantic Forest biome has historically been degraded and fragmented due to the expansion of Brazilian cities and industrialization, which can lead to significant increases in contaminants in its soils, affecting the ecosystem services it provides. Therefore, understanding the levels of heavy metals present in this biome is of utmost importance. The study was conducted at the Parque Estadual de Dois Irmãos (PEDI) in the municipality of Recife, Pernambuco, and aimed to quantify the levels of heavy metals in soils at depths of 0–10 cm and 10–20 cm. Chemical characterization (pH, TOC, P, K, Na, Al, Ca, and Mg) and granulometric analysis of the studied soils were performed. Subsequently, the total and environmentally available levels of Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, and Zn were quantified. The methodology used for quantifying total metal levels in the soil was X-ray fluorescence, while the environmentally available levels were obtained using the USEPA 3051a method. The already ground and weighed samples were transferred to Teflon tubes, and nitric and hydrochloric acids were added to extract the short- to medium-term available metal fractions. Quantification was performed using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). The results revealed that PEDI has low pH, ranging between 3 and 5. Additionally, it exhibits high available aluminum ( $1.13 \text{ cmolc dm}^{-3}$ ) and low concentrations of base cations ( $1.33 \text{ cmolc dm}^{-3}$ ) and organic carbon due to intense leaching of these elements. Regarding environmentally available levels, PEDI had low concentrations. The total mean levels (in  $\text{mg kg}^{-1}$ ) were 0.015 for Cd, 10.37 for Cr, 177 for Cu, 8.33 for Mn, 0.66 for Ni, 5.01 for Pb, and 4.72 for Zn. Furthermore, a significant difference was observed between different forest succession stages in PEDI. The soils in PEDI have low heavy metal concentrations, even though they are located in an urban area and near anthropogenic sources, indicating that they are not contaminated with the studied metals.

Keywords: RAPELD. Pollution. Preservation.

## 4.1 Introdução

A Mata Atlântica é um dos biomas mais ricos em biodiversidade do mundo, possui importância ecológica, econômica e social inestimável. Originalmente, cobria cerca de 15% do território brasileiro, estendendo-se por 17 estados e sendo reconhecida por sua diversidade de espécies, muitas endêmicas (SANTOS; BOHRER; NASCIMENTO, 2024). No entanto, atualmente, sua área está reduzida a aproximadamente 28% da cobertura original devido à intensa exploração humana, incluindo urbanização, agricultura e atividades industriais (REZENDE et al., 2018)

Além de sua biodiversidade, a Mata Atlântica oferece serviços ecossistêmicos essenciais, como provisão de habitats e regulação do clima (GUERRA et al., 2022). Tais serviços não apenas sustentam a vida selvagem, mas também desempenham papel crucial no bem-estar humano e na economia regional (REZENDE et al., 2018). Contudo, a degradação ambiental, entre as quais a contaminação por metais pesados, pode representar uma ameaça à integridade desse bioma (VASCONCELLOS et al., 2021).

Metais pesados, como Pb, Cd, Ni, Cu, Zn, Hg e As, os quais ocorrem, naturalmente, em rochas são frequentemente introduzidos no ambiente por atividades antrópicas, como mineração, uso de fertilizantes e descargas industriais (ELLWANGER; CHIES, 2023; VASCONCELLOS et al., 2021). No solo, esses contaminantes podem acumular-se e gerar efeitos tóxicos, afetando organismos vegetais e animais e comprometendo o equilíbrio ecológico (MAZUREK et al., 2017). Além disso, podem interferir negativamente na capacidade do bioma de fornecer serviços ecossistêmicos, como ciclagem de nutrientes e manutenção da qualidade da água (ELLWANGER; CHIES, 2023; KUMAR et al., 2020)

A relação entre biodiversidade, serviços ecossistêmicos e metais pesados é complexa. Por um lado, a diversidade de espécies pode contribuir para a mitigação de poluentes; por outro, a toxicidade desses contaminantes pode reduzir a diversidade biológica e levar ao colapso de funções ecossistêmicas (CHODAK et al., 2013; LIN et al., 2019; MAZUREK et al., 2017; PRAVEEN; NAGALAKSHMI, 2022; TANG et al., 2019; YANG et al., 2022). Em áreas florestais em diferentes estágios de sucessão, os teores de metais pesados podem comportar-se de modo distinto. A sucessão florestal ocorre em uma sequência de fases, com o estabelecimento inicial de espécies pioneiras, seguido pelo fechamento do dossel, aumento da riqueza de espécies e da biomassa (CUNHA et al., 2021). Os estágios florestais, até atingirem a maturidade, podem sofrer interferência de ações antrópicas, influenciando a disponibilidade de nutrientes e a qualidade do solo (WANG et al., 2021).

Portanto, diante da crescente pressão antrópica sobre os biomas, a contaminação por metais pesados surge como uma possibilidade preocupante, capaz de comprometer a qualidade ambiental e a integridade dos ecossistemas, e entender como esses contaminantes afetam a Mata Atlântica e seus diferentes estágios de sucessão florestal é essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de conservação. Este trabalho busca conhecer os teores de metais pesados em solos de um remanescente florestal urbano desse bioma, localizado em Recife (PE), em diferentes profundidades e estágios sucessionais com o intuito de contribuir para a gestão e o monitoramento de contaminantes nessa área.

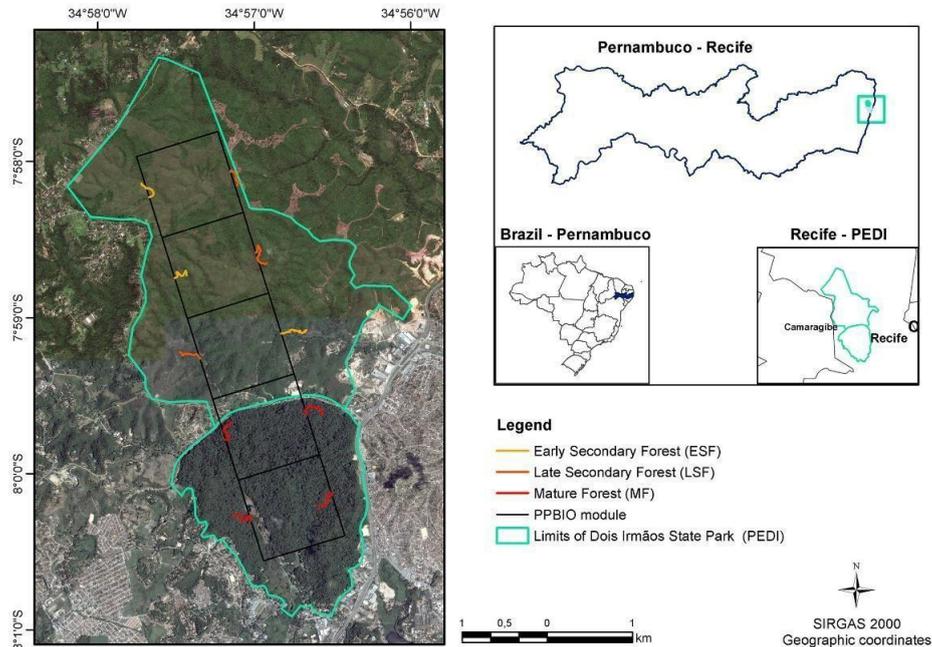
## 4.2 Material e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida com solos dos fragmentos do bioma Mata Atlântica monitorado pelo Programa de Pesquisa em Biodiversidade, sítio Pernambuco, no Parque Estadual de Dois Irmãos (PEDI), considerado atualmente o maior fragmento do bioma em área urbana do estado (LIMA et al., 2018).

