

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**AMANDA GASPARIN**

**CONTAMINAÇÃO DE SOLOS POR COBRE NO BRASIL: REVISÃO SOBRE  
FONTES, RISCOS ECOLÓGICOS E MITIGAÇÃO**

**MEDIANEIRA**

**2023**

**AMANDA GASPARIN**

**CONTAMINAÇÃO DE SOLOS POR COBRE NO BRASIL: REVISÃO SOBRE  
FONTES, RISCOS ECOLÓGICOS E MITIGAÇÃO**

**Soil contamination by copper in Brazil: review on sources, ecological risks and  
mitigation**

Dissertação apresentada como requisito para  
obtenção do título de Mestre em Tecnologias  
Ambientais da Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná (UTFPR).

Orientador: Giovana Clarice Poggere

Coorientador: Julierme Zimmer Barbosa

**MEDIANEIRA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

# FOLHA DE APROVAÇÃO



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Medianeira



AMANDA GASPARIN

## CONTAMINAÇÃO DE SOLOS POR COBRE NO BRASIL: REVISÃO SOBRE FONTES, RISCOS ECOLÓGICOS E MITIGAÇÃO

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Tecnologias Ambientais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Tecnologias Ambientais.

Data de aprovação: 28 de Fevereiro de 2023

Dra. Giovana Clarice Poggere, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Alessandra Furtado Da Silva, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Fabio Orssatto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Francielle Roberta Dias De Lima, Doutorado - Universidade Federal de Lavras (Ufla)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 01/03/2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Fazer um mestrado sempre foi meu sonho. Os próximos parágrafos expressam parte da minha gratidão aos que de alguma forma contribuíram para que este sonho se tornasse realidade.

Agradeço a Deus por ter me guiado desde o início até a conclusão deste trabalho. Nos momentos bons e nos ruins pude sentir sua presença.

Aos professores da UTFPR campus Medianeira que fizeram parte desta caminhada, em especial ao meu coorientador, o Prof. Dr. Julierme Zimmer Barbosa pelo auxílio e a minha orientadora, Prof<sup>ª</sup>. Dra. Giovana Clarice Poggere, que desde o TCC veio me orientando com paciência, amor e maestria, fazendo com que eu me apaixonasse ainda mais pela área de solos.

Agradeço a instituição UTFPR campus Medianeira por todo o conhecimento repassado, qualidade de ensino e suporte durante o curso e realização da pesquisa.

Aos colegas de turma que sempre foram ponto de apoio, seja na realização de atividades em dupla ou em grupo, até para momentos de desabafos e descontração durante todo o período.

Deixo registrado também minha gratidão a minha família e amigos, pelo apoio e compreensão em todos os momentos, o que tornou a caminhada rumo a superação deste grande desafio ainda mais feliz.

Enfim, meu muito obrigado a todos os envolvidos, aos que foram citados e aos que por ventura não foram. Todos estão guardados em meu coração e pensamento e serão sempre lembrados com muito carinho e gratidão.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Uma existência sem sonhos é uma semente sem solo, uma planta sem nutrientes. Os sonhos não determinam que tipo de árvore você será, mas dão forças para você entender que não há crescimento sem tempestades, períodos de dificuldades e incompreensão. Brinquem mais, sorriam mais, imaginem mais. Lambuzem-se com a terra dos seus sonhos. Sem terra a semente não germina.  
(AUGUSTO CURY, 2021).

## RESUMO

O cobre (Cu) é um elemento encontrado naturalmente nos solos e sua disponibilidade e presença estão relacionadas ao grau de intemperismo do solo e de seu material de origem. Contudo, o excesso de Cu pode causar contaminação, prejudicando a qualidade do solo e o desenvolvimento de organismos vivos. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a contaminação de solos por cobre no Brasil através de revisão bibliométrica relacionada às principais fontes, e revisão sistemática abordando os teores, fontes de contaminação, riscos ecológicos decorrentes e as estratégias de mitigação. Para a realização da revisão sistemática, foram selecionadas 46 publicações da base de dados *Web of Science* e foram coletadas informações referentes a fonte e grau de contaminação por Cu. A partir dos dados coletados foi possível determinar o índice de geoacumulação (Igeo) e análise de regressão entre os teores de Cu e tempo de uso, profundidade do solo e teor de carbono orgânico. Como resultado da revisão bibliométrica, a temática “Ciência do meio ambiente” esteve relacionada as principais atividades ligadas à contaminação por Cu em solos, sendo que a produção científica no Brasil esteve concentrada principalmente na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com 44 artigos publicados, seguida da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com 27. A contaminação por Cu em solos derivada de atividades de mineração e cultivo de videiras obtiveram as maiores médias de produção científica anual, com 2,8 e 2,1 artigos publicados entre os anos de 2003 à 2021 e 2007 à 2023, respectivamente. Em relação à revisão sistemática, os resultados apontaram que os principais estudos sobre a contaminação do solo por Cu estão relacionados com a aplicação de fungicida cúprico (cultivo de videira) e dejetos suínos, no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Os maiores valores médios de teor total de Cu e Igeo em solo são provenientes de rejeito de mineração de Cu. O Igeo de solos com rejeito de partículas de tinta anti-incrustante se destaca pelo elevado potencial de contaminação. A principal consequência da contaminação por Cu é o efeito negativo em organismos edáficos e aquáticos. Segundo dados da literatura, para a remediação de solos contaminados com Cu no Brasil, as espécies vegetais capazes de promover o acúmulo de Cu em sistema radicular e parte aérea são *Bidens pilosa*, *Mucuna cinereum*, *Mucuna aterrina*, *Canavalia ensiformis* e *Avena sativa* associadas ou não a condicionantes e fertilizantes.

Palavras-chave: contaminação por Cu; índice de geoacumulação; fitorremediação.

## ABSTRACT

Copper (Cu) is an element found naturally in soils, and its availability and presence are related to the degree of weathering of the soil and its parent material. However, excess Cu can cause contamination, impairing soil quality and the development of living organisms. In this context, this work aims to evaluate soil contamination by copper in Brazil through a bibliometric review related to the main sources and a systematic review addressing the levels, sources of contamination, resulting ecological risks and mitigation strategies. Forty-six publications from the scientific database *Web of Science* were selected through the systematic review, and information regarding the source and degree of contamination by Cu was collected. From the collected data it was possible to determine the geoaccumulation index (Igeo) and regression analysis between Cu contents and time of use, soil depth and organic carbon content. As a result of the bibliometric review, the theme "Science of the environment" was related to the main activities related to contamination by Cu in soils. Scientific production in Brazil was mainly concentrated at the Federal University of Santa Maria (UFSM), with 44 articles published, followed by the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), with 27. Cu contamination in soils derived from mining activities and vine cultivation obtained the highest averages of annual scientific production, with 2.8 and 2.1 articles published between 2003 to 2021 and 2007 to 2023, respectively. Regarding the systematic review, the results showed that the main studies on soil contamination by Cu are related to areas of grapevine cultivation with the application of cupric fungicide and arable areas with the application of swine manure, in Rio Grande do Sul and Santa Catarina. The highest average values of total Cu and Igeo content in the soil come from Cu mining tailings. The Igeo of soils with rejects of antifouling paint particles stands out due to its high contamination potential. The main consequence of Cu contamination is the negative effect on edaphic and aquatic organisms. According to data from the literature, the use of plant species such as *Bidens pilosa*, *Mucuna cinereum*, *Mucuna aterrina*, *Canavalia ensiformis*, and *Avena sativa* for the remediation of soils contaminated with Cu in Brazil. These plants may be associated or not with conditioners and fertilizers, with emphasis on the inoculation of fungi arbuscular mycorrhizae, capable of promoting Cu accumulation in the root system and aerial part.

Keywords: systematic review; Cu contamination; geoaccumulation index; phytoremediation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema das etapas e das principais informações extraídas a partir da pesquisa na literatura na plataforma <i>Web of Science</i> .....	24
Figura 2 – Número de trabalhos vinculados aos temas referentes as atividades relacionadas a contaminação por Cu em solos obtidos pela plataforma <i>Web of Science</i> .....	30
Figura 3 – Número de trabalhos vinculados aos temas referentes a contaminação por Cu em área de vinhedo e pomares obtidos pela plataforma <i>Web of Science</i> .....	31
Figura 4 – Número de trabalhos vinculados aos temas referentes a remediação e riscos ecológicos da contaminação por Cu em solos obtidos pela plataforma <i>Web of Science</i> .....	31
Figura 5 – Número e ano de publicação de artigos referentes a contaminação de solos por Cu por resíduos sólidos e mineração obtidos pela plataforma <i>Web of Science</i> .....	34
Figura 6 – Número e ano de publicação de artigos referentes a contaminação de solos por Cu por lodo e chorume obtidos pela plataforma <i>Web of Science</i> .....	34
Figura 7 – Número e ano de publicação de artigos referentes a contaminação de solos por Cu por vinhedo, pomar, solo urbano e esterco, obtidos pela plataforma <i>Web of Science</i> .....	35
Figura 8 – Número e ano de publicação de artigos referentes a remediação e risco ecológico do Cu em solos, obtidos pela plataforma <i>Web of Science</i> .....	36
Figura 9 – Locais avaliados nas 46 publicações utilizadas na revisão sistemática sobre contaminação de cobre (Cu) nos solos brasileiros .....	37
Figura 10 – Box-plot do teor total de cobre (Cu; a) e índice de geoacumulação (Igeo; b) em solos afetados por diferentes fontes de contaminação no Brasil. Linha e linha tracejada indicam mediana e média, respectivamente .....	41
Figura 11 – Teor total e disponível (EDTA; ácido etilenodiamino tetra-acético) de cobre (Cu) no solo em função do tempo de cultivo de videira (a), macieira e mangueira (b) com aplicação de fungicidas cúpricos no Brasil.....	43
Figura 12 – Teor total de cobre (Cu) em solos brasileiros não-contaminados (referência) e contaminados por fungicida cúprico e resíduo orgânico em função da profundidade do solo.....	43
Figura 13 – Teor de cobre (Cu) no solo usando solução extratora de EDTA (ácido etilenodiamino tetra-acético) e CaCl <sub>2</sub> em função do teor de carbono orgânico em áreas contaminadas com fungicida cúprico (a) e resíduo orgânico (b) no Brasil .....	44
Figura 14 – Modelo esquemático sobre os riscos ecológicos associados a contaminação com cobre (Cu) no solo que têm sido estudados no Brasil .....	46



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de artigos retornados a partir de palavras-chave utilizadas na busca por artigos de contaminação por Cu em solos na plataforma <i>Web of Science</i> .....	29
Tabela 2 – Instituições brasileiras e número de publicações referentes a atividades antrópicas relacionadas a contaminação por Cu em solos obtidos pela plataforma <i>Web of Science</i> .....	32
Tabela 3 – Número de publicações de acordo com grupos e subgrupos de fontes de contaminação de Cu nos solos brasileiros .....	38
Tabela 4 – Variação do teor de cobre (Cu) e índice de geoacumulação (Igeo) em solos afetados por rejeitos de mineração no Brasil .....	41
Tabela 5 – Valores médio, máximo e mínimo do teor de cobre (Cu) na camada superficial (0-20 cm) em solos com viticultura nos estados de Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS), Brasil .....	42
Tabela 6 – Teores médios de cobre (Cu) no solo, raiz e parte aérea das plantas, índice de translocação (IT) e estratégias para mitigação da contaminação do solo no Brasil.....	49

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1 Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1 Cobre no solo: teores naturais e fontes de contaminação</b> .....	<b>15</b>
<b>3.2 Riscos ecológicos da contaminação do solo por cobre</b> .....	<b>18</b>
<b>3.3 Estratégias de mitigação da contaminação por cobre em solos</b> .....	<b>20</b>
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
<b>4.1 Pesquisa na literatura e extração dos dados</b> .....	<b>24</b>
4.1.2 Etapa 1: Revisão bibliométrica .....	25
4.1.3 Etapa 2: Revisão sistemática de dados.....	25
4.1.4 Etapa 3: Riscos ecológicos e mitigação .....	27
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>29</b>
<b>5.1 Etapa 1: Revisão Bibliométrica</b> .....	<b>29</b>
<b>5.2 Etapa 2: Revisão sistemática</b> .....	<b>36</b>
5.2.1 Teor de Cu e Igeo em solos de acordo com a fonte de contaminação .....	40
<b>5.3 Etapa 3: Riscos ecológicos e mitigação da contaminação por cobre em solos</b> .....	<b>46</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>52</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O cobre (Cu) é um elemento encontrado naturalmente nos solos e sua disponibilidade e presença estão relacionadas a fatores pedogenéticos como o grau de intemperismo do solo e seu material de origem. Contaminações ocorrem quando as concentrações extrapolam o teor natural suportável, prejudicando o desenvolvimento de organismos vivos e a funcionalidade do solo.

O acúmulo de Cu em solo está diretamente ligado a atividades antrópicas. Maiores concentrações de Cu podem ser encontradas em áreas com aplicação de fungicida cúprico, principalmente em cultivo de videiras, áreas com aplicação de resíduo orgânico, resíduos provenientes de atividade de mineração e áreas de disposição de resíduos sólidos. Contaminações também podem derivar de material particulado e partículas de tinta anti-incrustante.

Tendo em vista as diversas fontes de contaminação por Cu em solos é importante conhecer de forma detalhada o potencial contaminante de cada uma das principais fontes antrópicas desse elemento. Também é necessário estabelecer o nível de entendimento com relação aos possíveis riscos para o ecossistema e as medidas propostas para mitigar a contaminação dos solos por Cu. Segundo a literatura, a utilização de plantas resistentes a Cu, com ou sem a adição de condicionantes ou fertilizantes, vem se tornando uma estratégia interessante e eficaz na remediação de solos contaminados, tendo destaque a associação com fungos micorrízicos arbusculares.

Embora a contaminação de solos brasileiros com Cu vem recebendo maior atenção nos últimos anos, são escassos estudos que contemplem essas informações de forma detalhada e com abrangência nacional. Assim, este trabalho concentra-se na sistematização de dados relacionados aos riscos ecológicos e estratégias de mitigação da contaminação de Cu em solos brasileiros, com o objetivo de estabelecer o estado atual do conhecimento e contribuir com a indicação de lacunas na pesquisa para direcionar ações futuras.

## **2 OBJETIVO GERAL**

Avaliar a contaminação de solos por cobre no Brasil através de revisão sistemática.

### **2.1 Objetivos Específicos**

Realizar análise bibliométrica sobre contaminação por cobre em solos no Brasil.

Identificar as fontes e o grau de contaminação por cobre em solos brasileiros a partir de dados da literatura.

Identificar os riscos ecológicos e as estratégias de mitigação da contaminação por cobre em solos brasileiros a partir de dados da literatura.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Cobre no solo: teores naturais e fontes de contaminação

O cobre (Cu) é um elemento essencial para os organismos vivos (FESTA, THIELE, 2011). A principal fonte natural de Cu para as plantas e diversos outros organismos é o solo, que por sua vez varia de acordo com o material de origem. Solos originários de material sedimentar tendem a ter concentrações médias de Cu de aproximadamente  $2 \text{ mg kg}^{-1}$ , enquanto que solos de origem basáltica possuem teores médios naturais em torno de  $150 \text{ mg kg}^{-1}$  (HUGEN *et al.*, 2013; OLIVEIRA, COSTA, 2004). No Brasil, concentrações de Cu total no solo de até  $60 \text{ mg kg}^{-1}$  estão dentro do valor de prevenção, sem a necessidade de intervenção, de acordo com os critérios e valores orientados para a qualidade de solos brasileiros (CONAMA 420/09).

Com relação à dinâmica no solo, o Cu é um elemento considerado pouco móvel, pois tende a se acumular na camada superficial devido a sua adsorção específica com componentes da fração mineral e orgânica do solo (KABATA-PENDIAS, 2015). Em consequência desse acúmulo preferencial, vem sendo reportada a contaminação do solo com Cu a partir de diversas fontes, como atividades relacionadas à mineração, material particulado, chapa metálica, aplicação de fungicidas em plantas e aplicação de resíduos orgânicos em solos (LIMA, 1994; CASSELLA *et al.*, 2007; COUTO *et al.*, 2015; COUTO *et al.*, 2016; BARBOSA *et al.*, 2020; COELHO *et al.*, 2020a; PENTEADO *et al.*, 2021).

Globalmente, uma das situações mais emblemáticas de contaminação do solo com Cu são as áreas com o cultivo de frutíferas, onde ocorre a aplicação de fungicidas cúpricos, sobretudo a calda bordalesa. O acúmulo de Cu no solo nessas áreas se deve ao longo período de uso, uma vez que se tem registro do uso do Cu no controle de doenças desde 1850 (FISHEL, 2021). Na Europa, Ballabio *et al.* (2018) observaram teores de Cu total entre 0 e  $496 \text{ mg kg}^{-1}$  na camada superficial de solos, sendo que o maior teor médio foi observado em áreas de viticultura ( $49 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Roviello *et al.* (2021), ao analisarem uma área de cultivo de videira com 50 anos, no sul da Itália, constataram a presença de elevado teor de Cu ( $180 \text{ mg kg}^{-1}$ ), de quatro a seis vezes maior que os valores encontrados em solo referência sem cultivo de videiras. No Brasil, Mirlean *et al.* (2007) encontraram elevados teores de Cu total ( $2197 \text{ mg kg}^{-1}$ )

em áreas de viticultura no sul do país. Em estudo realizado por Hummes *et al.* (2019), em área de vinhedo em atividade desde 1890, no município de Pinto Bandeira, Rio Grande do Sul, as concentrações de Cu no solo na fração disponível atingiram 1100 mg kg<sup>-1</sup>.

As atividades de mineração também têm um grande potencial de contaminar solos adjacentes ou que recebem os resíduos desta atividade. Em alguns casos, como os que têm sido registrados no Chile (VERDEJO *et al.*, 2015), no Brasil (NIEMEYER *et al.*, 2012), na Austrália (NIROLA *et al.*, 2016) e na China (LI *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2020), solos afetados pela mineração podem apresentar teores de Cu maiores que 1000 mg kg<sup>-1</sup>. O grande impacto ambiental de áreas de mina sobre o solo está ligado a transferência de metais pesados por intemperismo químico e processos erosivos de estêreis expostos a céu aberto (PERLATTI *et al.*, 2021).

No Brasil, em experimento realizado por Perlatti *et al.* (2021), em área de mina de Cu abandonada no Ceará, foi avaliado o potencial de transferência de Cu de rochas para dois tipos de solo. Os resultados apontaram que mesmo após 30 anos da desativação da mina e consequente exposição e intemperismo, os estêreis concentravam elevados teores de Cu, variando entre 7.782 e 8.717 mg kg<sup>-1</sup>. O experimento durou três meses e a exposição de estêreis contaminados com solos não contaminados foi responsável por aumentar os teores de Cu nos solos. No solo de textura mais arenosa, a concentração de Cu total aumentou em 21% do início ao final do experimento (36 mg kg<sup>-1</sup> – 44 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente), enquanto que este aumento foi de 39% no solo de textura mais argilosa (41 mg kg<sup>-1</sup> – 57 mg kg<sup>-1</sup>). O solo argiloso acumulou mais Cu, já que solos com maior teor de fração argila tendem a apresentar uma capacidade mais alta de retenção de Cu, pela afinidade deste metal com grupos funcionais de constituintes orgânicos. O acúmulo em solo argiloso foi menor, já que naturalmente estes tipos de solo possuem baixos teores de Cu (BRUNETTO *et al.*, 2018).

A disposição de resíduos orgânicos, como esterco animal ao solo, sem manejo, é capaz de gerar contaminação por Cu, assim como a disposição de resíduos sólidos ao solo. Em pesquisa realizada por Kebron *et al.* (2020), nos Estados Unidos, a presença de esterco de galinha em dosagens menores ou iguais a 5 mg kg<sup>-1</sup>, contribuiu para o acréscimo de Cu no solo avaliado e prejudicou o crescimento radicular e o desenvolvimento de plantas de mostarda.

No Brasil, em experimento realizado por Furtado e Silva *et al.* (2017), em área de cultivo no município de Campos Novos, Santa Catarina, foram aplicadas três doses de esterco suíno (25, 50 e 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>). As aplicações aumentaram os teores de Cu principalmente na superfície dos solos (0 – 25 cm), tendo como destaque a aplicação de 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, que apresentou resultado de teor de Cu no solo igual a 155 mg kg<sup>-1</sup>, teor este bem elevado quando comparado ao teor em solo sem aplicação de esterco (54 mg kg<sup>-1</sup>). Os autores explicam que este aumento no teor de Cu está relacionado a ração utilizada para o trato dos animais. Ao analisar a ração, os autores apontaram a presença pronunciada de metais, dentre eles o Cu, com teor igual a 24 mg kg<sup>-1</sup>. Corrobora trabalho realizado por Milhome *et al.* (2018).

Em estudo realizado por Somani *et al.* (2020), amostra de material semelhante a solo coletado de área de lixão de Kadapa, Índia, com 49 anos de funcionamento, apontou valores totais de Cu referentes a 327 – 343 mg kg<sup>-1</sup>, valores estes muito elevados quando comparados a áreas locais próximas ao lixão, utilizadas como áreas de referência, com concentração de Cu total referentes a 19 – 20 mg kg<sup>-1</sup>. Amphalop *et al.* (2020), encontraram elevados níveis de Cu (380; 339 e 251 mg kg<sup>-1</sup>) ao analisarem três áreas de separação de lixo eletrônico, na Tailândia. No Brasil, em área de aterro controlado no município de Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, a concentração de Cu na camada de 0 – 20 cm na posição de jusante foi de 49 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto que de 20 – 40 cm, foi igual a 611 mg kg<sup>-1</sup>, valores estes considerados altos (MARQUES *et al.*, 2021).

A contaminação de solos por Cu ainda está relacionada a material particulado, chapa metálica e partículas de tinta anti-incrustante. No Brasil, em estudo realizado por Pereira, Borges, Leandro (2010), foram coletadas amostras de solo próximas a duas rodovias e uma área testemunha sem fluxo de veículos no estado de Goiás. Os resultados apontaram que em áreas próximas a rodovia o teor de Cu foi maior (1,0 e 0,6 mg dm<sup>3</sup>) quando comparado a área referência (0,1 mg dm<sup>3</sup>), respectivamente). Corrobora trabalho realizado por Penteado *et al.*, 2021, onde material particulado de fontes urbanas e industriais aumentaram os teores de Cu em solos de parques no Rio Grande do Sul.

Amostras de solo de cinco áreas de pátio de sucata de automóveis em Curitiba e Minas Gerais foram avaliadas quanto a contaminação por metais pesados e os resultados apontaram para teores de Cu de até 170 mg kg<sup>-1</sup>, sendo o valor de referência equivalente a 27 mg kg<sup>-1</sup> (BARBOSA *et al.*, 2020). Corrobora trabalho

realizado por Lange *et al.* (2017), em que área de ferro-velho de veículos enriqueceu o solo com metais pesados, sendo um deles o Cu. Em solo contaminado por Cu em área de manutenção de barcos por partículas de tinta anti-incrustação, no Rio Grande do Sul, foi encontrado teor de Cu equivalente a 3916 mg kg<sup>-1</sup> (SOROLDONI *et al.*, 2021). Corrobora trabalho realizado por Chowdhury, Rasid (2021).

### **3.2 Riscos ecológicos da contaminação do solo por cobre**

Além do desbalanço nutricional, os solos contaminados com Cu podem apresentar diversos riscos ecológicos e à saúde humana. Por se acumular nas camadas mais superficiais do solo, o Cu pode influenciar na atividade de micro e macrorganismos, afetando as funções ecossistêmicas por eles desempenhadas (KUMAR *et al.*, 2021). Por processos erosivos, pode atingir corpos d'água e passar para a cadeia trófica ao ser incorporado nos tecidos de peixes e organismos aquáticos que são consumidos por outros organismos (LOUREIRO *et al.*, 2021; PERLATTI *et al.*, 2021). Em plantas alimentícias, estudos relatam a maior tendência de acúmulo do Cu nas raízes e frutos (NAPOLI *et al.*, 2019; COELHO *et al.*, 2020b; HOELTGEBAUM *et al.*, 2021), potencializando a ingestão e o acúmulo de Cu no organismo via alimentação. Como consequência tem-se relatado maior incidência de Alzheimer em pessoas que praticam uma dieta rica em Cu ou expostas a ambientes com altos teores de Cu por longos períodos (SHEN *et al.*, 2014; SQUITTI *et al.*, 2021; PATEL *et al.*, 2021).

A dinâmica urbana, pode levar à contaminação por Cu em corpos d'água, sendo que uma das possíveis fontes são os telhados cobertos com chapa de Cu. O longo tempo de exposição às condições climáticas de temperatura e precipitação bem como a proximidade de cursos d'água possibilita o acúmulo de Cu no sedimento dos riachos, assim como contaminação da água ao longo dos anos (WOJCIECHOWSKA *et al.* (2019).

No Brasil, Rodrigues *et al.* (2021) ao analisarem Arroio Moinho, microbacia urbana do município de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, obtiveram resultados elevados de teor de Cu nos sedimentos do rio (75; a 81 mg kg<sup>-1</sup>). Em área de mineração no Ceará, a drenagem de estéril de mina de Cu abandonada deságua no córrego Ubari, afluente do Rio Timonha. As maiores concentrações de Cu dissolvido foram encontradas nos locais de descarga (87 ug L<sup>-1</sup>), que durante o curso do córrego



apresentou diminuição (23; 26; 40; 16  $\mu\text{g L}^{-1}$ ). O estudo aponta para o enriquecimento de Cu na água após o ponto de descarga da mina e aumento do teor de Cu no ponto de descarga em macroinvertebrados avaliados, sugerindo a transferência de Cu do meio abiótico (sedimentos) para o biótico (PERLATTI *et al.*, 2021).

A aplicação de resíduos orgânicos e fungicidas cúpricos impactam no teor de Cu em solos, afetando o desenvolvimento de plantas e cultivares. Nos Estados Unidos, a fitotoxicidade de esterco de galinha foi avaliada em sementes de mostarda em experimento realizado por Kebron *et al.* (2020). A presença de Cu em concentrações abaixo de 5  $\text{mg kg}^{-1}$  já apresentou efeito fitotóxico no crescimento da radícula e germinação da semente de mostarda.

No Brasil, em estudo realizado por Hummes *et al.* (2019), foi analisada área de cultivo de videira em atividade desde 1890, em Pinto Bandeira, Rio Grande do Sul, com aplicação de fungicidas a base de Cu equivalente a 27  $\text{kg ha}^{-1}$ . O teor de Cu disponível em solo foi de 1133 – 1169  $\text{mg kg}^{-1}$ , considerado alto. A concentração de Cu nas videiras atingiu 12  $\text{mg kg}^{-1}$  nas raízes e 6800  $\text{mg kg}^{-1}$  nas folhas. A concentração de Cu em vinho produzido com cultivar de uva da área de vinhedo analisada apresentou teor de Cu equivalente a 0,78  $\text{mg L}^{-1}$ . Em função dos resultados obtidos, os autores concluíram que o acúmulo de Cu em solo, tecidos vegetais e produtos derivados da videira, em função de contínuas aplicações de fungicidas cúpricos nos níveis apontados por este estudo podem ser prejudiciais aos seres vivos.

Em contrapartida, mesmo em áreas com 50 anos de cultivo de uva e aplicação de fungicida cúprico, devido ao processo de maturação do vinho e mecanismo de precipitação de metais, o Cu pode ser encontrado em teores muito baixos e não prejudiciais à saúde humana (ROVIELLO *et al.*, 2021), o que não abona a necessidade de maior compreensão sobre a dinâmica no Cu nas videiras e seus respectivos produtos, em função do acúmulo no decorrer dos anos.

A presença de partículas de tinta anti-incrustante em pátios de manutenção de barcos é responsável pelo aumento do teor de Cu nos solos, afetando negativamente espécies menos tolerantes, como as minhocas (*Eisenia andrei*), causando diminuição da população, redução de biomassa e índice de reprodução (SOROLDONI *et al.*, 2020).

Em estudo realizado no Rio Grande do Sul, visando analisar a toxicidade de solos urbanos em relação a solos de áreas de proteção para a espécie de minhoca *Eisenia andrei*, os resultados apontaram que a concentração de Cu nos solos urbanos

ultrapassava os limites impostos pela legislação (88,91 e 126,81 mg kg<sup>-1</sup>, sendo 60 mg kg<sup>-1</sup> o valor referência) e para as minhocas expostas em solos urbanos (áreas industriais de refinaria de petróleo e outra entre uma refinaria de petróleo e uma indústria de fertilizantes) houve maior dano nos celomócitos quando em comparação às minhocas presentes nas áreas de proteção, representando uma sensibilidade destes organismos a concentrações elevadas de Cu e outros metais pesados (da Silva Júnior *et al.*, 2019).

Em estudo realizado em parques urbanos no Rio Grande do Sul, a presença de indústrias de petróleo e fertilizantes estão relacionadas a contaminação por Cu nestas áreas. Os resultados obtidos utilizando diferentes vias de exposição do solo (oral, dérmica e inalatória), apontou para resultados não cancerígenos para o Cu. Contudo, apontam para uma preocupação futura, com a continuação das atividades e consequente aumento dos teores do metal pesado, que assim, podem vir a causar problemas a saúde dos frequentadores dos parques (PENTEADO *et al.*, 2021).