### 4.2.1 Área de estudo

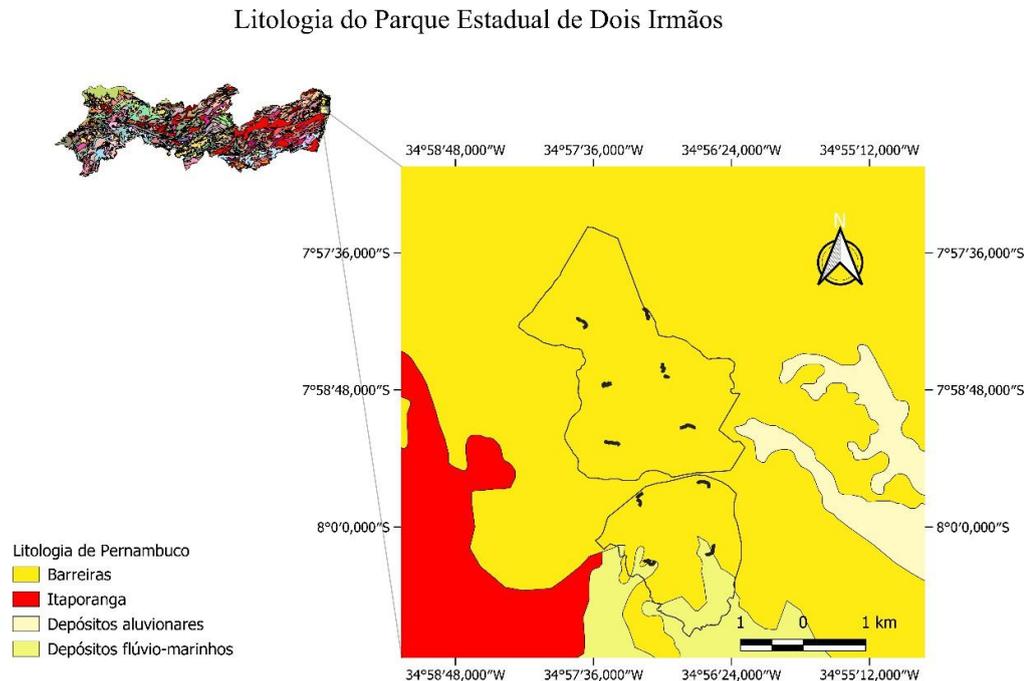
O PEDI localiza-se na zona norte da cidade de Recife, Pernambuco entre, as coordenadas 7°52'21" e 8°00'54"S; 34°55'53" e 34°58'38" W e possui uma área de 1.161 hectares (FERREIRA; BORGES, 2024). O parque foi criado em 1987 pela Lei n° 9.989/87, chamado inicialmente de Reserva Ecológica de Dois Irmãos e posteriormente alçado à categoria de Parque Estadual por intermédio da Lei n° 11.622/98. Atualmente, o PEDI é constituído de uma reserva ecológica urbana de Mata Atlântica, no bairro de Dois Irmãos, Recife, e se estende por outros bairros da cidade (Figura 10). O PEDI é composto por dois fragmentos com estágios sucessionais diferentes, a Mata de Dois Irmãos com 384 ha de floresta madura (acima de 60 anos) e a antiga Fazenda Brejo dos Macacos com 774 ha de floresta secundária tardia (com idades variando entre 38 a 50 anos) e floresta secundária inicial (com menos de 38 anos), sendo dividida entre floresta aberta (59,5%) e capoeira (34,5%) (CÂMARA; MÉLO; FALBO, 2022; CUNHA et al., 2021; NASCIMENTO et al., 2024).

**Figura 10** – Mapa de localização do Parque Estadual de Dois Irmãos, Recife/PE



Por via de regra, segundo Rodrigues (2019), o parque está localizado em uma matriz urbana, composta por bairros residenciais, o campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco, a rodovia BR-101, terminal de integração e indústrias, e envolvem principalmente a área de floresta madura, que apresenta estabilidade na conservação e sucessão florestal. A floresta jovem, aparentemente, sofre menor impacto antrópico (CÂMARA; MÉLO; FALBO, 2022).

O clima da região é considerado tropical litorâneo úmido do tipo As' segundo a classificação de Köppen, com temperaturas médias mensais acima de 25° C e índices pluviométricos anuais acima de 2000mm (Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, [s. d.]). A cobertura vegetal da região é um fragmento de Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas e sua estrutura geológica é composta por terrenos sedimentares da Formação Barreiras, sendo constituída por sedimentos areno-argilosos (LIMA et al., 2018) (Figura 11).

**Figura 11** – Unidade geológica da área de estudo

Essa unidade geológica se estende ao longo da costa brasileira do Amapá até o Rio de Janeiro e em algumas regiões de baixadas amazônicas (MELO, V. F. et al., 2002). Sua origem está atrelada principalmente ao intemperismo do embasamento cristalino, localizados no interior do continente e sua idade de formação é atribuído ao período do Mioceno ao Pleistoceno Inferior (DEMATTÊ; MAZZA; DEMATTÊ, 1996; FURRIER; ARAÚJO; MENESES, 2006).

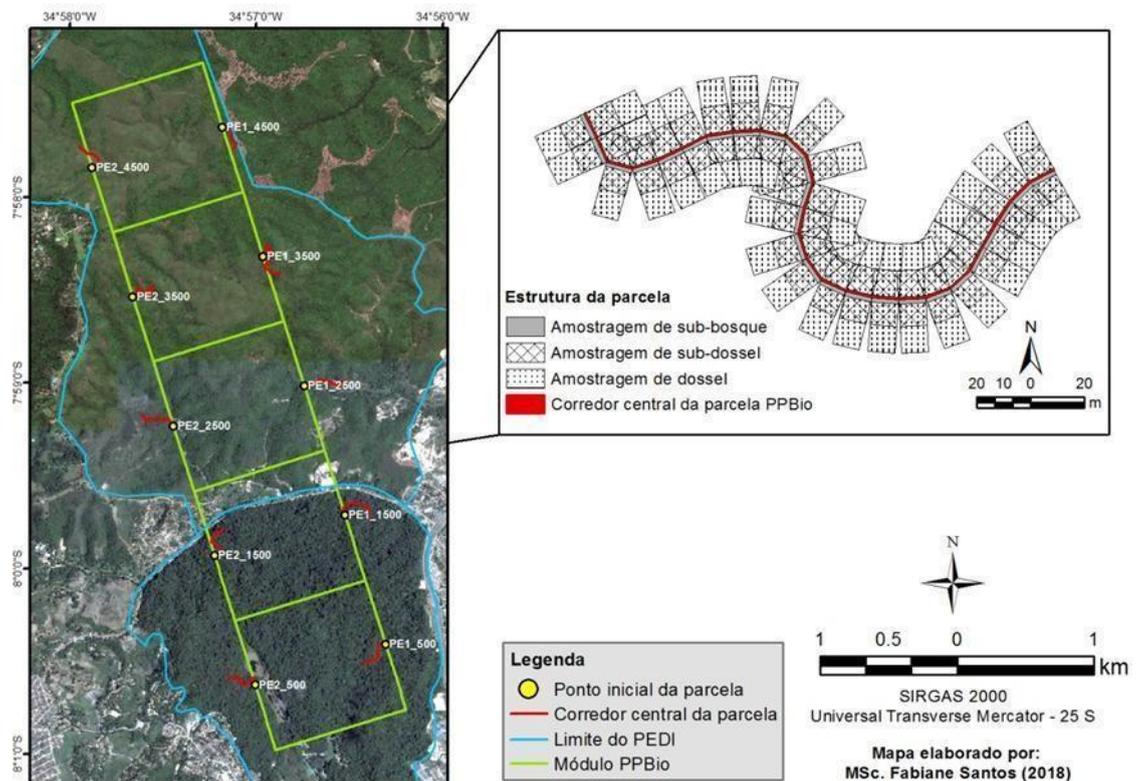
O PEDI possui mais de 87% do seu relevo moderadamente ondulado a fortemente ondulado, com altitude variando de 0 a 105 metros (ARAGÃO; DUARTE, 2015). Os solos predominantes desta área são: Latossolo Amarelo, Argissolo Amarelo, Neossolo Quartzarênico, Gleissolo (LIMA et al., 2018).

#### 4.2.2 Coleta do solo

A coleta de solos foi realizada dentro de um módulo RAPELD (Rapid Assessment surveys - RAP and PELD, acronímia em português para Long-Term Ecological Research – LTER), pertencente ao PPBIO (MAGNUSSON et al., 2005). O sistema RAPELD se configura como uma combinação de trilhas e parcelas de distribuição uniforme que dão subsídios para pesquisas padronizadas e monitoramento da biodiversidade (ROSA et al., 2021) (Figura 12). O módulo foi instalado em 2013, com 5 km de extensão e 1 km de distância entre si. Ao longo de

cada trilha estão instaladas cinco parcelas de 250 metros de comprimento, totalizando 10 parcelas e cada uma subdividida em 25 segmentos (10 metros de comprimento cada), que seguem a curva de nível do terreno.

**Figura 12** – Mapa de localização das trilhas dentro do sistema RAPELD, utilizadas na coleta de solos no Parque Estadual de Dois Irmãos - PE



Fonte: Fabiane Santos, 2018

A coleta de solos ocorreu conforme o protocolo de coleta de solos do PPBio com alteração na profundidade amostrada, onde em cada parcela foram coletadas amostras simples de solos em seis piquetes com 50 metros de diferença entre eles (0, 50, 100, 150, 200 e 250m) e em duas profundidades (0-10 e 10-20 cm) com o auxílio de um trado holandês. Ao todo foram coletadas 120 amostras de solo. As amostras foram separadas em sacos plásticos e armazenadas em local seco para que fosse realizada a terra fina seca ao ar.

#### 4.2.3 Caracterização química e física do solo do PEDI

Foram realizadas análises químicas e físicas descritas por Teixeira et al (2017), no intuito de caracterizar os solos do PEDI. Em relação às características químicas, foram

analisados os seguintes aspectos: pH, COT, P, K, Na, Al, Ca e Mg. O pH em água na proporção 1:2,5 e as demais análises foram feitas titulações.

E em relação à análise granulométrica, a metodologia selecionada foi do densímetro, o qual foram utilizados 50g de solo, com 250 ml de água e 10 ml de hidróxido de sódio  $1 \text{ mol L}^{-1}$ , com o intuito de dispersão das partículas do solo. Após a agitação em proveta de 1 litro, foi introduzido o densímetro dentro da suspensão para a leitura de silte e argila.

#### **4.2.4 Análise de teores totais e ambientalmente disponíveis (pseudo-totais) de metais pesados**

Para a obtenção dos valores totais de metais pesados nos solos foi utilizado o aparelho de fluorescência de raios X portátil (FRXp), utilizando amostras de solo previamente secas (TFSA), maceradas em almofariz de ágata e tamisadas em peneira com malha de abertura de 0,15mm, e submetidos a dosagem de amostra no aparelho S1 TITAN, modelo 800, que após energizado gera raios X e reporta os teores constituintes da amostra. O modo de escaneamento SOIL (calibrado de fábrica) foi utilizado para leitura das amostras que duraram 60s por material. Os metais pesados estudados foram Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn

Para a garantia de controle de qualidade para os teores totais encontrados, foi utilizado o padrão NIST (*National Institute of Standards and Technology*) 2709<sup>a</sup> (SAN JOAQUIN) e foram obtidos valores de recuperação 62, 88, 73, 104, 123 e 80 % para Cr, Mn, Ni, Cu, Zn e Pb. O Cd foi abaixo do limite de detecção do aparelho

As amostras foram submetidas ao método de digestão 3051A (USEPA, 2007) para a obtenção dos valores ambientalmente disponíveis de metais pesados. Para tanto foi utilizado a 0,5g de solo, tamisado a 0,15 mm, foram pesados e transferidos para tubos de digestão PTFE, aos quais foram adicionados 9 ml de  $\text{HNO}_3$  e 3 ml de HCL. Depois de adicionados os reagentes, as amostras foram colocadas em processo de pré-digestão, *overnight*. Após esse período, as amostras foram conduzidas para micro-ondas, aquecidas até atingirem uma temperatura de  $175^\circ\text{C}$  e essa temperatura era mantida por 4,5 minutos. Em seguida, os extratos foram filtrados e transferidos para balões certificados de 25 ml e seu volume foi completado com água ultrapura (LINK; WALTER; KINGSTON, 1998). Os extratos foram transferidos para tubos Falcon de 15 ml de volume e lidos dosados no Espectrômetro de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). Foram dosados os teores dos seguintes metais: Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb e Zn.

O controle de qualidade das análises de pseudo-totais foi realizado utilizando amostras em branco e solo certificado, NIST SAN JOAQUIN – 2709<sup>a</sup>. As amostras do material de referência foram preparadas da mesma forma que as amostras de solos e os valores de

recuperação para cada metal foram 75, 84, 98, 98, 87, 84, 85 e 82% para Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn respectivamente.

O limite de detecção também foi utilizado para determinar a menor concentração do elemento do ICP-OES, foi utilizado a metodologia do INMETRO citado por Perez (2010), onde foram utilizados 7 replicatas em branco se baseando no seguinte cálculo:

$$LD = 0 + t_{(n-1, 1-\alpha)} \cdot S$$

Sendo:

t = a abscissa da distribuição de Student, dependente do tamanho da amostra e do grau de confiança

s = desvio padrão amostral dos brancos da amostra, com adição

O único elemento químico o qual foi necessário o limite de detecção do aparelho por apresentar leituras baixas

#### 4.2.5 Análises estatísticas

Foram realizadas a estatística descritiva (mínimo, média, mediana, máximo e desvio padrão) dos teores totais e pseudo totais identificados nos solos do PEDI, a priori no software Microsoft Excel 2016, para a tabulação dos dados e em seguida importada no programa R Studio 4.4.2

Em primeiro lugar foi realizado o teste de Procrustes do pacote *vegan* (OKSANEN et al., 2024) para avaliação de diferença entre os contaminantes, características químicas e análise granulométrica nas diferentes profundidades trabalhadas. Os resultados do teste de Procrustes mostraram não existe diferença significativa entre os teores avaliados e as profundidades. Para identificar a correlação entre variáveis nos diferentes sucessionais do PEDI foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA), através dos pacotes *factorextra* (KASSAMBRA E MUNDT, 2020) e *FactoMiner* (LE, JOSSE E HUSSON, 2008). Além disso, foi realizado correlação de Pearson para identificar quais metais pesados possuem alta correlação, sendo utilizada a função *corr* (KUHN, JACKSON E CIMENTADA, 2022) e para a visualização dos dados de forma gráfica, foi utilizado o pacote *corrplot* (WEI E SIMKO, 2024).

Depois disto, os dados foram padronizados utilizando somente a profundidade de 0 a 10 cm e calculado a matriz de correlação dos metais com o método *Hellinger*. Além disso foi utilizado a porcentagem de explicação dos eixos da PCA e por fim para sua visualização foi utilizado a função *ggplot2* (WICKHAM, 2016). Por fim, foi realizado o teste Pernanova para verificar a existência de diferença dos metais pesados nos diferentes estágios e parcelas com o

pacote *vegan* (OKSANEN et al., 2024) e a função *adonis*. Todas as análises foram desenvolvidas utilizando o Rstudio versão 2024.09.1 e a criação do mapa foi feito utilizando o *software* QGIS 3.40.

## 4.3 Resultado e Discussão

### 4.3.1 Características químicas avaliadas no solo do PEDI

Os valores de pH na área madura variaram de 3,36 a 4,21, com valor médio de 3,78, enquanto na área jovem os valores foram de 3,86 a 5,58, com média de 4,69 (Figura 13 e 14). Ambos os valores corroboram os reportados por Lima et al. (2018, em estudo também realizado no PEDI, no qual foram registrados valores entre 3,71 e 4,76. Solos com pH entre 4 e 5 são considerados de acidez alta, e abaixo de 4,5, de acidez muito elevada. O pH é uma das propriedades químicas do solo de maior importância, pois se relaciona com a disponibilidade de nutrientes e elementos possivelmente tóxicos, como metais pesados (DUDDIGAN et al., 2021; YANG et al., 2022).

A elevada acidez em áreas com altos índices pluviométricos é considerada normal, pois ocorre a lixiviação de cátions básicos (LIMA et al., 2018). O  $Al^{3+}$  variou nos solos do PEDI de 0,15 a 2,23  $cmolc\ dm^{-3}$ , sendo o maior valor médio encontrado na área da floresta secundária madura (1,53  $cmolc\ dm^{-3}$ ), considerado alto segundo Prezotti (2013). Em solos ácidos, a solubilidade do alumínio é elevada, o que pode causar danos como engrossamento das raízes, redução do crescimento, problemas na formação de pelos radiculares e, conseqüentemente, afetando a absorção de água e nutrientes, entre outros (LIMA et al., 2018; PREZOTTI, 2013).

Ao avaliar os teores de  $Ca^{2+}$ , foi possível perceber que os valores variaram entre 0,40 a 0,95  $cmolc\ dm^{-3}$ , com média de 0,65  $cmolc\ dm^{-3}$  na floresta secundária madura. Já a floresta jovem apresentou valores maiores, variando de 0,45 a 3,50  $cmolc\ dm^{-3}$ , com média de 1,26  $cmolc\ dm^{-3}$ .

Em relação aos teores de  $Mg^{2+}$ , no estágio sucessional maduro, variaram de 0,10 a 0,70  $cmolc\ dm^{-3}$ , com média de 0,29  $cmolc\ dm^{-3}$ . No estágio jovem, os valores foram maiores, variando de 0,10 a 0,75  $cmolc\ dm^{-3}$ , com média de 0,37  $cmolc\ dm^{-3}$ .

O  $Na^{+}$  na área florestal madura apresentou valores de 0,01 a 0,10  $cmolc\ dm^{-3}$ , com média de 0,06  $cmolc\ dm^{-3}$ , enquanto na floresta jovem variou de 0,03 a 0,18  $cmolc\ dm^{-3}$ , com média de 0,10  $cmolc\ dm^{-3}$ .

O  $K^{+}$  variou de 0,04 a 0,09  $cmolc\ dm^{-3}$  na área madura, enquanto a área jovem apresentou valores entre 0,04 a 0,12  $cmolc\ dm^{-3}$ , com maior concentração média em comparação ao estágio sucessional maduro.

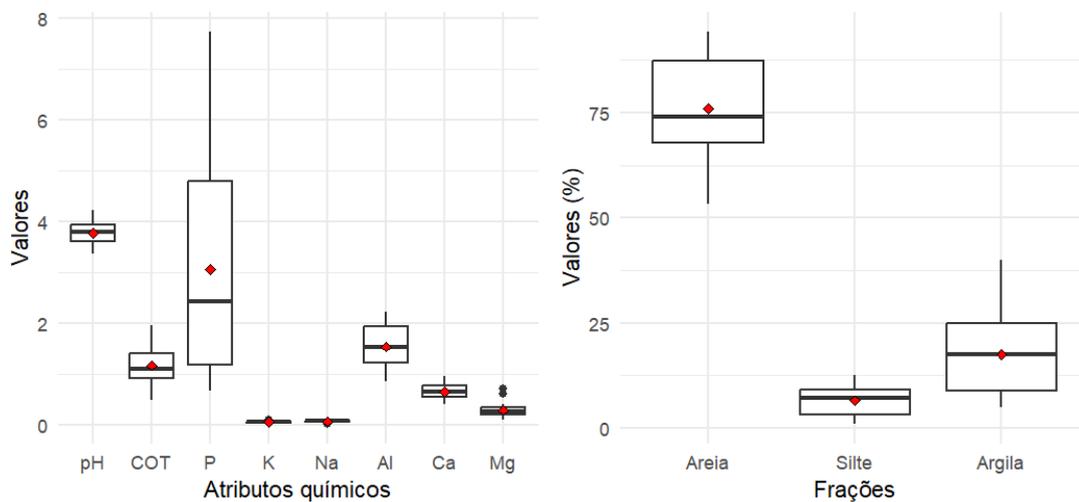
Ao analisar a soma de bases (SB), o resultado foi de 1,33  $cmolc\ dm^{-3}$ . Os valores identificados, tanto nos elementos químicos estudados quanto na soma de bases, são

considerados baixos segundo Prezotti (2013), porém esperados para solos florestais localizados em áreas tropicais, devido à ação acentuada da precipitação, que provoca a lixiviação desses elementos (LIMA et al., 2018; PREZOTTI, 2013). Em relação à capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva do solo, observou-se que a área madura apresentou valor de  $2,59 \text{ cmolc dm}^{-3}$ , enquanto a área jovem registrou  $2,76 \text{ cmolc dm}^{-3}$ .