### **3.3 Estratégias de mitigação da contaminação por cobre em solos**

A crescente demanda por alimentos, fibras, energias e produtos manufaturados, exerce pressão cada vez maior sobre os recursos naturais, aumentando os riscos ecológicos. Com isso, é essencial que se busque meios de produção que aliam técnicas com menor impacto sobre os recursos naturais. O Brasil, além de ocupar lugar de destaque mundial na produção agrícola, animal (FAOSTAT, 2019) e na extração de minério de ferro (USGS, 2021), se destaca no desenvolvimento de tecnologias para a intensificação sustentável dos sistemas produtivos, como na produção de etanol e geração de energia na indústria da cana de açúcar, coinoculação de bactérias na soja (BARBOSA *et al.*, 2020) e sistemas integrados de produção (COSTA *et al.*, 2018). Contudo, algumas situações ainda necessitam avançar para a diminuição de impactos, como a contaminação do solo por Cu em áreas urbanas e rurais.

A remediação de solos pode ser entendida como um processo de recuperação de áreas degradadas com a presença de contaminantes, que podem ser metais pesados. A utilização de plantas e microrganismos para fins de remediação de solo contaminado é um processo denominado biorremediação (PILON-SMITS, 2005).

Dentre as técnicas de biorremediação está a fitorremediação, que pode ser subdividida, de acordo com suas especificidades. A estabilização de contaminantes no solo pode ser chamada de fitoestabilização, processo no qual o contaminante fica imobilizado geralmente nas raízes da planta, evitando que este percole pelo solo, diminuindo a possibilidade de lixiviação em águas subterrâneas e acúmulo na biota. A remoção de contaminantes no solo é um processo denominado de fitoextração, no qual ocorre a absorção do contaminante pelas raízes da planta e translocação e acumulação na parte aérea (ALI, KHAN, SAJAD, 2013).

A capacidade de absorver ou translocar nutrientes e metais está diretamente ligada às características fisiológicas de cada planta, em relação às características físico-químicas do solo. O sucesso do emprego da técnica está diretamente relacionado à planta escolhida. A tolerância a elevados níveis de metais pesados é a principal característica esperada de uma planta fitorremediadora e pode estar presente na hiperacumulação de metal ou na produção de biomassa (ROBINSON *et al.*, 1998). Para isso, se deve levar em consideração o contaminante e o nível de contaminação do ambiente. Além disso, a presença de vegetação em solos contaminados é capaz de proteger o solo, diminuindo os riscos de erosão e lixiviação do contaminante (DE CONTI *et al.*, 2018; PERLATTI *et al.*, 2015).

Em estudo realizado por Perlatti *et al.* (2015), em solo contaminado por Cu em uma mina abandonada no nordeste brasileiro, plantas que cresceram naturalmente na área foram avaliadas quanto aos seus comportamentos em relação ao Cu. Os resultados apontaram para uma concentração média de 234 mg kg<sup>-1</sup> de Cu em folhas de *Bidens pilosa*. O estudo ainda aponta que a maior parte do Cu absorvido no estudo foi pelas raízes. Para os tratamentos com raízes lavadas apenas com água, o tratamento com ditionita + citrato removeu em média 23% de Cu em raízes de *Pellaea calomelanos* e 27% de *Bidens pilosa*, onde a concentração de Cu nas raízes destas plantas foi superior a concentração de Cu biodisponível no solo. Os resultados apontaram que estas espécies vegetais podem absorver maiores quantidades de Cu, o que é uma característica interessante para a recuperação de áreas contaminadas.

Em áreas de vinhedo, a aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) é amplamente utilizada como planta de cobertura de solo, já que tem grande potencial de se estabelecer em diferentes lugares e com clima temperado além de possuir potencial fitorremediador (PANZIERA *et al.*, 2018). A utilização de aveia preta em consórcio com outros cultivares, como milho (*Zea mays*) e azevém (*Lolium multiflorum* Lam.), assim

como em associação com fungos micorrízicos arbusculares, pode diminuir teores de Cu em solo, assim como auxiliar no aumento da absorção de Cu pelas plantas (FURTADO e SILVA *et al.*, 2017).

Em estudo laboratorial conduzido no município de Santana do Livramento, Rio Grande do Sul, foram aplicadas doses de 40 e 80 mg kg<sup>-1</sup> de Cu em solo retirado de área de vinhedo e foi cultivada aveia preta. Em amostragem realizada com a aplicação de 40 mg kg<sup>-1</sup>, o cultivo de aveia preta resultou em aumento de 49% do pH do solo, assim como, em aumento referente a 256% de carbono orgânico dissolvido no solo. A presença de aveia preta no solo resultou em redução no teor de Cu do solo. A concentração de Cu nas raízes de aveia preta aumentou 2078% e 4712% com a adição de 40 e 80 mg kg<sup>-1</sup> de Cu, respectivamente. Os autores concluíram que, a presença de aveia preta no solo é capaz de aprimorar condições físico-químicas no solo, contribuindo para a ciclagem de nutrientes, assim como diminuir as frações de Cu disponível no solo, em função da absorção pelas raízes (DE CONTI *et al.*, 2018).

Em experimento realizado por Giroto *et al.* (2016), amostras de solo de três áreas de vinhedo e uma de mata nativa (tratamento controle) foram coletadas na cidade de Bento Gonçalves, região da Serra Gaúcha, Rio Grande do Sul. Posteriormente, foi cultivada aveia preta nos solos. A concentração de Cu nos solos de áreas de vinhedo variou de 2 a 328 mg kg<sup>-1</sup>. Os resultados apresentaram maiores concentrações de Cu na matéria seca da parte aérea e raiz nas amostras de solo de áreas de vinhedo, com destaque para o aumento da concentração na raiz (476,48 mg planta<sup>-1</sup>), quando comparado ao controle (19,2 mg planta<sup>-1</sup>).

Além das plantas, microrganismos como fungos e bactérias também podem ser utilizados para fim de remediação de solo contaminado, atuando na produção de fitormônios que melhoram o crescimento de raiz e parte aérea da planta (BOLAN, 1991). Neste contexto, a seleção de microrganismos resistentes a Cu se apresenta como uma alternativa viável e ambientalmente interessante para a recuperação dessas áreas.

Em experimento realizado por Fu *et al.* (2010), foi avaliada a capacidade de acumulação de Cu em *Trichoderma reesei*, modificada por método de transformação por *Agrobacterium tumefaciens*. A remoção de Cu atingiu até 12 mg de Cu g<sup>-1</sup> de biomassa, equivalente a uma remoção de 92%. Em testes realizados no mesmo estudo a transformação de pH ácido para alcalino foi capaz de precipitar Cu. Assim, a condição ácida estável foi considerada fundamental para a acumulação eficiente de

Cu em *Trichoderma reesei*. Em pesquisa realizada por Farias *et al.* (2020), o consórcio de cinco fungos, entre eles *Trichoderma asperella*, e biocarvão de serragem de madeira potencializou a fitorremediação de solo contaminado por Cu ( $200 \text{ mg dm}^{-3}$ ) por *Jacaranda mimosifolia* D. Don, no Brasil. Os resultados apontaram que a aplicação do consórcio de biocarvão e fungos ao solo aumentou a concentração de Cu na matéria seca parte aérea de *J. mimosifolia* de  $7 \text{ mg kg}^{-1}$  em tratamento controle para  $19 \text{ mg kg}^{-1}$  em consórcio de fungos e biocarvão. O índice de translocação (IT), que é a razão da concentração do metal na parte aérea pela concentração do metal na raiz da planta, para Cu aumentou para 4,00 com o consórcio de fungos e biocarvão. O acúmulo de Cu em parte aérea e raiz teve aumento significativo em relação ao tratamento controle ( $0,3 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$  na parte aérea e  $1,1 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $0,6 \text{ mg kg}^{-1}$  em raiz, respectivamente).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Pesquisa na literatura e extração dos dados

A fim de se realizar uma pesquisa na literatura relacionada a contaminação por Cu em solos brasileiros por diferentes fontes, foi realizada uma revisão global em base de dados para posterior análise bibliométrica a partir de atividades com potencial de contaminação por Cu, a saber: mineração, resíduo sólido, vinhedo, solo urbano, aplicação de esterco e chorume em áreas agricultáveis, lodo de esgoto e pomar, bem como riscos ecológicos e mitigação (Etapa 1); uma revisão sistemática focada nas publicações brasileiras e nas fontes de contaminação do solo por Cu (Etapa 2); e a apresentação dos principais riscos ecológicos e métodos de mitigação utilizados para esta problemática (Etapa 3) (Figura 1).

**Figura 1 – Esquema das etapas e das principais informações extraídas a partir da pesquisa na literatura na plataforma *Web of Science***



Fonte: Autoria Própria (2023)

Para toda a pesquisa bibliográfica, obtenção dos artigos e seleção dos dados, utilizou-se a plataforma de pesquisa *Web of Science*. Esta plataforma foi priorizada pela vasta quantidade e qualidade de artigos (editoras *Springer* e *Elsevier*), assim como pelas informações gerais disponibilizadas para fins analíticos e comparativos, como por exemplo, dados sobre as áreas temáticas dos artigos e instituições de pesquisa.

#### 4.1.2 Etapa 1: Revisão bibliométrica

A coleta de dados para a revisão bibliométrica foi realizada entre os meses de julho de 2021 a dezembro de 2022, com a utilização de um conjunto específico de palavras-chave, determinadas após exaustiva pesquisa na literatura, correspondente a atividades com potencial de promover contaminação do solo por Cu, sendo “copper” cobre; “soil contamination” contaminação de solo; “metals” metais e “Brazil” Brasil a base da pesquisa, adicionando-se posteriormente a palavra referente a cada atividade, a saber: “mining” mineração, “waste” resíduo sólido, “vineyard” vinhedo, “urban soil” solo urbano, “manure” aplicação de esterco e “slurry” chorume em áreas agricultáveis, “sludge” lodo de esgoto, “orchard” pomar, “ecological risk” riscos ecológicos e “remediation” remediação.

Os dados foram compilados em planilha de Excel® em função do número total de artigos encontrados, o número de trabalhos por área do conhecimento, as instituições de pesquisa envolvidas e o número de artigos por ano. A partir disso, foram criadas figuras para a representação dos resultados obtidos para cada atividade ligada a contaminação por Cu em solos. Ressalta-se que a base de dados *Web of Science* proporciona todos esses dados para posterior análise em suas próprias categorias de análise de resultados de busca.

#### 4.1.3 Etapa 2: Revisão sistemática de dados

A segunda etapa de seleção de artigos, denominada neste trabalho de revisão sistemática dos dados foi conduzida entre os meses de março a julho de 2021, sem limitação de ano de publicação. Para a escolha das publicações, foram adotados os seguintes critérios: (1) publicação em forma de artigo em periódico científico; (2) estudo conduzido no Brasil; (3) estudo que apresentasse valores de Cu no solo em área contaminada e área de referência; (4) estudo com análise de teor total ou disponível de Cu no solo ( $\text{mg kg}^{-1}$ ); (5) estudo com resultados que podiam ser extraídos diretamente do texto, tabelas e figuras.

Para a seleção dos artigos, foram utilizadas como base da pesquisa palavras-chave como “soil contamination” contaminação do solo; “copper” cobre; “Brazil” Brasil;

“Brazilian” brasileiro; “metals” metais; “urban soil” solo urbano; “vineyards” vinhedo; “orchard” pomar; “sludge” lodo de esgoto; “manure” esterco; “mining” mineração; “waste” resíduo sólido; “remediation” remediação; “ecological risk” risco ecológico.

Após exaustiva avaliação, foram selecionadas 46 publicações (Lima, 1994; Klumpp et al., 2003; Cassella et al., 2007; Mierlean et al., 2007; Casali et al., 2008; Korf et al., 2008; Santana et al., 2008; Mirlean et al., 2009; Zanello et al., 2009; Fragomeni et al., 2010; Mattias et al., 2010; Machado et al., 2011; Pereira et al., 2010; Basso et al., 2012; Cesar et al., 2012; Niemeyer et al., 2012; Silva et al., 2012; Nogueira et al., 2013; Tiecher et al., 2013; Brunetto et al., 2014; Giroto et al., 2014; Miotto et al., 2014; Couto et al., 2015; Formentini et al., 2015; Penha et al., 2015; Perlatti et al., 2015; Benedet et al., 2016; Couto et al., 2016; De Conti et al., 2016; Preston et al., 2016; Brunetto et al., 2018a; Brunetto et al., 2018b; Oliveira et al., 2019; Silva Júnior et al., 2019; Barbosa et al., 2020; Benedet et al., 2020; Coelho et al., 2020; Korchagin et al., 2020; Betancur-Agudelo et al., 2021; Silva et al., 2021; Magalhães et al., 2021; Marques et al., 2021; Penteado et al., 2021; Perlatti et al., 2021; Silva et al., 2021; Soroldoni et al., 2021).

Para cada publicação selecionada foram coletadas informações gerais, como: local do estudo, fonte da contaminação, tempo de uso da fonte de contaminação e a especificação da espécie cultivada ou do local contaminado. Também foram coletadas informações sobre a camada de solo avaliada, atributos do solo (teor de argila, carbono orgânico e pH), teor de Cu total e teor de Cu disponível, bem como os métodos de extração. Os dados foram compilados em planilha de Excel®.

Os dados gerais sobre a contaminação de Cu em solos brasileiros foram separados em sete grupos considerando a fonte de contaminação, sendo: 1) fungicida cúprico; 2) resíduo orgânico; 3) rejeito de mineração; 4) material particulado; 5) resíduo sólido; 6) chapa metálica; 7) partículas de tinta anti-incrustante. A partir de cada atividade com potencial contaminante por Cu em solos, foi possível especificar o subgrupo e o número de artigos referente a cada fonte de contaminação, com a realização de uma tabela no Excel®. A partir dos dados de teor total de Cu no solo da área de referência e da área contaminada foi calculado o índice de geoacumulação (Igeo) (Müller, 1979), a partir da equação 1:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5B_n} \quad (1)$$



onde  $C_n$  é a concentração de Cu na amostra de interesse,  $B_n$  é a concentração de Cu na amostra referência (background).

A coleta de dados referentes ao teor de cobre (Cu) na camada superficial (0-20 cm) em solos com viticultura nos estados de Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS) permitiram a realização de médias (razão entre a soma dos teores de Cu pela quantidade de fatores), em cada um dos estudos e a obtenção dos valores máximos e mínimos de Cu em solos brasileiros.