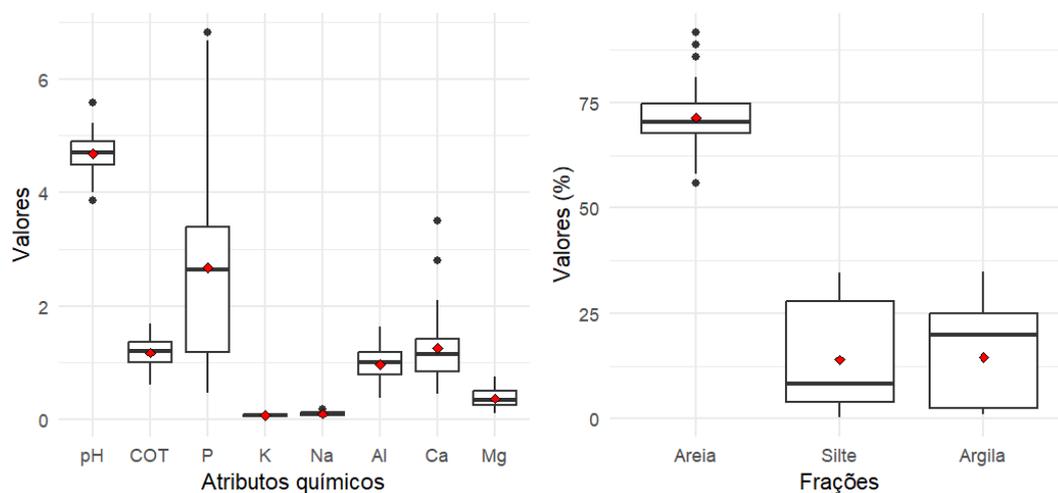
O fósforo, nutriente essencial para o crescimento vegetal, apresentou teores médios de  $3,05 \text{ mg dm}^{-3}$  no estágio sucessional maduro e  $2,63 \text{ mg dm}^{-3}$  no jovem do PEDI. Além disso, o valor de COT na área madura foi de  $1,17 \text{ kg}^{-1}$ , enquanto na área jovem foi de  $1,18 \text{ kg}^{-1}$ . Embora sejam considerados baixos segundo Prezotti (2013), em solos florestais, não são fatores limitantes para o desenvolvimento das espécies vegetais, pois tanto o COT quanto o P passam por rápida ciclagem de nutrientes, permitindo o crescimento dos organismos.

A granulometria dos solos sob ambos os estágios sucessionais apresentaram predomínio da fração areia com 75% para a área madura e 71% para a área jovem (Figura 13 e 14)

**Figura 13** – Caracterização química e fração granulométrica do estágio sucessional jovem na profundidade 0 a 10 centímetros do Parque Estadual de Dois Irmãos com médias no formato losangular vermelho



**Figura 14** – Caracterização química e fração granulométrica do estágio sucessional maduro na profundidade 0 a 10 centímetros do Parque Estadual de Dois Irmãos, com médias no formato losangular vermelho



Ao analisar os teores ambientalmente disponíveis encontrados nos diferentes estágios sucessionais, foi possível perceber que o Cd foi abaixo do limite de detecção do ICP-OES para ambas as áreas. Exceto pelo Cu e Zn, os metais pesados apresentaram maiores valores na área florestal jovem (Tabela 2).

**Tabela 2** - Análise descritiva dos teores ambientalmente disponíveis nos diferentes estágios sucessionais do Parque Estadual de Dois Irmãos na profundidade 0 a 10 centímetros

<b>Estágio Sucessional Maduro</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
				<b>mg kg<sup>-1</sup></b>			
Mínima	< 0,155	1,20	0,45	1,35	0,35	0,90	1,40
Média	< 0,155	11,61	2,27	7,97	0,63	5,87	4,67
Mediana	< 0,155	7,50	1,48	5,96	0,60	6,08	4,63
Máximo	< 0,155	32,60	15,45	19,85	1,45	13,85	11,80
Desvio Padrão	0,00	10,42	3,04	5,53	0,25	3,44	2,48
<b>Estágio Sucessional Jovem</b>							
Mínima	< 0,155	3,80	0,95	4,00	0,40	3,10	2,60
Média	< 0,155	12,57	1,76	11,98	0,88	5,77	6,40
Mediana	< 0,155	12,43	1,38	10,90	0,65	5,30	6,40
Máximo	< 0,155	26,95	10,70	23,50	3,70	12,55	12,45
Desvio Padrão	0,00	5,19	1,60	4,73	0,69	2,46	2,15

Segundo Paye et al. (2010), o teor de Cd na crosta é aproximadamente  $0,15 \text{ mg kg}^{-1}$  e nos solos sua média é de  $0,06 \text{ mg kg}^{-1}$  e que os maiores teores desse elemento estão relacionados a solos que tem sua origem atrelada a rochas máficas. Além disso, ocorre por sua característica intrínseca de uma não afinidade por óxidos de Fe e Mn um aumento nas perdas por lixiviação (PAYE et al., 2010), o que pode ser uma possível explicação para os baixos identificados.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente estabeleceu a criação de Valores de Referência de Qualidade para todas as unidades federativas do país, com o intuito de indicar as concentrações naturais dos elementos químicos em solos sem influência antrópica. Esses valores são estabelecidos através da interpretação de concentrações encontradas em amostras de solo de uma região, considerando seus principais tipos de solo. Servem como base para avaliação da qualidade do solo e identificar áreas que podem estar sujeitas a contaminação por atividades antrópicas (ALMEIDA et al., 2016; PAYE et al., 2010). Ao comparar os valores médios encontrados no PEDI com valores de referência de qualidade determinados por Almeida et al. (2016), Biondi et al. (2011), Paye et al. (2010) e Preston et al. (2014) foi possível perceber que os teores de metais pesados encontrados no parque são menores que os teores de referência determinados nestes trabalhos. Um dos principais fatores que pode explicar esse resultado é o tipo de material de origem: rochas sedimentares com baixos teores dos contaminantes analisados. (Tabela 3).

**Tabela 3** - Comparação entre os teores de metais pesados do PEDI com valores de referência de qualidade pelo país

Metais pesados (mg/kg)	PEDI <sup>1</sup>	PEDI <sup>2</sup>	PE <sup>3</sup>	PB <sup>4</sup>	ES <sup>5</sup>	RN <sup>6</sup>
<b>Cd</b>	<0,155	<0,155	0,5	0,06	<0,13	0,10
<b>Cr</b>	12,57	11,61	35	11,22	54,13	30,94
<b>Cu</b>	1,76	2,27	5,22	28,81	5,91	13,69
<b>Mn</b>	11,98	7,97	224,98	350,83	137,80	ND
<b>Ni</b>	0,88	0,63	4,56	9,12	9,17	19,84
<b>Pb</b>	5,77	5,87	13	10,01	<4,54	16,18
<b>Zn</b>	6,40	4,67	22,40	23,46	29,87	23,85