Para cada grupo de fonte de contaminação de Cu no solo foi realizada a estatística descritiva para os teores total e disponível e Igeo. Foram realizadas regressões entre o tempo de uso e o teor de Cu total para solos de áreas com fruticultura, sendo o extrator EDTA, com as equações de regressão: Total (videira) =  $13,26x - 4,17$ ; Disponível (videira) =  $12,47x - 80,15$ ; Total (mangueira) =  $1,31x - 1,94$ . As regressões entre teor de Cu disponível e atributos do solo (pH, argila, carbono orgânico) em áreas com aplicação de resíduo orgânico e fungicida cúprico foram realizadas seguindo as seguintes equações de regressão: EDTA (fungicida) =  $233x - 12,30$ ; EDTA (resíduo) =  $7,47x - 2,74$ ;  $CaCl_2$  (resíduo) =  $0,09x - 0,09$ . As regressões foram realizadas com o auxílio do software SigmaPlot. Ressalta-se que os extratores EDTA e  $CaCl_2$  foram os extratores presentes nos artigos que serviram de base para a geração destas análises de regressão.

#### 4.1.4 Etapa 3: Riscos ecológicos e mitigação

A terceira etapa da pesquisa foi direcionada para a seleção, dentre as 46 publicações utilizadas na revisão sistemática, de trabalhos com enfoque em riscos ecológicos e na mitigação da contaminação com Cu em solos brasileiros. A partir dos trabalhos selecionados, que também apresentavam dados sobre riscos ecológicos, foi elaborado um esquema e levantadas as principais consequências apresentadas nos artigos decorrentes da contaminação por Cu em organismos e no ambiente.

A partir dos dados do teor de Cu na parte aérea e na raiz ( $mg\ kg^{-1}$ ) coletados nas publicações com enfoque em remediação, foi determinado o índice de translocação (IT) (Abreu et al., 2012), que mede a capacidade da espécie vegetal em

absorver o Cu e transportá-lo para a parte aérea, sendo calculado a partir da equação 2.

$$IT = \frac{Cu_{\text{parte aérea}}}{Cu_{\text{parte aérea}} + Cu_{\text{raiz}}} \times 100 \quad (2)$$

Dados referentes a teor de Cu no solo contaminado, assim como o teor de Cu na raiz e parte aérea ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), massa seca de raiz e parte aérea ( $\text{g planta}^{-1}$  adicionada ao solo) foram coletados de publicações com enfoque em fitorremediação, associados ou não a outras técnicas de biorremediação, condicionantes de solo, amenizantes ou adubos orgânicos, e compiladas em uma tabela no Excel®, para posterior análise das plantas que apresentam resistência a Cu em solo, assim como podem possuir características hiperacumuladoras. Os teores de Cu foram extraídos por HCl, EDTA, Mehlich-1 e  $\text{CaCl}_2$ , sendo estes os extratores utilizados nos estudos selecionados para riscos ecológicos e mitigação da contaminação por Cu em solos brasileiros.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Etapa 1: Revisão Bibliométrica

A partir das palavras-chave selecionadas (“copper” cobre; “soil contamination” contaminação de solo; “metals” metais; “Brazil” Brasil; “mining” mineração, “waste” resíduo sólido, “vineyard” vinhedo, “urban soil” solo urbano, “manure” aplicação de esterco e “slurry” chorume em áreas agricultáveis, “sludge” lodo de esgoto, “orchard” pomar, “ecological risk” riscos ecológicos e “remediation” remediação) para a pesquisa dos artigos e tendo como base de dados o *Web of Science*, a busca retornou que a contaminação do solo proveniente de atividade de mineração foi objeto de estudo em 40 artigos publicados, seguido da contaminação por resíduo sólido, com 37 artigos. O acúmulo de Cu em solos derivado de resíduos urbanos esteve presente em 25 artigos. A aplicação de resíduo orgânico em solos agricultáveis como, esterco, lodo de esgoto e chorume, foram estudados em 13, 13 e 15 artigos, respectivamente (Tabela 1).

**Tabela 1 – Número de artigos retornados a partir de palavras-chave utilizadas na busca por artigos de contaminação por Cu em solos na plataforma *Web of Science***

Atividades	Palavras-chave	Número de artigos
Mineração	copper; metals; soil contamination; Brazil; mining	40
Resíduo sólido	copper; metals; soil contamination; Brazil; waste	37
Vinhedo	copper; metals; soil contamination; Brazil; vineyards	27
Solo urbano	copper; metals; soil contamination; Brazil; urban soil	25
Chorume	copper; metals; soil contamination; Brazil; slurry	15
Esterco	copper; metals; soil contamination; Brazil; manure	13
Lodo de esgoto	copper; metals; soil contamination; Brazil; sludge	13
Pomar	copper; metals; soil contamination; Brazil; orchard	04
Risco ecológico	copper; metals; soil contamination; Brazil; ecological risk	08
Remediação	copper; metals; soil contamination; Brazil; remediation	13

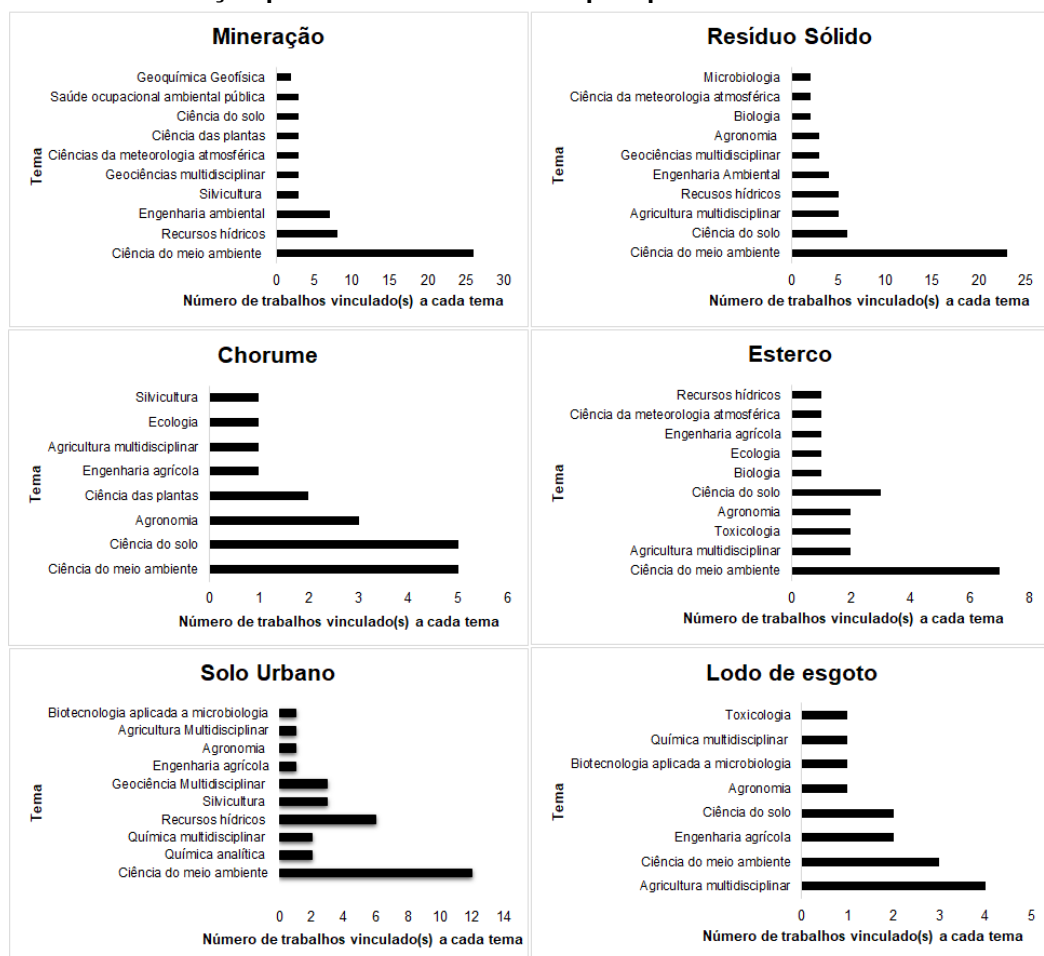
**Fonte: *Web of science* (2023)**

Deste total de artigos, a temática “Ciência do meio ambiente”, indicada na plataforma de busca *Web of Science*, se destacou, sendo o tema central de 65% e 62% do total de trabalhos ligados as atividades de mineração e resíduo sólido. As atividades de aplicação de esterco em áreas agrícolas e solo urbano também obtiveram porcentagens significativas relacionadas a temática “Ciência do meio ambiente”, 54% e 48%, respectivamente. Em relação a contaminação referente a aplicação de chorume em solos, os temas centrais com 33% foram “Ciência do meio

ambiente” e “Ciência do solo” enquanto que para a atividade de aplicação de lodo de esgoto, o tema central foi “Agricultura multidisciplinar”, com 31%, logo seguido de “Ciência do meio ambiente”, com 23% (Figura 2).

Outros temas como, “Ciência do solo”, “Engenharia ambiental”, “Geociências multidisciplinar”, “Recursos hídricos”, “Agricultura multidisciplinar” e “Engenharia agrícola” estiveram relacionados aos artigos encontrados referentes as diversas atividades vinculadas a contaminação por Cu em solos (Figura 2).

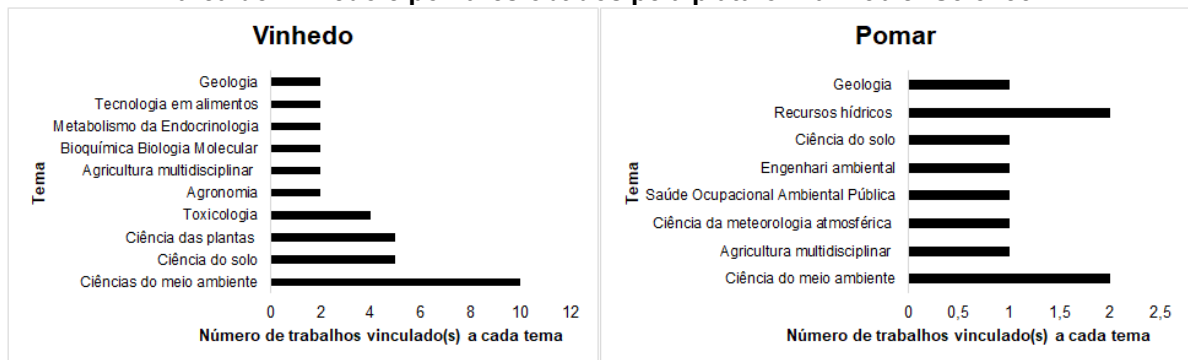
**Figura 2 – Número de trabalhos vinculados aos temas referentes as atividades relacionadas a contaminação por Cu em solos obtidos pela plataforma *Web of Science***



Fonte: Autoria própria (2023)

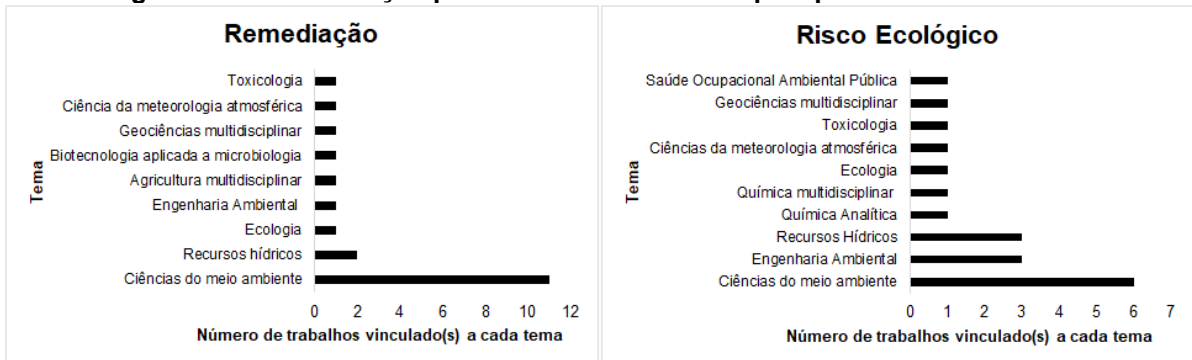
Para a contaminação por Cu em área de vinhedo, a pesquisa de palavras-chave gerou um resultado de 27 artigos publicados enquanto que para áreas de pomar, com o cultivo de frutíferas, apenas 4 artigos (Tabela 1). A temática predominante em ambos os casos foi “Ciência do meio ambiente”, com 37% para vinhas e 50% para pomar, estando o tema “Recursos hídricos” também com 50% para a contaminação por Cu em pomares (Figura 3).

**Figura 3 – Número de trabalhos vinculados aos temas referentes a contaminação por Cu em área de vinhedo e pomares obtidos pela plataforma *Web of Science***



Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 4 – Número de trabalhos vinculados aos temas referentes a remediação e riscos ecológicos da contaminação por Cu em solos obtidos pela plataforma *Web of Science***



Fonte: Autoria própria (2023)

De acordo com a Tabela 1, os estudos referentes a avaliação dos riscos ecológicos, assim como remediação de solos contaminados com Cu totalizaram 8 e 13 trabalhos publicados, que apontaram mais uma vez para a predominância da temática “Ciência do meio ambiente”, com 85% e 75% para risco ecológico, apresentando grande significância da temática em relação ao número total de artigos (Figura 4).

Os temas de “Toxicologia”, “Geologia”, “Ciência do solo”, “Agricultura multidisciplinar”, “Recursos hídricos”, “Engenharia ambiental” e “Ciência da meteorologia atmosférica” também estiveram ligados às produções científicas relacionadas à contaminação por Cu em solos brasileiros, assim como para artigos de remediação e riscos ecológicos.

Em relação às instituições de ensino superior responsáveis pela produção científica relacionada à contaminação por Cu em solos brasileiros, destaca-se a

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) com 44 artigos publicados referentes principalmente às atividades de cultivo de uva e aplicação de chorume em áreas agrícolas, seguido de esterco, resíduo sólido e mineração. Os artigos publicados pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade de São Paulo (USP) e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), corresponderam a 27, 21, 16 e 15 trabalhos respectivamente, assim como a Universidade Federal do Ceará (UFC) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) representaram 12 e 7 artigos publicados, respectivamente (Tabela 2).