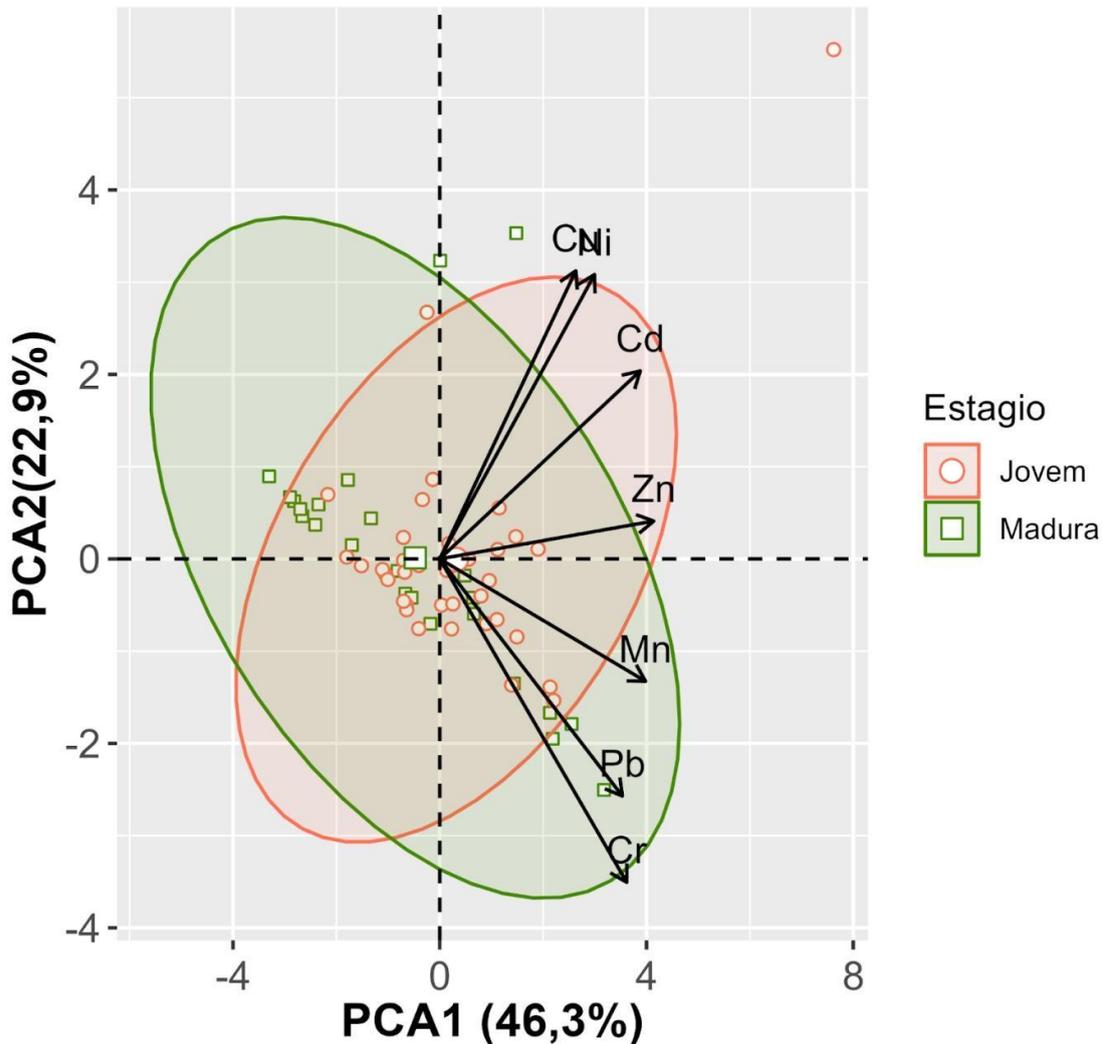
Legenda: 1 – Estágio jovem; 2 – Estágio Maduro; 3 - Biondi et al. (2011); 4 - Almeida et al. (2016); 5 - Paye et al. (2010); 6 – Preston et al. (2014).

Ao analisar os teores de metais pesados nos diferentes estágios sucessionais no PEDI, observou-se uma diferença estatisticamente significativa ( $p < 0,005$ ) entre a área de vegetação madura e a área jovem, indicando variações importantes na distribuição dos elementos entre os estágios sucessionais.

A análise de componentes principais (PCA), aplicada para explorar as relações entre os metais pesados e os diferentes estágios sucessionais, revelou que as duas primeiras dimensões explicam 69,2% da variabilidade total dos dados, o que indica uma boa representatividade do modelo em relação à dispersão dos dados.

Conforme observado na Figura 15, os metais cádmio (Cd), níquel (Ni), cobre (Cu) e zinco (Zn) apresentaram maior associação com a área jovem, sugerindo uma possível influência de fatores como uso antrópico anterior ou menor tempo de ciclagem de nutrientes. Por outro lado, os metais cromo (Cr), chumbo (Pb) e manganês (Mn) mostraram-se mais relacionados à área de vegetação madura, possivelmente refletindo processos naturais de acúmulo ao longo do tempo ou características específicas deste estágio.

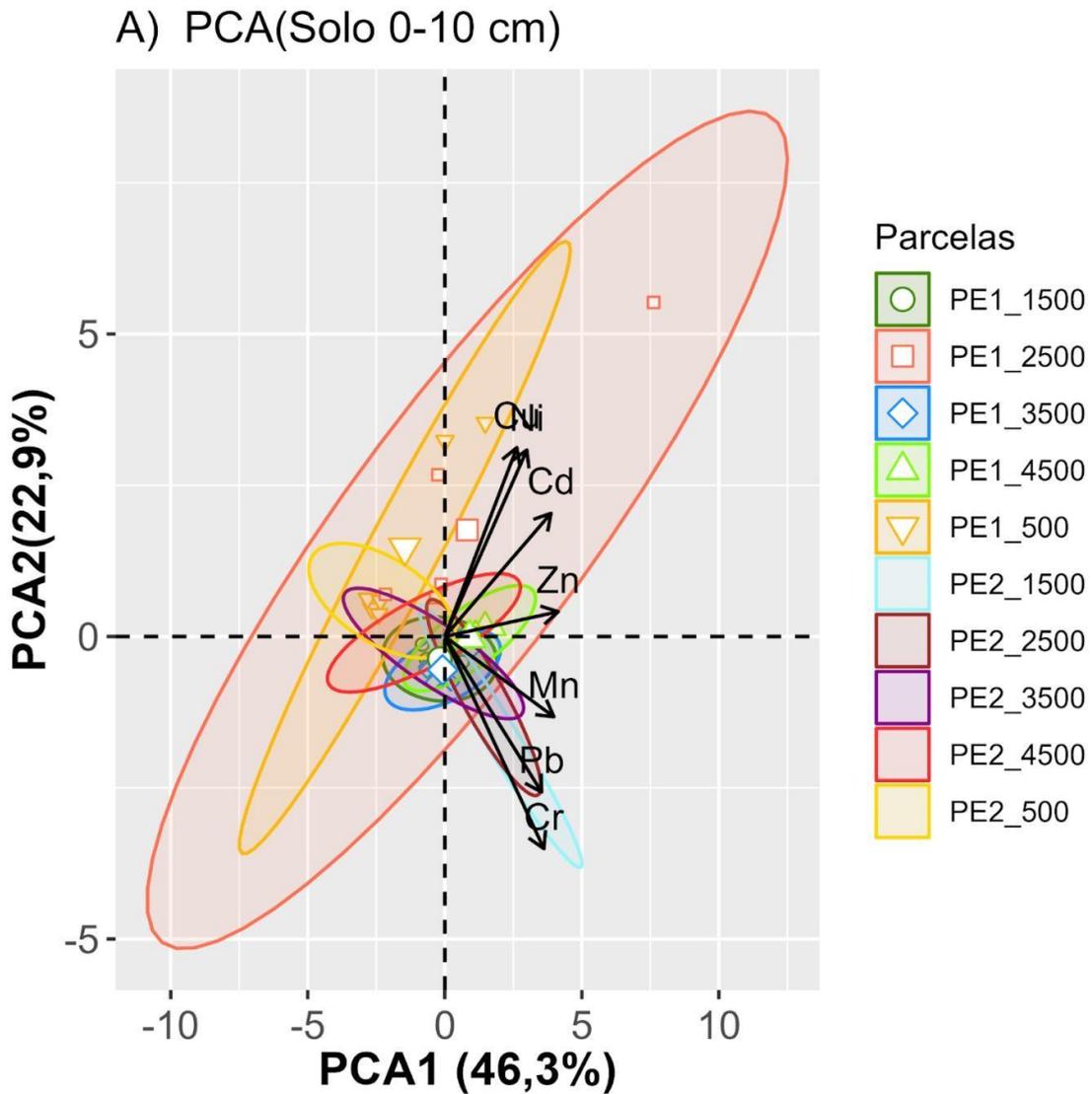
**Figura 15** – Análise de Componentes Principais sobre os diferentes estágios de sucessão do PEDI e os metais pesados na profundidade 0 a 10 cm



A análise de correlação entre os teores ambientalmente disponíveis de metais pesados revelou uma forte associação entre os elementos predominantes em cada estágio sucessional. Observou-se uma correlação significativa entre os metais Cr, Pb e Mn, característicos da área madura, bem como entre Ni, Cu, Zn e Cd, que se destacaram na área jovem (Figura 16). Esses resultados sugerem que os metais tendem a se agrupar conforme as condições edáficas e ecológicas específicas de cada estágio sucessional, reforçando a influência do tempo de regeneração e do histórico de uso do solo na disponibilidade e no comportamento desses elementos.



**Figura 17** – Análise de Componente Principal entre as parcelas do PEDI e os metais pesados, na profundidade 0 a 10 cm



Essa diferença nos estágios de sucessão florestal pode ser explicada por que nos estágios iniciais, os solos mostram um estoque maior de nutrientes em comparação aos estágios seguintes e a sua disponibilidade está ligada a forma como ocorre a ciclagem desses elementos no sistema (CAMARA et al., 2018a). Segundo Camara et al. (2018), o evento relacionado a ciclagem de é potencializado pelo processo de translocação, que é mais eficiente em florestas maduras, favorecendo assim maior conservação desses elementos na biomassa vegetal.

Além disso, vale a pena ressaltar, que mesmo com as diferenças significativas entre estágios, foi possível perceber que os teores de metais nos solos do PEDI foram sobrepostos (Figura 17), por causa dos seus baixos teores, os quais podem estar atrelados a outros fatores

como proximidade a fontes antrópicas e material de origem dos solos (GRYGAR et al., 2024). Sendo necessária uma maior investigação acerca do aporte dos metais pesados nos diferentes estágios e parcelas encontrados no Parque Estadual de Dois Irmãos.

Em relação aos teores totais identificados nos solos do PEDI, foi possível verificar que tanto Cd quanto Ni apresentaram valores abaixo do limite de detecção do aparelho, independentemente do estágio sucessional. Quanto aos demais metais analisados, apenas o Zn apresentou valor maior na área da floresta secundária jovem. Além disso, identificou-se grande desvio padrão em relação às médias em todos os elementos estudados (Tabela 4).

**Tabela 4** - Valores de teores totais no solo do Parque estadual de dois irmãos em diferentes estágios sucessionais na profundidade 0 a 10 centímetros

<b>Estágio Sucessional Maduro</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b> mg kg <sup>-1</sup>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
Mínimo	<0,003	21,00	6,00	22,00	<0,002	13,00	6,00
Média	<0,003	45,11	11,70	57,08	<0,002	17,75	14,67
Máximo	<0,003	85,00	28,00	107,00	<0,002	26,00	30,00
<b>Estágio Sucessional Jovem</b>							
Mínimo	<0,003	13,00	6,00	22,00	<0,002	11,00	10,00
Média	<0,003	23,83	10,59	50,38	<0,002	15,13	19,46
Máximo	<0,003	51,00	22,00	95,00	<0,002	27,00	31,00

A ciência do solo requer a composição geoquímica das amostras para diversos objetivos, e os dispositivos portáteis de fluorescência de raios X podem gerar dados elementares do solo rapidamente e a um custo menor, comparados aos métodos químicos tradicionais utilizados em laboratório (RAVANSARI; WILSON; TIGHE, 2020). Segundo Silva et al. (2021), essa tecnologia vem sendo aplicada recentemente em solos tropicais, com o intuito de melhorar o mapeamento de solos e preencher lacunas no conhecimento. Contudo, para a maioria das parcelas estudadas, o aparelho não demonstrou precisão em seus dados.

Possivelmente, um dos fatores que levaram à grande variação entre os desvios padrão encontrados para os metais pesados e aos valores abaixo dos limites de detecção foram os baixos teores dos contaminantes estudados no PEDI. Segundo Ravansari, Wilson e Tighe (2020), a baixa exatidão ou precisão pode ser atribuída a limites de detecção específicos, que só permitem medir com precisão elementos acima de certas concentrações. Além disso, outros fatores influenciam a leitura da concentração de elementos, como matéria orgânica, conteúdo de água e tempo de análise.

#### 4.4 Conclusões

Ao analisar os teores dos metais pesados solos do PEDI foi possível perceber que os teores seus foram abaixo dos Valores de Referência de Qualidade para os solos em diversos estados, demonstrando que o PEDI, mesmo localizado em área urbana, possui uma boa conservação da qualidade do solo e isso sendo atrelado a sua conservação e manejo. O trabalho em questão, disponibilizou um *background* temporal para os teores de metais pesados encontrados no Parque, possibilitando estudos futuros sobre os solos da região.

Entre os diferentes estágios sucessionais, foi possível perceber que apenas que Cu e Zn obtiveram valores médios maiores em relação às suas concentrações. Existe diferença significativa entre os estágios, o que deve ser melhor investigado, buscando explicações acerca de como esses metais pesados entram nesse ecossistema

Além disso, este trabalho pode ser considerado um estudo pioneiro, pois avalia os teores de metais pesados dentro de um sítio monitorado pelo Programa de Pesquisa em Biodiversidade. Pode ser expandido para os outros sítios de pesquisa e auxiliar na tomada de decisões e criações de políticas públicas acerca da biodiversidade das demais áreas.

## Referências bibliográficas

ALMEIDA, AGENOR BEZERRA DE; NASCIMENTO, CLÍSTENES WILLIAMS ARAÚJO DO; BIONDI, CAROLINE MIRANDA; SOUZA, ADAILSON PEREIRA DE; BARROS, FELIPE MARTINS DO RÊGO. Background and Reference Values of Metals in Soils from Paraíba State, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], vol. 40, 29 Apr. 2016. DOI <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150122>. Available at: <https://www.scielo.br/j/rbcS/a/WzrS4zpxXL3tKcsgR3VzfXF/>. Accessed on: 10 Apr. 2025.

ARAGÃO, JULIANA GOMES; DUARTE, SIMONE MIRTES ARAUJO. USO DAS GEOTECNOLOGIAS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO PARQUE ESTADUAL DOIS IRMÃO, RECIFE - PE. **Tecno-Lógica**, [s. l.], vol. 20, no. 1, p. 26, 19 Dec. 2015. <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v20i1.6529>.

BARBOSA, DANIELE RODRIGUES; PINHEIRO, HELENA SARAIVA; SANTOS, FABIANA SOARES DOS. Seasonal Variability of Trace Elements by Soil Depth in a Protected Area. **Floresta e Ambiente**, [s. l.], vol. 26, no. 1, p. e20170203, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.020317>.

BIONDI, CAROLINE MIRANDA; NASCIMENTO, CLÍSTENES WILLIAMS ARAÚJO DO; FABRICIO NETA, ADELAZIL DE BRITO; RIBEIRO, MATEUS ROSAS. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni E Co em solos de referência de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], vol. 35, p. 1057–1066, Jun. 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300039>.

CÂMARA, PAULO; MÉLO, INAMARA SANTOS; FALBO, PAULA. Plano de Manejo Parque Estadual de Dois Irmãos. [s. l.], 2022.

CAMARA, RODRIGO; SILVA, VINICIUS DUNCAN; DELAQUA, GEOVANA CARLA GIRONDI; LISBÔA, CINTHIA PINHEIRO; VILLELA, DORA MARIA. RELAÇÃO ENTRE SUCESSÃO SECUNDÁRIA, SOLO E SERAPILHEIRA EM UMA RESERVA BIOLÓGICA NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, BRASIL. **Ciência Florestal**, [s. l.], vol. 28, p. 674–686, Jun. 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509832066>.

CHODAK, MARCIN; GOŁĘBIEWSKI, MARCIN; MORAWSKA-PŁOSKONKA, JUSTYNA; KUDUK, KATARZYNA; NIKLIŃSKA, MARIA. Diversity of microorganisms from forest soils differently polluted with heavy metals. **Applied Soil Ecology**, [s. l.], vol. 64, p. 7–14, 1 Feb. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.11.004>.

CUNHA, JOSÉ ALBERES SANTOS DA; FONSÊCA, NATHAN CASTRO; CUNHA, JÉSSICA STÉFANE ALVES; RODRIGUES, LÚCIA DOS SANTOS; GUSMÃO, REGINALDO AUGUSTO FARIAS DE; LINS E SILVA, ANA CAROLINA BORGES. Selective logging in a chronosequence of Atlantic Forest: drivers and impacts on biodiversity and ecosystem services. **Perspectives in Ecology and Conservation**, [s. l.], vol. 19, no. 3, 2021.

DEMATTÊ, J. L. I.; MAZZA, J. A.; DEMATTÊ, J. a. M. CARACTERIZAÇÃO E GÊNESE DE UMA TOPOSSEQUÊNCIA LATOSSOLO AMARELO-PODZOL ORIGINADO DE MATERIAL DA FORMAÇÃO BARREIRAS - ESTADO DE ALAGOAS. **Scientia Agricola**, [s. l.], vol. 53, p. 20–30, Jan. 1996. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161996000100004>.

DUDDIGAN, SARAH; FRASER, TANDRA; GREEN, IAIN; DIAZ, ANITA; SIZMUR, TOM; TIBBETT, MARK. Plant, soil and faunal responses to a contrived pH gradient. **Plant and Soil**, [s. l.], vol. 462, no. 1, p. 505–524, 1 May 2021. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04879-z>.

ELLWANGER, JOEL HENRIQUE; CHIES, JOSÉ ARTUR BOGO. Brazil's heavy metal pollution harms humans and ecosystems. **Science in One Health**, [s. l.], vol. 2, p. 100019, 1 Jan. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.soh.2023.100019>.

FERREIRA, PAULO RAFAEL MACEDO; BORGES, CAROLINE. Entre açudes e leões: reconstruindo a história da área do Parque Estadual Dois Irmãos (Recife/PE). **Revista Rural & Urbano**, [s. l.], vol. 9, no. 1, sec. Revista Rural & Urbano, p. 214–238, 2024.

FOSTIER, A.-H.; CECON, K.; FORTI, M. C. Urban influence on litterfall trace metals fluxes in the Atlantic forest of São Paulo (Brazil). **Journal de Physique IV (Proceedings)**, [s. l.], vol. 107, p. 491–494, May 2003. <https://doi.org/10.1051/jp4:20030348>.

FURRIER, MAX; ARAÚJO, MAGNO ERASTO DE; MENESES, LEONARDO FIGUEIREDO DE. Geomorfologia e tectônica da Formação Barreiras no Estado da Paraíba. **Geologia USP. Série Científica**, [s. l.], vol. 6, no. 2, p. 61–70, 1 Oct. 2006. <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2006000300008>.

GRYGAR, TOMÁŠ MATYS; RADOJČÍČ, UNA; PAVLŮ, IVANA; GREVEN, SONJA; NEŠLEHOVÁ, JOHANNA G.; TŮMOVÁ, ŠTĚPÁNKA; HRON, KAREL. Exploratory functional data analysis of multivariate densities for the identification of agricultural soil contamination by risk elements. **Journal of Geochemical Exploration**, [s. l.], vol. 259, p. 107416, 1 Apr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107416>.