**Tabela 2 – Instituições brasileiras e número de publicações referentes a atividades antrópicas relacionadas a contaminação por Cu em solos obtidos pela plataforma *Web of Science***

Instituições / Atividades Antrópicas	Vinhedo	Pomar	Esterco	Chorume	Mineração	Lodo de esgoto	Resíduo sólido	Solo urbano	Remediação	Risco ecológico	Total
Universidade Federal de Santa Maria	16	1	6	11	4	-	5	-	-	1	44
Universidade Federal de Santa Catarina	8	1	1	7	-	2	2	-	-	-	21
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	5	-	2	3	2	2	6	2	3	2	27
Universidade Federal do Ceará	3	1	-	-	4	1	4	-	3	-	12
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária	3	1	1	1	3	1	3	-	1	1	15
Universidade de São Paulo	3	1	-	-	4	1	4	-	3	-	16
Universidade Federal do Rio de Janeiro	-	-	-	-	4	-	-	3	-	-	07

Fonte: Autoria própria (2023)

Em função da análise da Tabela 2, observa-se que a produção científica possui ligação com a distribuição geográfica das atividades ligadas à contaminação por Cu em solos brasileiros. As atividades de cultivo de videira e aplicação de chorume e esterco em áreas agrícolas estão concentradas principalmente na região sul do Brasil, dessa forma, a maior quantidade de estudos referentes aos temas estão localizadas em Universidades do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, assim como a atividade de mineração está fortemente ligada a região sudeste, norte e nordeste, estando os estudos sobre o tema principalmente associados a Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade de São Paulo e Universidade Federal do Ceará.

Observa-se uma quantidade ainda reduzida de trabalhos relacionados a contaminação por Cu proveniente de lodo de esgoto, solo urbano e pomar, com 7, 5

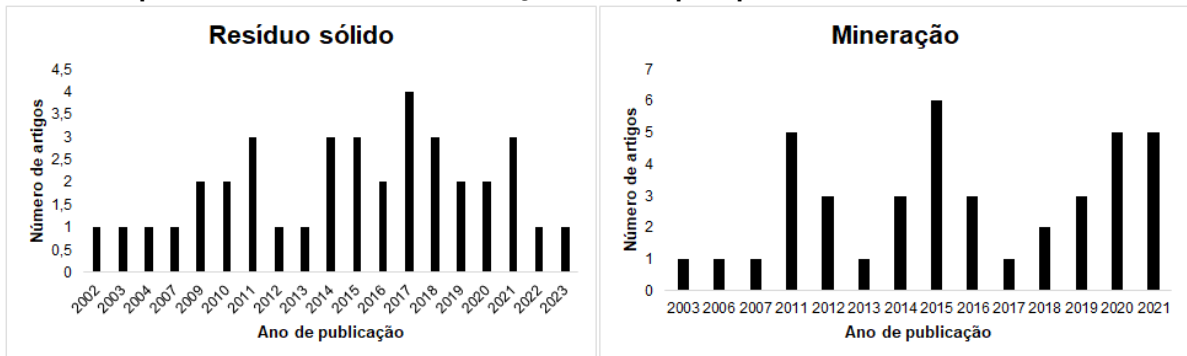
e 5 trabalhos publicados, respectivamente, estando a maior parte das produções científicas associadas a UFRGS, UFSC e UFRJ. Os artigos relacionados a contaminação por Cu em solos causada pelo despejo de resíduos sólidos estão bem distribuídos, com a maior quantidade de produções concentrada na UFRGS, UFSM, UFC, USP e Embrapa (Tabela 2).

Em relação ao crescimento da contaminação por Cu em solos e da vasta gama de atividades antrópicas contribuintes, universidades e empresas estão buscando compreender a dinâmica deste elemento no solo e os possíveis riscos ecológicos associados a esta contaminação, além de procurar por estudos já realizados ou até mesmo pesquisas para o desenvolvimento de técnicas de remediação de áreas contaminadas com Cu. Esse interesse presente, fruto de uma necessidade atual, pode ser observado pela quantidade ainda reduzida de estudos referentes a remediação de solos e riscos ecológicos (10 e 4 artigos, respectivamente), sendo estes desenvolvidos principalmente pela Embrapa, USP, UFRGS, UFSM e UFC (Tabela 2).

Em relação ao ano de publicação, a busca na plataforma *Web of Science* gerou o número de publicações anuais para cada atividade relacionada a contaminação por Cu em solos brasileiros em determinada faixa de tempo, que foi definida pela própria plataforma, em função das próprias atividades serem objeto de interesse antigo ou atual quanto a contribuição de Cu em solo.

De acordo com os dados obtidos, a contaminação por Cu em solos brasileiros proveniente de atividades de resíduo sólido e mineração vem sendo estudada desde 2002 e 2003, tendo tido seu auge em 2017, com 4 trabalhos publicados e 2015, com 6 trabalhos publicados, respectivamente (Figura 5). A produção científica relacionada a contaminação por Cu em solos brasileiros vinculada a atividade de resíduo sólido obteve média de 1,9 artigos por ano publicados durante os anos avaliados (2002 a 2023) enquanto que para a atividade de mineração a média foi de 2,8 artigos por ano, entre os anos de 2003 e 2021. Destaca-se a faixa de tempo de produção científica avaliada, 21 anos para resíduo sólido e 18 anos para mineração, enfatizando que as atividades são objeto de estudo antigo em relação ao tema de contaminação por Cu em solos brasileiros.

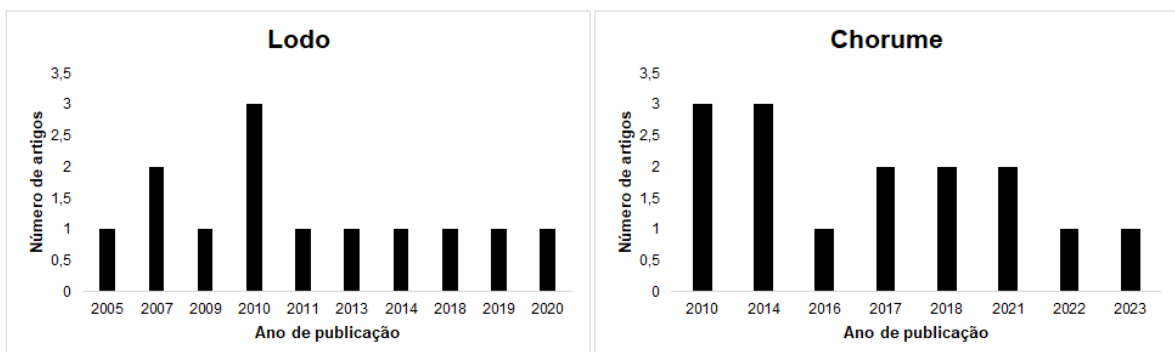
**Figura 5 – Número e ano de publicação de artigos referentes a contaminação de solos por Cu por resíduos sólidos e mineração obtidos pela plataforma *Web of Science***



Fonte: Autoria própria (2023)

A pesquisa bibliométrica aponta uma condição mais estável em relação ao número de trabalhos publicados para lodo de esgoto e chorume, que tiveram seu ápice em 2010, com 3 trabalhos publicados, respectivamente. A média de produção científica relacionada a contaminação por Cu em solo proveniente de lodo de esgoto durante o período de 2005 a 2020 foi de 1,3 artigos publicados por ano, enquanto que para a atividade de aplicação de chorume em solo a média foi de 1,9 no período de 2010 a 2023. (Figura 6). Quanto a faixa de tempo relacionada as publicações, para lodo de esgoto esta correspondeu a 15 anos enquanto que para chorume, 13 anos, demonstrando que ambas as atividades vem sendo objeto de interesse a mais de uma década acerca do assunto.

**Figura 6 – Número e ano de publicação de artigos referentes a contaminação de solos por Cu por lodo e chorume obtidos pela plataforma *Web of Science***



Fonte: Autoria própria (2023)

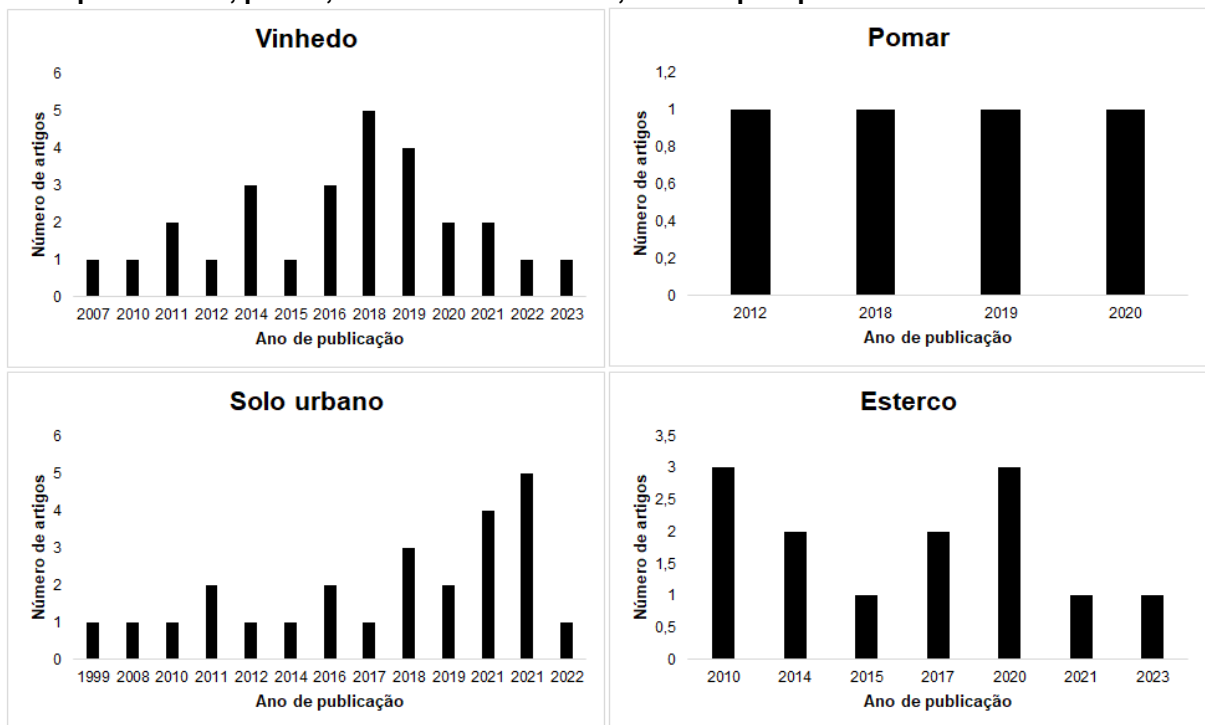
A contaminação por Cu em solos brasileiros proveniente de cultivo de videiras veio sendo estudada com mais ênfase entre 2014 e 2019, com 16 trabalhos publicados. A média de produção científica durante o período de 2007 a 2023 foi de



2,1 artigos por ano. Já a contaminação derivada de solo urbano foi mais estudada entre 2018 e 2021, com a publicação de 14 artigos relacionados ao tema e uma média de 1,9 trabalhos publicados por ano durante o período (1999 a 2022). A produção científica relacionada a contaminação proveniente de aplicação de esterco em áreas agrícolas obteve uma média de aproximadamente 2 publicações por ano, entre os anos de 2010 a 2023, enquanto que as pesquisas referentes a contaminação em áreas de pomar ainda não evoluíram, tendo média de uma publicação entre os anos de 2012 a 2020 (Figura 7).

Ressalta-se a diferença quanto ao intervalo de tempo de publicações por ano para as atividades de solo urbano (20 anos), vinhedo (16 anos) e esterco (13 anos) quando relacionadas a pomar (8 anos), enfatizando que a contaminação por Cu em solos vem sendo objeto de estudo antigo e mais relevante quando relacionado a contribuição de Cu em solos de áreas urbanas, de cultivo de uva e agricultáveis com aplicação de esterco em detrimento da contaminação em áreas de pomar, que configuram-se como objeto de estudo da atualidade.

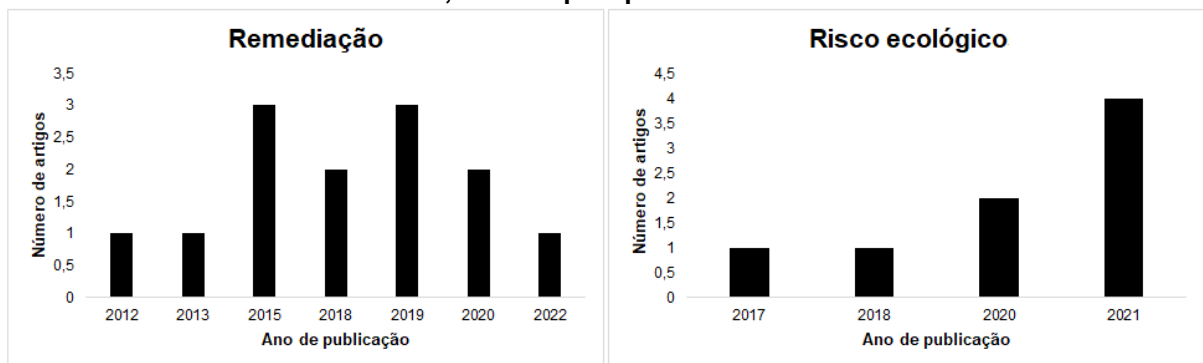
**Figura 7 – Número e ano de publicação de artigos referentes a contaminação de solos por Cu por vinhedo, pomar, solo urbano e esterco, obtidos pela plataforma *Web of Science***



Fonte: Autoria própria (2023)

Se registram estudos sobre remediação de solos contaminados com Cu no Brasil a uma década, principalmente com a utilização de plantas, tendo atingido seu pico entre os anos de 2015 a 2020 (10 artigos publicados), com uma média de produção científica de 1,8 artigos publicados por ano. Contudo, os estudos relacionados aos potenciais riscos ecológicos desta contaminação são objeto de estudo na atualidade (4 artigos publicados em 2021), sendo registradas publicações em uma faixa de tempo de 4 anos (2017 à 2021). Atualmente vê-se como uma necessidade o entendimento de que antes mesmo da determinação de técnicas de remediação a serem utilizadas é importante que se conheça a dinâmica do Cu nos solos, ou seja, como ele afeta a macro e microbiota ali existente para que assim a técnica de remediação seja escolhida (Figura 8).

**Figura 8 – Número e ano de publicação de artigos referentes a remediação e risco ecológico do Cu em solos, obtidos pela plataforma *Web of Science***



Fonte: Autoria própria (2023)

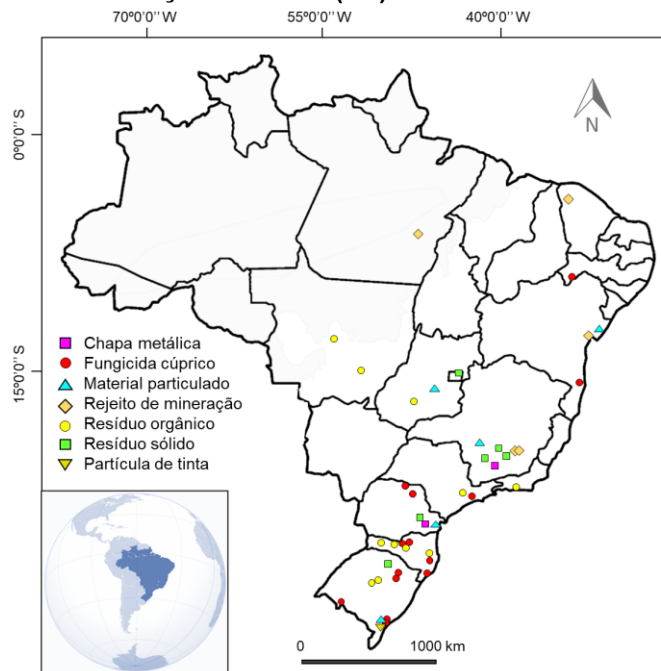
A análise das Figuras 5, 6, 7 e 8 apontam para uma quantidade ainda reduzida de trabalhos relacionados a contaminação por Cu no Brasil, apesar da vasta gama de atividades contribuintes para o enriquecimento do solo com este metal pesado.