GUERRA, CARLOS A.; BERDUGO, MIGUEL; ELDRIDGE, DAVID J.; EISENHAUER, NICO; SINGH, BRAJESH K.; CUI, HAIYING; ABADES, SEBASTIAN; ALFARO, FERNANDO D.; BAMIGBOYE, ADEBOLA R.; BASTIDA, FELIPE; BLANCO-PASTOR, JOSÉ L.; DE LOS RÍOS, ASUNCIÓN; DURÁN, JORGE; GREBENC, TINE; ILLÁN, JAVIER G.; LIU, YU-RONG; MAKHALANYANE, THULANI P.; MAMET, STEVEN; MOLINA-MONTENEGRO, MARCO A.; MORENO, JOSÉ L.; MUKHERJEE, ARPAN; NAHBERGER, TINA U.; PEÑALOZA-BOJACÁ, GABRIEL F.; PLAZA, CÉSAR; PICÓ, SERGIO; VERMA, JAY PRAKASH; REY, ANA; RODRÍGUEZ, ALEXANDRA; TEDERSOO, LEHO; TEIXIDO, ALBERTO L.; TORRES-DÍAZ, CRISTIAN; TRIVEDI, PANKAJ; WANG, JUNTAO; WANG, LING; WANG, JIANYONG; ZAADY, ELI; ZHOU, XIAOBING; ZHOU, XIN-QUAN; DELGADO-BAQUERIZO, MANUEL. Global hotspots for soil nature conservation. **Nature**, [s. l.], vol. 610, no. 7933, p. 693–698, Oct. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05292-x>.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. [s. d.]. Available at: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Accessed on: 4 Apr. 2025.

JOACIR DE FRANÇA, E.; DE NADAI FERNANDES, E. A.; BACCHI, M. A.; TAGLIAFERRO, F. S.; SAIKI, M. Soil-leaf transfer of chemical elements for the Atlantic Forest. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, [s. l.], vol. 271, no. 2, p. 405–411, Feb. 2007. <https://doi.org/10.1007/s10967-007-0223-0>.

KASSAMBARA, A. AND MUNDT, F. (2020). factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.7. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>

KUHN M, JACKSON S, CIMENTADA J (2022). \_corr: Correlations in R\_. R package version 0.4.4, <<https://CRAN.R-project.org/package=corr>>.

KUMAR, VINOD; SHARMA ,ANKET; KUMAR ,RAKESH; BHARDWAJ ,RENU; KUMAR THUKRAL ,ASHWANI; AND RODRIGO-COMINO, JESÚS. Assessment of heavy-metal pollution in three different Indian water bodies by combination of multivariate analysis and water pollution indices. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, [s. l.], vol. 26, no. 1, p. 1–16, 2 Jan. 2020. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1497946>.

SEBASTIEN LE, JULIE JOSSE, FRANCOIS HUSSON (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1-18. 10.18637/jss.v025.i01

LIMA, MARIA SALOMÉ DE; FREIRE, FERNANDO JOSÉ; MARANGON, LUIZ CARLOS; ALMEIDA, BRIVALDO GOMES DE; RIBEIRO, EBERSON PESSOA; SANTOS, RENATO LEMOS DOS. SOLOS FLORESTAIS EM FRAGMENTO DE FLORESTA URBANA NA MATA DE DOIS IRMÃOS, RECIFE, PERNAMBUCO, BRASIL. **Ciência Florestal**, [s. l.], vol. 28, p. 542–553, Jun. 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509832037>.

LIN, WENTING; WU, KANGMING; LAO, ZHILANG; HU, WEI; LIN, BOJI; LI, YANLIANG; FAN, HONGBO; HU, JUNJIE. Assessment of trace metal contamination and ecological risk in the forest ecosystem of dexing mining area in northeast Jiangxi Province, China. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s. l.], vol. 167, p. 76–82, Jan. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.001>.

MAGNUSSON, WILLIAM E.; LIMA, ALBERTINA P.; LUIZÃO, REGINA; LUIZÃO, FLÁVIO; COSTA, FLÁVIA R. C.; CASTILHO, CAROLINA VOLKMER DE; KINUPP, V. F. RAPELD: a modification of the Gentry method for biodiversity surveys in long-term ecological research sites. **Biota Neotropica**, [s. l.], vol. 5, p. 19–24, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032005000300002>.

MARY DA SILVA, MARILIA. Estudo geológico-geotécnico de uma encosta com problemas de instabilidade no Município de Camaragibe - PE. 2007.

MAZUREK, RYSZARD; KOWALSKA, JOANNA; GAŚIOREK, MICHAŁ; ZADROŻNY, PAWEŁ; JÓZEFOWSKA, AGNIESZKA; ZALESKI, TOMASZ; KĘPKA, WOJCIECH; TYMCZUK, MARYLA; ORŁOWSKA, KALINA. Assessment of heavy metals contamination in surface layers of Roztocze National Park forest soils (SE Poland) by indices of pollution. **Chemosphere**, [s. l.], vol. 168, p. 839–850, 1 Feb. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.126>.

MELO, V. F.; NOVAIS, R. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONTES, M. P. F.; SINGH, B. Mineralogia das frações areia, silte e argila de sedimentos do grupo barreiras no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], vol. 26, no. 1, p. 29–41, Mar. 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000100004>.

MELO, VANDER FREITAS; BUSCHLE, BRENDA; SOUZA, LUIZ CLÁUDIO PAULA; BONFLEUR, ELOANA JANICE. Reference values for potentially harmful elements in soils from Atlantic Rainforest, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, [s. l.], vol. 181, p. 138–147, Oct. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.07.009>.

NAKAZATO, RICARDO KEIICHI; LOURENÇO, ISABELA S.; ESPOSITO, MARISIA P.; LIMA, MARCOS E. L.; FERREIRA, MAURICIO L.; CAMPOS, RAFAELA DE O. A.; RINALDI, MIRIAN C. S.; DOMINGOS, MARISA. Trace metals at the tree-litter-soil-interface in Brazilian Atlantic Forest plots surrounded by sources of air pollution. **Environmental Pollution**, [s. l.], vol. 268, p. 115797, 1 Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115797>.

NASCIMENTO, LADIVANIA MEDEIROS DO; AGUIAR, MARIA MANUELA BANDEIRA DE; RODRIGUES, LÚCIA DOS SANTOS; FRANÇA, PEDRO HENRIQUE TAVARES DE; CHAGAS, MARCOS ANTÔNIO DAS; MELO, VITÓRIA LARISSA MOREIRA; LINS-E-SILVA, ANA CAROLINA BORGES. Floristic diversity of an urban protected area of Atlantic Forest in Northeast Brazil: Dois Irmãos State Park, Pernambuco. **Rodriguésia**, [s. l.], vol. 75, p. e00072022, 2024. <https://doi.org/10.1590/2175-7860202475075>.

NEGRA, CHRISTINE; ROSS, DONALD S.; LANZIROTTI, ANTONIO. Soil Manganese Oxides and Trace Metals. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], vol. 69, no. 2, p. 353–361, 2005. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0353>.

NUNES, F. C. Grupo Barreiras: características, gênese e evidências de neotectonismo. 2011.

OKSANEN J, SIMPSON G, BLANCHET F, KINDT R, LEGENDRE P, MINCHIN P, O'HARA R, SOLYMOS P, STEVENS M, SZOEC S, WAGNER H, BARBOUR M, BEDWARD M, BOLKER B, BORCARD D, CARVALHO G, CHIRICO M, DE CACERES M, DURAND S, EVANGELISTA H, FITZJOHN R, FRIENDLY M, FURNEAUX B, HANNIGAN G, HILL M, LAHTI L, MCGLINN D, OUELLETTE M, RIBEIRO CUNHA E, SMITH T, STIER A, TER BRAAK C, WEEDON J (2024). `_vegan: Community Ecology Package_`. R package version 2.6-8, <<https://CRAN.R-project.org/package=vegan>>.

PAYE, HENRIQUE DE SÁ; MELLO, JAIME WILSON VARGAS DE; ABRAHÃO, WALTER ANTÔNIO PEREIRA; FERNANDES FILHO, ELPÍDIO INÁCIO; DIAS, LÍVIA CRISTINA PINTO; CASTRO, MARIA LUISA OLIVEIRA; MELO, STEFESON BEZERRA DE; FRANÇA, MICHELE MILANEZ. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], vol. 34, p. 2041–2051, Dec. 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000600028>.

PEREZ, MARY ÂNGELA FÁVARO. VALIDAÇÃO DE MÉTODOS ANALÍTICOS: COMO FAZER? POR QUE ELA É IMPORTANTE? **Boletim de tecnologia e desenvolvimento de embalagens**, [s. l.], vol. 22, 2010. .

PRAVEEN, R.; NAGALAKSHMI, R. Review on bioremediation and phytoremediation techniques of heavy metals in contaminated soil from dump site. **Materials Today: Proceedings**, International Conference on Advanced Materials and Modern Manufacturing (ICAMMM 2022). [s. l.], vol. 68, p. 1562–1567, 1 Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.190>.

PRESTON, WELKA; NASCIMENTO, CLISTENES WILLIAMS ARAÚJO DO; BIONDI, CAROLINE MIRANDA; SOUZA JUNIOR, VALDOMIRO SEVERINO DE; SILVA, WILLIAM RAMOS DA; FERREIRA, HAILSON ALVES. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], vol. 38, p. 1028–1037, Jun. 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300035>.

PREZOTTI, LUIS CARLOS. **Guia de interpretação de análise de solo**. [S. l.]: Incaper, 2013.

R Core Team (2024). *\_R: A Language and Environment for Statistical Computing\_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

RAVANSARI, ROOZBEH; WILSON, SUSAN C.; TIGHE, MATTHEW. Portable X-ray fluorescence for environmental assessment of soils: Not just a point and shoot method. **Environment International**, [s. l.], vol. 134, p. 105250, 1 Jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105250>.

REZENDE, C.L.; SCARANO, F.R.; ASSAD, E.D.; JOLY, C.A.; METZGER, J.P.; STRASSBURG, B.B.N.; TABARELLI, M.; FONSECA, G.A.; MITTERMEIER, R.A. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, [s. l.], vol. 16, no. 4, p. 208–214, Oct. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.10.002>.

ROSA, CLARISSA; BACCARO, FABRICIO; CRONEMBERGER, CECILIA; HIPÓLITO, JULIANA; BARROS, CLAUDIA FRANCA; RODRIGUES, DOMINGOS DE JESUS; NECKEL-OLIVEIRA, SELVINO; OVERBECK, GERHARD E.; DRECHSLER-SANTOS, ELISANDRO RICARDO; ANJOS, MARCELO RODRIGUES DOS; FERREGUETTI, ÁTILLA C.; AKAMA, ALBERTO; MARTINS, MARLÚCIA BONIFÁCIO; TOMAS, WALFRIDO MORAES; SANTOS, SANDRA APARECIDA; FERREIRA, VANDA LÚCIA; CUNHA, CATIA NUNES DA; PENHA, JERRY; PINHO, JOÃO BATISTA DE; SALIS, SUZANA MARIA; DORIA, CAROLINA RODRIGUES DA COSTA; PILLAR, VALÉRIO D.; PODGAISKI, LUCIANA R.; MENIN, MARCELO; BÍGIO, NARCÍSIO COSTA; ARAGÓN, SUSAN; MANZATTO, ANGELO GILBERTO; VÉLEZ-MARTIN, EDUARDO; SILVA, ANA CAROLINA BORGES LINS E; IZZO, THIAGO JUNQUEIRA; MORTATI, AMANDA FREDERICO; GIACOMIN, LEANDRO LACERDA; ALMEIDA, THAÍ S ELIAS; ANDRÉ, THIAGO; SILVEIRA, MARIA AUREA PINHEIRO DE ALMEIDA; SILVEIRA, ANTÔNIO LAFFAYETE PIRES DA; MESSIAS, MARILUCE REZENDE; MARQUES, MARCIA C.M.; PADIAL, ANDRE ANDRIAN; MARQUES, RENATO; BITAR, YOUSZEF O.C.; SILVEIRA, MARCOS; MORATO, ELDER FERREIRA; PAGOTTO, RUBIANI DE CÁSSIA; STRUSSMANN, CHRISTINE; MACHADO, RICARDO BOMFIM; AGUIAR, LUDMILLA MOURA DE SOUZA; FERNANDES, GERALDO WILSON; OKI, YUMI; NOVAIS, SAMUEL; FERREIRA, GUILHERME BRAGA; BARBOSA, FLÁVIA RODRIGUES; OCHOA, ANA C.; MANGIONE, ANTONIO M.; GATICA, AILIN; CARRIZO, MARÍA CELINA; RETTA, LUCÍA MARTINEZ; JOFRÉ, LAURA E.; CASTILLO, LUCIANA L.; NEME, ANDREA M.; RUEDA, CARLA; TOLEDO, JOSÉ JULIO DE; GRELE, CARLOS EDUARDO VIVEIROS; VALE, MARIANA M.; VIEIRA, MARCUS VINICIUS; CERQUEIRA, RUI; HIGASHIKAWA, EMÍLIO MANABU; MENDONÇA, FERNANDO PEREIRA DE; GUERREIRO, QUÊZIA LEANDRO DE MOURA; BANHOS, AUREO; HERO, JEAN-MARC; KOBLITZ, RODRIGO; COLLEVATTI, ROSANE GARCIA; SILVEIRA, LUÍS FÁBIO; VASCONCELOS, HERALDO L.; VIEIRA, CECÍLIA RODRIGUES; COLLI, GUARINO RINALDI; CECHIN, SONIA ZANINI; SANTOS, TIAGO GOMES DOS; FONTANA, CARLA S.; JARENKOW, JOÃO A.; MALABARBA, LUIZ R.; RUEDA, MARTA P.; ARAUJO, PUBLIO A.; PALOMO, LUCAS; ITURRE, MARTA C.; BERGALLO, HELENA GODOY; MAGNUSSON, WILLIAM E. The Program for Biodiversity Research in Brazil: The role of regional networks for biodiversity knowledge, dissemination, and conservation. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [s. l.], vol. 93, no. 2, p. e20201604, 2021. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120201604>.

SANTOS, PATRÍCIA MARQUES; BOHRER, CLAUDIO BELMONTE DE ATHAYDE; NASCIMENTO, MARCELO TRINDADE. Impactos das mudanças de uso e cobertura da terra em fitofisionomias da Mata Atlântica. **Ambiente & Sociedade**, [s. l.], vol. 27, p. e01701, 22 Apr. 2024. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0170vu27L1AO>.

SILVA, SÉRGIO HENRIQUE GODINHO; RIBEIRO, BRUNO TEIXEIRA; GUERRA, MARCELO BRAGA BUENO; DE CARVALHO, HUDSON WALLACE PEREIRA; LOPES, GUILHERME; CARVALHO, GEILA SANTOS; GUILHERME, LUIZ ROBERTO GUIMARÃES; RESENDE, MAURO; MANCINI, MARCELO; CURI, NILTON; RAFAEL, ROGERIO BORGUETE ALVES; CARDELLI, VALERIA; COCCO, STEFANIA; CORTI, GIUSEPPE; CHAKRABORTY, SOMSUBHRA; LI, BIN; WEINDORF, DAVID C. Chapter One - pXRF in tropical soils: Methodology, applications, achievements and challenges. *In*: SPARKS, Donald L. (ed.). **Advances in Agronomy**. [S. l.]: Academic Press, 2021. vol. 167, p. 1–62. DOI 10.1016/bs.agron.2020.12.001. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S006521132030105X>. Accessed on: 9 Apr. 2025.

TANG, JIAYI; ZHANG, JIACHAO; REN, LIHENG; ZHOU, YAOYU; GAO, JUN; LUO, LIN; YANG, YUAN; PENG, QINGHUI; HUANG, HONGLI; CHEN, ANWEI. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], vol. 242, p. 121–130, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.061>.

TEIXEIRA, PAULO CÉSAR; DONAGEMMA, GUILHERME KANGUSSU; FONTANA, ADEMIR; TEIXEIRA, WENCESLAU GERALDES. **Manual de métodos de análise de solos**. [S. l.]: Embrapa, 2017.

VASCONCELLOS, THAÍS JORGE DE; MOREIRA, NATTACHA DOS SANTOS; SANTOS, RAMON SILVA DOS; ANJOS, MARCELINO JOSÉ DOS; CALLADO, CÁTIA HENRIQUES. CHEMICAL ELEMENTS ANALYSIS OF THE SOIL AT AN URBANIZATION GRADIENT IN THE ATLANTIC FOREST. **Revista Árvore**, [s. l.], vol. 45, p. e4504, 19 Apr. 2021. <https://doi.org/10.1590/1806-9088202100000004>.

WANG, ZHIHUI; ZHAO, LIANJUN; BAI, YI; LI, FEI; HOU, JIANFENG; LI, XUQING; JIANG, YURUI; DENG, YUYUE; ZHENG, BINGQIAN; YANG, WANQIN. Changes in plant debris and carbon stocks across a subalpine forest successional series. **Forest Ecosystems**, [s. l.], vol. 8, no. 1, p. 40, 8 Jul. 2021. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00320-0>.

WEI TAIYUN AND VILIAM SIMKO (2024). R package 'corrplot': Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.95). Available from <https://github.com/taiyun/corrplot>

WICKHAM. H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York, 2016.

YANG, QINGCHUN; ZHANG, LIANGMIAO; WANG, HUALIN; MARTÍN, JORDI DELGADO. Bioavailability and health risk of toxic heavy metals (As, Hg, Pb and Cd) in urban soils: A Monte Carlo simulation approach. **Environmental Research**, [s. l.], vol. 214, p. 113772, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113772>.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos acerca da preservação do meio ambiente são de extrema importância para a preservação dos ecossistemas terrestres. Foi possível identificar que a Amazônia e a Mata Atlântica foram os biomas brasileiros mais estudados. E os metais pesados mais estudados foram o Cu, Mn e Zn, sendo necessária uma maior investigação atrelada aos elementos considerados poluentes.

Vale a pena salientar, inclusive, que os teores ambientalmente disponíveis do local estudado foram considerados baixos, remetendo uma boa conservação da área em relação aos metais pesados estudados. Houve diferenças entre estágios sucessionais, o que demonstra que os inputs desses metais pesados podem ocorrer por proximidade ao centro urbano ou pelo seu material de origem.

Além disso, a metodologia abordada ao utilizar o aparelho de fluorescência portátil não foi satisfatória pois o solo do PEDI continha baixos teores de metais, não possibilitando sua análise, sendo necessário outras metodologias para obtenção dos teores totais.

O trabalho em questão tem potencial para contribuir com políticas públicas pensadas para uma melhor conservação do local estudado, justamente por ser um valor de *background* temporal. E por ser o pioneiro a avaliar metais pesados nos sítios monitorados pelo Programa de Pesquisa em Biodiversidade (PPBio).