## 5.2 Etapa 2: Revisão sistemática

A partir da análise mais específica dos artigos, constata-se que as pesquisas sobre contaminação de Cu em solos têm sido realizadas em diversos locais do Brasil, abrangendo cinco biomas, sobretudo no bioma Mata Atlântica (Figura 9). A categorização das publicações de acordo com a fonte de Cu revelou que a contaminação pela aplicação de fungicidas cúpricos e resíduos orgânicos têm sido

mais estudadas, ambas com 13 publicações, seguida da contaminação derivada de rejeito de mineração, com 9 publicações. Para essas fontes de Cu, a aplicação de fungicidas cúpricos no cultivo de videira (11 publicações), aplicação de dejetos suínos em solos agrícolas (9 publicações) e extração de Cu (4 publicações) têm recebido mais atenção (Tabela 3). A contaminação do solo por Cu derivado de resíduo sólido e material particulado apresentaram número intermediário de publicações (5 e 4, respectivamente), enquanto que a contaminação por chapa metálica e partículas de tinta anti-incrustante para barcos apresentaram apenas uma publicação para cada uma dessas fontes de Cu (Tabela 3).

**Figura 9 – Locais avaliados nas 46 publicações utilizadas na revisão sistemática sobre contaminação de cobre (Cu) nos solos brasileiros**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

**Tabela 3 – Número de publicações de acordo com grupos e subgrupos de fontes de contaminação de Cu nos solos brasileiros**

<b>Grupo</b>	<b>Subgrupo</b>	<b>Número de publicações</b>
Partícula de tinta	Tinta antivegetativa	1
Chapa metálica	Ferro velho	1
Material particulado	Área portuária	1
	Área industrial	1
	Rodovia	1
	Parque urbano	1
Resíduo de mineração	Fundição de Pb	2
	Indústria de cimento	1
	Rejeito de Fe	2
	Extração de Cu	4
Resíduo sólido	Resíduo sólido	5
Resíduo orgânico	Lodo de esgoto	2
	Dejeto suíno	9
	Cacaueiro	1
	Cafeeiro	1
Fungicida cúprico	Mangueira	1
	Macieira	1
	Videira	11

**Fonte: Autoria própria (2023)**

As fontes de contaminação por Cu no solo são variadas. A aplicação de fungicida a base de Cu em áreas cultivadas com videiras ou em pomares é considerado um dos principais motivos de excessivos teores de Cu em solos, sendo uma prática amplamente difundida para controle de doenças fúngicas em países como Brasil, Itália, França, Espanha e do leste europeu (BRUNETTO *et al.*, 2017; PANAGOS *et al.*, 2018).

No Brasil, umas das principais fontes de contaminação de solos por Cu é a aplicação de fungicidas cúpricos em áreas de vinhedo, o que pode ser observado na Tabela 3, onde de 46 publicações, 11 tiveram a contaminação por Cu por aplicação de fungicidas cúpricos em áreas de cultivo de videira como enfoque. Em pesquisa realizada por Korchagin *et al.* (2020), em solo cultivado com videira por 123 anos com aplicação de calda bordalesa, no município de Pinto Bandeira, Rio Grande do Sul, a concentração média de Cu disponível atingiu valor de 1090 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto o teor da área referência (floresta) foi igual a 23 mg kg<sup>-1</sup>. Assim, o teor de Cu disponível foi 48 vezes mais alto na área cultivada em comparação a área de referência, sendo que os maiores teores foram encontrados na camada superficial do solo (0 – 20 cm), já

que o Cu possui baixa mobilidade e tende a ser adsorvido preferencialmente em grupos funcionais orgânicos (BRUNETTO *et al.*, 2018).

Contudo, a contaminação de solos cultivados por videiras não ocorre isoladamente no Brasil. Sonoda *et al.* (2019) analisaram uma área de cultivo de videira no Japão, que recebeu repetida aplicação de calda bordalesa. Na camada de 10 – 15 cm, a concentração de Cu atingiu 201 mg kg<sup>-1</sup>, sendo que o teor de Cu na área referência (sem cultivo) esteve variando entre 136 a 156 mg kg<sup>-1</sup>. Corroborando pesquisa realizada no Sri Lanka por Prabagar *et al.* (2021).

Iñigo *et al.* (2020) ao avaliarem 106 pontos em área de cultivo de videiras em Rioja na Espanha perceberam o aumento do teor de Cu na superfície dos solos (0 – 20 cm) de vários pontos analisados, o que pode estar relacionado a aplicação de fertilizante a base de Cu. O teor de Cu na superfície dos solos variou de 2 a 121 mg kg<sup>-1</sup>.

A aplicação de dejetos suínos em solos agricultáveis também está relacionada a aumentos excessivos dos teores de Cu nos solos no Brasil e no mundo. A presença de Cu em dejetos suínos se deve ao fato de as rações para os suínos serem produzidas com alto teor de zinco e Cu, a fim de diminuir diarreia e estimular crescimento. A aplicação de lodo de esgoto e material particulado proveniente de áreas de minas também estão associadas ao enriquecimento de Cu no solo (PANAGOS *et al.*, 2018).

Em pesquisa realizada por Wan *et al.* (2020), em área de cultivo de arroz na cidade de Changsha, província de Hunan na China, foi verificado o teor de Cu em solo com aplicação de esterco de galinha, esterco de porco e lodo de esgoto. A aplicação de ambos os fertilizantes causou aumento de Cu total no solo e acúmulo do micronutriente em teores que podem apresentar risco para o ecossistema e a saúde humana, com destaque para o esterco de suínos que aumentou em 21 - 73% o teor de Cu total no solo. O acúmulo de Cu medido e previsto também aumentou significativamente com a aplicação de esterco de suínos (1 – 4 mg kg<sup>-1</sup>).

Okkenhaug *et al.* (2018), realizaram uma pesquisa em antigo campo de tiro na Noruega e encontram concentração de Cu igual a 843 mg kg<sup>-1</sup>. Em pesquisa realizada por Pu *et al.* (2019), no sudoeste da China, com atividade de mineração de Cu antiga (2000 anos), a maior concentração de Cu encontrada em solos das fazendas que circundam a área foi de 850 mg kg<sup>-1</sup>, teor considerado excessivo.

A contaminação por Cu também está presente em áreas de disposição de resíduos sólidos. Em estudo realizado por Milhome *et al.* (2018), amostras de solo foram coletadas do entorno de área de lixão na cidade de Iguatu, no Ceará. Os teores de Cu variaram, sendo o teor máximo encontrado igual a  $183 \text{ mg kg}^{-1}$ . Esta concentração está fora dos parâmetros proposto pela legislação vigente (CONAMA 420/2009) para manutenção da vida e das funções do solo ( $60 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Segundo os autores, os elevados teores de Cu encontrados no solo estão relacionados principalmente a resíduos provenientes da agricultura e pecuária podendo causar grandes danos à saúde humana a médio e longo prazo. Corroborando trabalho realizado por Gujre; Rangan; Mitra (2020), na Índia, onde foi detectada contaminação por Cu em solo proveniente de área de disposição de resíduos sólidos.

Estudos apontam que elevados teores de Cu também são encontrados em áreas de desmanche assim como podem estar relacionados a tinta anti-incrustante, utilizada na limpeza de embarcações. Chowdhury; Rasid (2021), coletaram amostras de solo de áreas agricultáveis próximas a local utilizado para desmantelamento de navios, em Sitakunda, Bangladesh. A maior concentração de Cu foi encontrada em horta localizada próxima a oficina de lixiviação ( $662 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Em áreas agricultáveis próximas ao desmanche e queima dos materiais de navio também foram encontrados elevados teores de Cu ( $165$  a  $505 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

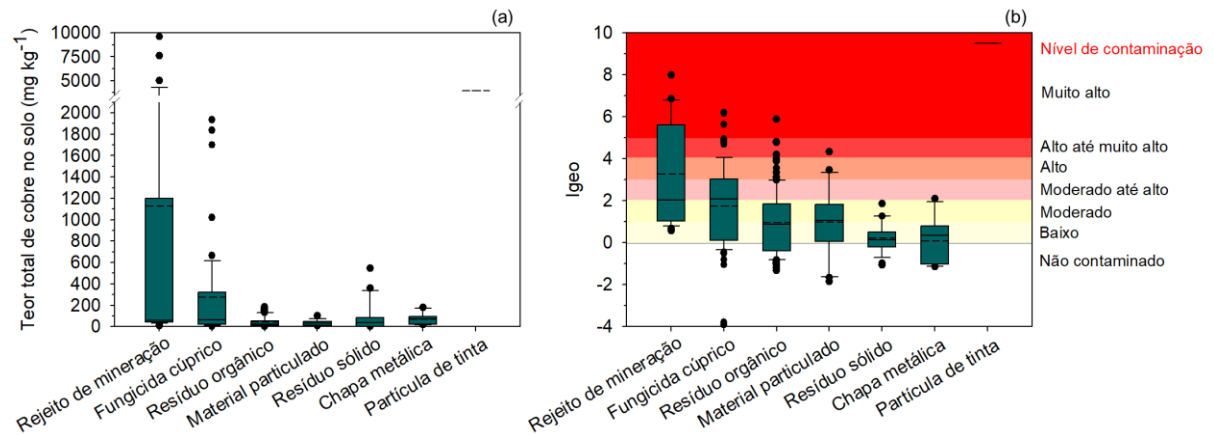
Em estudo realizado por Soroldoni *et al.* (2021), amostras de solo contaminado por partículas de tinta anti-incrustante de uma instalação de manutenção de barcos no Rio Grande do Sul, Brasil, apontaram para teor de Cu igual a  $3916 \text{ mg kg}^{-1}$ , sendo muito superior ao valor proposto pelos parâmetros legais (CONAMA 420/2009).

### 5.2.1 Teor de Cu e Igeo em solos de acordo com a fonte de contaminação

Os solos afetados por rejeitos de mineração se destacaram pelos maiores valores médios para os teores totais de Cu ( $1156 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e Igeo (3,2), indicando alta contaminação (Figura 10). Contudo, o potencial contaminante dos rejeitos de mineração depende do tipo de rejeito, sendo que em áreas afetadas por rejeitos de mineração de Cu os valores de Igeo (4,5 e 7,7) indicam contaminação alta até muito alta (Tabela 4). Em áreas afetadas por rejeitos da fundição de Pb a contaminação foi

moderada (Igeo 1,9), enquanto que em áreas afetadas por rejeitos de mineração de Fe proveniente do rompimento da barragem Fundão a contaminação foi baixa até moderada (Igeo 0,6 até 1,8).

**Figura 10 – Box-plot do teor total de cobre (Cu; a) e índice de geoacumulação (Igeo; b) em solos afetados por diferentes fontes de contaminação no Brasil. Linha e linha tracejada indicam mediana e média, respectivamente**



Fonte: Autoria própria (2023)

**Tabela 4 – Variação do teor de cobre (Cu) e índice de geoacumulação (Igeo) em solos afetados por rejeitos de mineração no Brasil**

Local	Fonte de contaminação	Teor (mg kg <sup>-1</sup> )	Igeo	Referência
Viçosa do Ceará (Ceará)	Rejeito mineração de Cu <sup>(1)</sup>	5451±2074**	7,7±0,9	Perlatti <i>et al.</i> (2015) Perlatti <i>et al.</i> (2021)
Serra dos Carajás (Pará)	Rejeito mineração de Cu <sup>(1)</sup>	1389±1300*	4,5±2,3	Casella <i>et al.</i> (2007)
Santo Amaro (Bahia)	Rejeito fundição de Pb <sup>(2)</sup>	397±942*	1,9±1,9	Niemeyer <i>et al.</i> (2012)
Mariana (Minas Gerais)	Rejeito mineração de Fe <sup>(3)</sup>	28±6*	0,6±1,0	Silva <i>et al.</i> (2021)
Mariana (Minas Gerais)	Rejeito mineração de Fe <sup>(3)</sup>	17±1*	1,8±0,1	Coelho <i>et al.</i> (2020a)

<sup>(1)</sup> Mina abandonada; <sup>(2)</sup> Fundição abandonada; <sup>(3)</sup> Rompimento da barragem Fundão. dp = desvio padrão. \* Teor total; \*\* teor pseudo-total.

Fonte: Autoria própria (2023)

De acordo com os valores médios de Igeo (Figura 10b) verificou-se que para solos afetados pela aplicação de fungicidas cúpricos o nível de contaminação foi moderado (1,8), enquanto que para solos afetados pela aplicação de resíduos orgânicos (0,95), material particulado (0,98), resíduo sólido (0,21) e chapa metálica (0,09) o nível de contaminação foi baixo. Contudo, os valores absolutos de Igeo indicam que em algumas condições a contaminação de Cu por fungicidas cúpricos, resíduos orgânicos e material particulado pode atingir nível muito alto, enquanto que para resíduos sólidos e chapa metálica a contaminação pode atingir nível moderado.

Embora para solos afetados por partículas de tinta anti-incrustante tenha sido encontrado resultado para apenas uma amostra, os valores de Igeo (9,5) indicam um potencial muito elevado para contaminação do solo com Cu.

A maioria dos estudos sobre contaminação do solo por Cu derivado de fungicidas cúpricos têm sido realizados nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, na região sul do Brasil. Esses estudos indicam que ocorre uma ampla variação dos teores totais de Cu no solo, com destaque para vinhedos localizados na Serra Gaúcha (Tabela 5). Quando foi considerado o tempo de cultivo verificou-se que esse é um fator determinante para o aumento dos teores de Cu no solo em cultivos de videira (Figura 11a) ou mangueira (Figura 11b). Nesse sentido, os maiores teores de Cu nos solos foram registrados para áreas cultivadas por mais de 25 e 100 anos com mangueira ( $40 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e videira ( $2197 \text{ mg kg}^{-1}$ ), respectivamente. De acordo com o coeficiente angular das equações de regressão linear, constatou-se que para cada ano de cultivo de videira ocorre um incremento no teor total de Cu no solo na ordem de  $13,3 \text{ mg kg}^{-1}$ , enquanto que para mangueira esse aumento foi de  $1,3 \text{ mg kg}^{-1}$ .

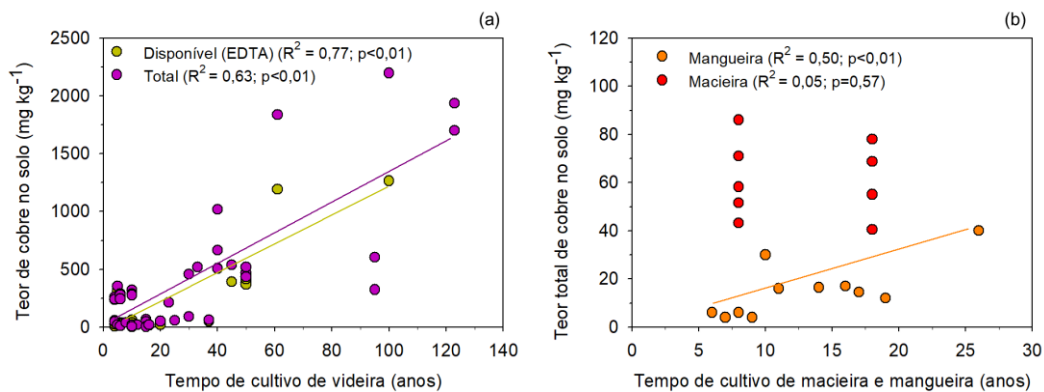
**Tabela 5 – Valores médio, máximo e mínimo do teor de cobre (Cu) na camada superficial (0-20 cm) em solos com viticultura nos estados de Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS), Brasil**

Município	Estado	Nº de trabalhos	Média	Máximo	Mínimo
Bento Gonçalves	RS	9	863,3	2197,6	353,7
Ilha dos Marinheiros	RS	2	502,35	536,5	468,2
Rio Grande	RS	3	472,76	517,3	432,8
Urussanga	SC	6	51,72	66,24	45,57
Água Doce	SC	8	304,21	321,25	235,17
Urubici	SC	9	68,25	120,16	40,5
Pinto Bandeira	RS	2	1817,5	1935	1700
Videira	SC	2	463,28	602,23	324,33
Santana do Livramento	RS	5	47,2	91,5	4,7

**Fonte: Autoria própria (2023)**



**Figura 11 – Teor total e disponível (EDTA; ácido etilenodiamino tetra-acético) de cobre (Cu) no solo em função do tempo de cultivo de videira (a), macieira e mangueira (b) com aplicação de fungicidas cúpricos no Brasil**

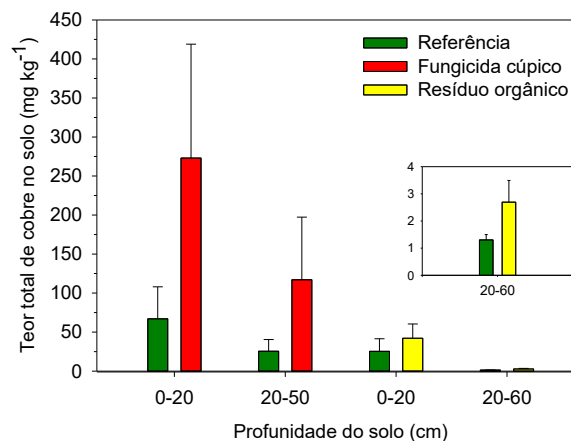


**Equações de regressão: Total (videira) = 13,26x – 4,17; Disponível (videira) = 12,47x – 80,15; Total (mangueira) = 1,31x – 1,94.**

**Fonte: Autoria própria (2023)**

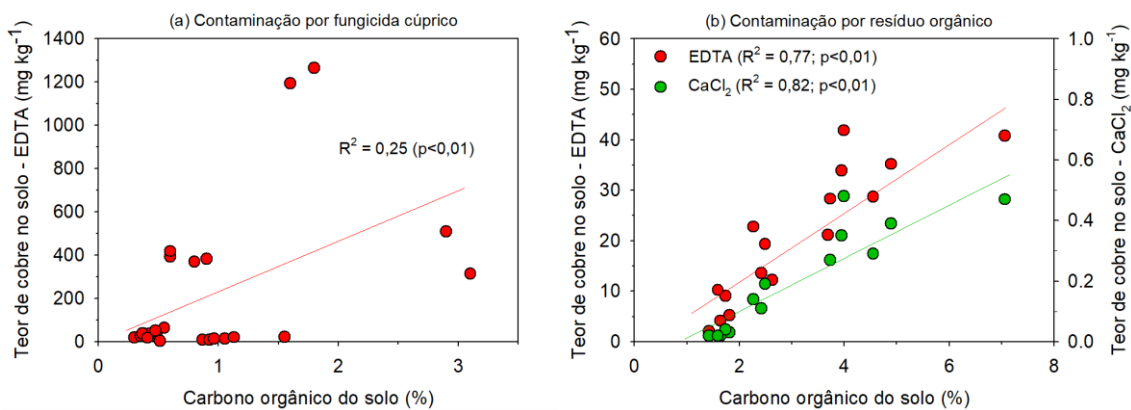
Para solos contaminados por fungicidas cúpricos e resíduos orgânicos também foi possível observar que a contaminação por Cu não ocorre apenas na camada superficial do solo, se estendendo para camadas mais profundas, entre 20 e 60 cm de profundidade (Figura 12). Isso geralmente ocorre quando o solo se encontra saturado, então mesmo tendo baixa mobilidade, o Cu percola por entre os perfis do solo (COUTO *et al.*, 2016). Os teores disponíveis de Cu nos solos apresentaram relação direta com os teores de carbono orgânico, com maiores valores de coeficiente de determinação para solos contaminados por resíduos orgânicos (R<sup>2</sup> > 0,77) em comparação aqueles contaminados por fungicidas cúpricos (R<sup>2</sup> > 0,25) (Figura 13). Outros atributos de solo (pH e teor de argila) não apresentaram relação com os teores disponíveis de Cu.

**Figura 12 – Teor total de cobre (Cu) em solos brasileiros não-contaminados (referência) e contaminados por fungicida cúprico e resíduo orgânico em função da profundidade do solo**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

**Figura 13 – Teor de cobre (Cu) no solo usando solução extratora de EDTA (ácido etilenodiamino tetra-acético) e  $\text{CaCl}_2$  em função do teor de carbono orgânico em áreas contaminadas com fungicida cúprico (a) e resíduo orgânico (b) no Brasil**



**Equações de regressão: EDTA (fungicida) =  $233x - 12,30$ ; EDTA (resíduo) =  $7,47x - 2,74$ ;  $\text{CaCl}_2$  (resíduo) =  $0,09x - 0,09$ .**

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Estudos apontam que a contaminação por Cu em solos pode estar fortemente relacionada ao tempo de cultivo. No geral, quanto maior o tempo de cultivo, maior a contaminação por Cu. Em pesquisa conduzida por Miotto *et al.* (2017), em áreas de cultivo de videira no município de Santana do Livramento, estado do Rio Grande do Sul foram coletadas amostras de solo com tempo de cultivo de 2 a 32 anos e com histórico de aplicação de fungicida a base de Cu. O teor médio de Cu total em solos com até 15 anos de cultivo variaram de 13,8 a 31,2  $\text{mg kg}^{-1}$ . Já em solos provenientes de áreas com mais de 25 anos de cultivo, o teor médio de Cu foi de 90,3  $\text{mg kg}^{-1}$ . A concentração de Cu disponível teve comportamento semelhante ao teor total, já que em solos com até 15 anos de cultivo o teor médio de Cu disponível variou de 8,9 a 22,0  $\text{mg kg}^{-1}$  e em solos com mais de 25 anos, a concentração média foi igual a 73,8  $\text{mg kg}^{-1}$ .

A contaminação de solo por Cu também possui relação com as condições climáticas. Em áreas de cultivo de videiras, em regiões de verão seco, porém com ocorrência de frequentes chuvas durante o ciclo produtivo, doenças fúngicas como o míldio são favorecidas, necessitando de intervenção antrópica para o controle e manutenção das videiras. Além disso, em solos predominantemente argilosos, derivados de rochas sedimentares, mais ácidos, arenosos e de baixa CTC, a contaminação por Cu pode ser favorecida (MIOTTO *et al.*, 2017).

Em relação a profundidade do solo, Korchagin *et al.* (2020), obtiveram resultados de Cu trocável entre 700 – 1000  $\text{mg kg}^{-1}$  em 20 – 40 cm e concentrações

de até  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  entre 40 – 50 cm, apontando que o Cu pode percolar por entre as camadas mais profundas do solo, não se limitando apenas a superfície. Corroborando trabalho realizado por Iñigo *et al.* (2020), que obtiveram resultados de teor de Cu de até  $96,64 \text{ mg kg}^{-1}$  entre 40 – 60 cm.

Estudos demonstram que, no geral, quanto mais próximo o solo está da fonte, maior é a contaminação. Jafari *et al.* (2020), realizaram pesquisa com amostras de solo coletadas em local próximo a um complexo industrial de fundição de Cu e Pb, na Austrália. Na área de fundição de Cu de Port Kembla, o teor de Cu variou entre um máximo de  $6240 \text{ mg kg}^{-1}$  a um mínimo de  $21 \text{ mg kg}^{-1}$ . O teor diminuiu conforme as amostras de solo eram coletadas afastando-se da área de fundição.

Em relação ao Igeo de Cu, contaminações provenientes de atividade de mineração apontam para solos altamente poluídos e em contrapartida, em áreas de despejo de resíduos sólidos para poluição moderada, no geral.

Em pesquisa realizada por Khosaravi; Saadat; Dabiri (2020), na mina de Cu de Taknar, no Irã, amostras de solo foram coletadas próximas a área de mineração, assim como em localidades mais distantes, como em vilas na região. A concentração de Cu no solo da região estudada variou de  $29,3 \text{ mg kg}^{-1}$  a valores acima de  $10000 \text{ mg kg}^{-1}$ . O Igeo calculado variou de  $-0,07$  –  $2,1$  e apresentou resultado moderado a altamente poluído nas áreas de mineração e processamento.

Gujre; Rangan; Mitra (2020), realizaram pesquisa em área de despejo de resíduos (orgânicos, oligoelementos -plásticos, vidro, metal- e não biodegradáveis - resíduos de combustíveis e veículos abandonados) na Índia. O Igeo de Cu no solo apontou para uma contaminação de moderada (80% das amostras) a fortemente contaminada (10% das amostras). Somani *et al.* (2020), ao analisarem cinco áreas de lixão na Índia, obtiveram Igeo variando de 4,08 a 4,91, indicando nível de contaminação por Cu alto a muito alto. Ao analisar sedimentos de dois riachos na Polônia, com proximidade a área de presença de telhados cobertos com chapa de Cu, os valores obtidos para o Igeo de Cu foram considerados de moderado a alto (3,9; 5,1 – em uma escala de 1 – 5) (WOJCIECHOWSKA *et al.*, 2019). Chowdhury; Rasid (2021), ao estudarem amostras de solo provenientes de área de desmanche de navios em Bangladesh, obtiveram resultados de moderada a alta contaminação por Cu ao calcularem o Igeo (2 – 3).

### 5.3 Etapa 3: Riscos ecológicos e mitigação da contaminação por cobre em solos

Os estudos brasileiros sobre os riscos ecológicos associados com a contaminação dos solos com Cu têm concentrado seus esforços sobretudo nos efeitos em organismos edáficos e aquáticos e, em menor intensidade, nos efeitos em plantas cultivadas e na composição dos alimentos dessas plantas (Figura 14). Em síntese, organismos edáficos (e.g., minhocas, colêmbolos, nematóides e formigas epigéicas) e algumas plantas cultivadas (e.g., videira) podem ser prejudicados diretamente pelo excesso de Cu no solo, enquanto os efeitos negativos para organismos aquáticos ocorrem principalmente devido ao aumento de Cu na água devido aos processos de erosão e lixiviação de solos contaminados. Além disso, dependendo do grau de contaminação do solo com Cu em agrossistemas pode ocorrer uma expressiva transferência desse elemento para alimentos consumidos por humanos.

Figura 14 – Modelo esquemático sobre os riscos ecológicos associados a contaminação com cobre (Cu) no solo que têm sido estudados no Brasil



A contaminação do solo com Cu pode afetar negativamente: organismos edáficos (Simões et al., 2020; Philippsen et al., 2021); o crescimento de videira (De Conti et al., 2019) e aumentar os teores do elemento na uva (Hummes et al., 2019; Hoeltgebaum et al., 2021). A lixiviação e erosão de solo contaminado com Cu para o ambiente aquático pode causar alterações em organismos desse ambiente (Loureiro et al., 2021; Perlatti et al., 2021; Pompermaier et al., 2021).

Fonte: Autoria própria (2023)

Os riscos ecológicos relacionados a contaminação por Cu estão fortemente ligados aos efeitos negativos sobre organismos edáficos e aquáticos. Em área de mina de Cu no Irã, elevados teores de Cu (concentrações iguais ou maiores que 10.000 mg kg<sup>-1</sup> no solo e 0,24 mg kg<sup>-1</sup> em água), apontam para grande prejuízo ambiental e alta poluição com metal pesado e tóxico, inviabilizando o uso do solo e água (KHOSARAVI; SAADAT; DABIRI, 2020).

Pu *et al.* (2019), realizaram pesquisa na bacia hidrográfica de Xiaojiang, cuja água é utilizada para irrigação de arroz na China. A utilização da água do rio Xiaojiang, que recebe o despejo de rejeitos das minas de Cu presentes na região, contribuiu para a elevação do teor de Cu no solo, inviabilizando o uso para a agricultura. Além disso, a média da concentração de Cu nos grãos de arroz atingiu valor elevado (238 mg kg<sup>-1</sup>), apresentando risco para a saúde e maior propensão a doenças cancerígenas.

Okkenhaug *et al.* (2018) obteve concentrações de Cu nas amostras de água do riacho que cortava um campo de tiro iguais a 24,0 µg L<sup>-1</sup>. Esta concentração está ligada a propagação de Cu a níveis tóxicos para organismos aquáticos. Soroldoni *et al.* (2021), ao submeter minhocas da espécie *Eisenia andrei* a solos contaminados com 1,50% de partículas de tinta anti-incrustante e solo de estaleiro contaminado, obtiveram a maior porcentagem de mortalidade desde os primeiros dias de exposição, assim como, analisaram a redução da biomassa das minhocas submetidas a solo contaminado. Foi observado que não houve reprodução de minhocas expostas a solo contaminado com 0,14 e 1,50% de tinta anti-incrustante.

Elevados teores de Cu em solo podem apresentar efeitos negativos em cultivares, afetando seu desenvolvimento ou até mesmo acumulando teor de Cu, assim como afetar a comunidade microbiana presente. Hoeltgebaum *et al.* (2021), ao analisar a concentração de Cu em videiras cultivadas no Brasil, encontraram valor de 38,1 mg kg<sup>-1</sup> na casca da uva, teor considerado elevado.

Fagnano *et al.* (2020), realizaram estudo de determinação de teor de Cu em frutas e vegetais, em solo altamente contaminado (1700 mg kg<sup>-1</sup>) por constante aplicação de fungicida cúprico na Itália. Os resultados obtidos não apontaram risco para a saúde humana no consumo destes alimentos a curto prazo, contudo a pesquisa enfatiza que, a longo prazo no que depende da dieta de cada pessoa, pode haver acúmulo de Cu no organismo, o que pode ser um risco. Além disso, a presença de elevados teores de Cu foi responsável por realizar seleção da microbiota do solo estudado, ou seja, influenciou na comunidade microbiana ali presente, impactando

toda uma cadeia trófica, assim como alterando características físicas, químicas e principalmente biológicas do solo. Corrobora trabalho realizado por Chowdhury; Rasid (2021), que apontou diminuição de 80% no desenvolvimento de fungos e bactérias em solos agricultáveis próximos a áreas de lixiviação, queima e desmanche de navios, em Bangladesh.

De forma isolada ou associada com a aplicação de fertilizantes, condicionadores de solo e fungos, a fitorremediação tem recebido grande atenção como estratégia de mitigação da contaminação dos solos com Cu. As pesquisas apontam para uma ampla variação de capacidade de espécies vegetais em absorver e transportar Cu para parte aérea, indicado pelo índice de translocação (IT). Espécies nativas de porte arbóreo (e.g., *Cedrela fissilis* e *Myracrodruon urundeuva*) apresentam teores bastante elevados de Cu nas raízes ( $>2.600 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e parte aérea ( $>1.600 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Em geral, as espécies herbáceas apresentam menores teores de Cu em seus tecidos, mas é possível destacar as espécies *Bidens pilosa*, *Mucuna cinereum*, *Mucuna aterrina*, *Canavalia ensiformis* e *Avena sativa*, com teores de Cu nas raízes entre 473 e 2.819  $\text{mg kg}^{-1}$ , enquanto na parte aérea os teores ficaram entre 50 e 234  $\text{mg kg}^{-1}$ . Com relação às práticas que são utilizadas em associação com a fitorremediação, verifica-se que a inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em plantas favorece o aumento da acumulação de Cu no sistema radicular (Tabela 6).

Em busca da mitigação da contaminação por Cu em solos, a eficácia do uso de calcário e vermicomposto na imobilização e diminuição da toxicidade por Cu é apontada por estudos. Ferreira *et al.* (2018), testou concentrações de 3  $\text{mg ha}^{-1}$  de calcário e 30  $\text{g kg}^{-1}$  de vermicomposto de bagaço de uva em argissolo contaminado com 87,5  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cu, com histórico de 30 anos de aplicação de fungicida cúprico em Santana do Livramento, Rio Grande do Sul. A aplicação dos condicionantes resultou em aumento de pH do solo (7,1; 7,4, respectivamente, enquanto que o pH inicial era de 5,6) e houve aumento de carbono orgânico com a adição do vermicomposto (10,7  $\text{g kg}^{-1}$ , em comparação a concentração inicial de 6,7  $\text{g kg}^{-1}$ ). Com a aplicação do vermicomposto, houve significativo decréscimo do teor de Cu disponível (22,7  $\text{mg kg}^{-1}$ ) e aumento de 85% da área foliar das videiras (332 para 613  $\text{cm}^2$ ). Corrobora trabalho realizado por Comin *et al.* (2018), que com a aplicação de 1,5  $\text{mg ha}^{-1}$  de calcário resultou em aumento de pH e redução da toxicidade de Cu em plantas de aveia preta, em solo com histórico de aplicação de fungicida cúprico.

**Tabela 6 – Teores médios de cobre (Cu) no solo, raiz e parte aérea das plantas, índice de translocação (IT) e estratégias para mitigação da contaminação do solo no Brasil**

Tratamento	Cu solo	Cu raiz	Cu parte aérea	TI	MS raiz	MS parte aérea	Referência
Fitorremediação							
	mg kg <sup>-1</sup>			%	g planta <sup>-1</sup>		
<i>Cedrela fissilis</i>	3050 <sup>(g)</sup>	5800	2530	46	1,5	2,0	Asensio <i>et al.</i> (2019)
<i>Myracrodruon urundeuva</i>	3050 <sup>(g)</sup>	2600	1627	55	4,0	1,7	Asensio <i>et al.</i> (2019)
<i>Bidens pilosa</i>	5409 <sup>(b)</sup>	2819	234	7,7	nd	nd	Perlatti <i>et al.</i> (2015)
<i>Mucuna cinereum</i>	600 <sup>(g)</sup>	1866	85	4,3	1,0	4,0	Vendrusculo <i>et al.</i> (2018)
<i>Mucuna aterrina</i>	600 <sup>(g)</sup>	1357	93	6,4	1,9	7,5	Vendrusculo <i>et al.</i> (2018)
<i>Canavalia ensiformis</i>	600 <sup>(g)</sup>	473	138	22,6	0,8	6,0	Vendrusculo <i>et al.</i> (2018)
<i>Avena sativa</i>	174 <sup>(a)</sup>	1400	50	3,4	0,1	0,3	Andreazza <i>et al.</i> (2010)
<i>Raphanus sativus</i>	1,5 <sup>(f)</sup>	28,2	12,3	30,4	1,8	5,0	Santos <i>et al.</i> (2010)
<i>Rumex obtusifolius</i>	145 <sup>(e)</sup>	21,6	34,3	61,4	1,6	0,5	Melo <i>et al.</i> (2021)
<i>Amaranthus crenatus</i>	1,6 <sup>(f)</sup>	11,1	22,0	66,5	0,4	5,0	Santos <i>et al.</i> (2010)
<i>Brassica juncea</i>	1,8 <sup>(f)</sup>	4,7	21,7	82,1	0,8	5,3	Santos <i>et al.</i> (2010)
<i>Ricinus communis</i>	576,0 <sup>(a)</sup>	531	13,3	2,4	1,4	1,1	Andreazza <i>et al.</i> (2013)
<i>Crotalaria juncea</i>	44,0 <sup>(d)</sup>	205	80	28,1	0,1	0,4	Ferreira <i>et al.</i> (2018)
<i>Arachis pintoi</i>	576,0 <sup>(a)</sup>	450	65	12,6	0,3	0,2	Andreazza <i>et al.</i> (2011)
<i>Lolium multiflorum</i>	145 <sup>(e)</sup>	187,5	11,1	5,6	5,5	2,6	Melo <i>et al.</i> (2021)
Fitorremediação + Biorremediação							
<i>Avena sativa</i> + bactéria	174 <sup>(a)</sup>	1160	63	5,3	0,2	0,4	Andreazza <i>et al.</i> (2010)
<i>Crotalaria juncea</i> + FMA	44,0 <sup>(d)</sup>	580	45	7,2	0,2	0,8	Ferreira <i>et al.</i> (2018)
<i>Crotalaria juncea</i> + P + FMA	44,0 <sup>(d)</sup>	520	52	9,1	2,0	2,2	Ferreira <i>et al.</i> (2018)
<i>Canavalia ensiformis</i> + FMA	76,2 <sup>(e)</sup>	120	12,2	9,2	0,8	6,0	Santana <i>et al.</i> (2015)
<i>Canavalia ensiformis</i> + FMA	91,1 <sup>(e)</sup>	62	16	20,5	1,2	11,0	Santana <i>et al.</i> (2019)
<i>Canavalia ensiformis</i> + FMA + minhoca	101,4 <sup>(e)</sup>	32,5	18	35,6	1,6	11,3	Santana <i>et al.</i> (2019)
<i>Canavalia ensiformis</i> + Vermicomposto + FMA	76,2 <sup>(e)</sup>	115,5	11,5	12,3	1,5	9,3	Santana <i>et al.</i> (2015)
<i>Jacaranda mimosifolia</i> + FPCP	200 <sup>(g)</sup>	54,1	18,8	18,0	14,0	13,5	Farias <i>et al.</i> (2020)
<i>Jacaranda mimosifolia</i> + FPCP + biocarvão	200 <sup>(g)</sup>	43,5	19,2	30,6	12,9	14,1	Farias <i>et al.</i> (2020)
<i>Canavalia ensiformis</i> + minhoca	106,9 <sup>(e)</sup>	45	19,5	30,2	1,1	6,8	Santana <i>et al.</i> (2019)
Fitorremediação + Condicionadores de solo							
<i>Jacaranda mimosifolia</i> + biocarvão	200 <sup>(g)</sup>	53,6	12,4	18,8	10,3	11,4	Farias <i>et al.</i> (2020)
<i>Ricinus communis</i> + torta de filtro	334,0 <sup>(b)</sup>	32,9	20	14,3	5,7	20,5	Abreu <i>et al.</i> (2012)
<i>Ricinus communis</i> + turfa	334,0 <sup>(b)</sup>	17,3	19,5	23,1	5,1	19,8	Abreu <i>et al.</i> (2012)

**MS, massa seca; IT, índice de translocação; FPCP, fungos promotores do crescimento de plantas; FMA, Fungo micorrízico arbuscular; P, fósforo; nd, não determinado. Teores de Cu extraídos por: <sup>(a)</sup>HCl, <sup>(b)</sup>pseudo total, <sup>(c)</sup>total; <sup>(d)</sup>EDTA, <sup>(e)</sup>Mehlich-1, <sup>(f)</sup>CaCl<sub>2</sub>. <sup>(g)</sup>Quantidade adicionada ao solo.**

**Fonte: Autoria própria (2023)**

A dinâmica do Cu em solos está relacionada a fatores químicos, físicos e biológicos. Dentre os fatores químicos, o controle do pH é o mais importante, isso porque, a proporção de Cu trocável em solo tende a diminuir com o aumento de pH. A adsorção de Cu em solo está relacionada a capacidade de troca de cátions, que também depende do pH, ou seja, quando o solo está com pH mais ácido, com valores

abaixo de 5,0, o alumínio (Al) se torna mais solúvel, resultando em competição por sítios de adsorção com o Cu. Quando o pH do solo é corrigido para valores mais neutros à básicos (próximo a 7,0), a acidez é reduzida, com a consequente diminuição do teor de Al em solo, o que reduz a competição, aumentando a adsorção específica dos metais pesados (ARAÚJO *et al.*, 2002).

Em pesquisa realizada por Panziera *et al.* (2018), solo coletado em mata nativa nas dependências da Embrapa uva e vinho, no município de Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, foi submetido a aplicação de concentrações de até 180 mg kg<sup>-1</sup> de Cu via sulfato de Cu II (CuSO<sub>4</sub>). Os solos contaminados foram submetidos a calagem para elevar a 6,0 o pH do solo e então foi cultivada sementes de aveia preta (*Avena strigosa*). Os valores obtidos para altura do colmo e diâmetro de aveia em concentração de 180 mg kg<sup>-1</sup> foram satisfatórios (70,02 e 8,96 cm, respectivamente), apontando um crescimento saudável das plantas e concordando com valores presentes na literatura. O teor total de massa seca (raízes, caule e folhas) obteve aumento significativo na dosagem de 180 mg kg<sup>-1</sup> de Cu (188,58 mg kg), em relação a amostra referência (97,92 mg kg). O índice de translocação (IT) de Cu na planta foi igual a 16,57% em teor de Cu igual a 135 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto que apresentou valor de 18,32% no tratamento controle. Assim, a aveia preta demonstrou grande capacidade de tolerar e se adaptar frente a intensa contaminação por Cu, além de contribuir para maior ciclagem de nutrientes e extração de teores de Cu.

Em pesquisa realizada por Santana *et al.* (2019), para a remediação de solo contaminado com 100 mg kg<sup>-1</sup> de CuSO<sub>4</sub> no Rio Grande do Sul, foram utilizados tratamentos com fungos micorrízicos arbusculares e minhocas da espécie *Eisenia andrei* juntamente com *Canavalia ensiformis*. Os tratamentos com fungo e minhoca foram responsáveis pela diminuição de 64% do Cu disponível. A interação também contribuiu para significativo aumento da massa seca parte aérea e raiz, com 81% de acúmulo de Cu na parte aérea e 33% de aumento na massa seca de raiz. A acumulação de Cu em *Canavalia ensiformis* aumentou em 200% com o tratamento contendo a presença de fungo e minhoca.

Farias *et al.* (2020), utilizaram consórcio entre fungos (*Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, *Pochonia chlamydosporia*, *Purpureocillium lilacinum* e *Trichoderma asperella*) biocarvão (produzido a base de madeira de *Citriodora sp.*) e *Jacaranda mimosifolia* para a remediação de solo contaminado com Cu (200 mg kg<sup>-1</sup>), no Brasil. Quanto a massa seca e fresca de raiz, houve aumento no



desenvolvimento em comparação ao solo contaminado, apenas (8,46 – 12,94 e 10,30 – 17,48, respectivamente). Também houve o aumento de massa seca e fresca parte aérea em relação ao solo contaminado (10,37 – 14,10 e 16,96 – 25,28, respectivamente). O total de Cu acumulado na parte aérea foi 206% maior quando relacionado ao consórcio de fungos e biocarvão e o percentual de lixiviação de Cu diminuiu. Os resultados apontaram para uma potencialização da fitorremediação de solo contaminado com Cu, utilizando *Jacaranda mimosifolia* em consórcio com fungos e biocarvão.

## 6 CONCLUSÃO

A temática “Ciência do meio ambiente” está relacionada às principais atividades ligadas à contaminação por Cu em solos brasileiros, assim como a produção científica no Brasil está concentrada principalmente na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), seguida da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRG). Em relação ao ano de publicação, a contaminação por Cu em solos derivada de atividades de mineração e cultivo de videiras obtiveram as maiores médias de produção científica com 2,8 e 2,1 artigos por ano, publicados entre os anos de 2003 à 2021 e 2007 a 2023, respectivamente.

Os principais estudos relacionados à contaminação por Cu em solos brasileiros estão relacionados a aplicação de fungicidas cúpricos em áreas de plantio de videiras, em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul e a aplicação de resíduos orgânicos, com destaque para dejetos suínos, em solos agricultáveis.

Os maiores valores médios de teor total de Cu e Igeo em solo são provenientes de rejeito de mineração de Cu. O Igeo de solos com aplicação de fungicida cúprico, resíduo orgânico e material particulado podem atingir nível moderado a alto, enquanto partículas de tinta anti-incrustante se destacam pelo elevado potencial de contaminação. Em relação à contaminação proveniente de aplicação de fungicidas a base de Cu há uma relação de equivalência entre o tempo de cultivo e a contaminação por Cu.

A principal consequência da contaminação por Cu é o efeito negativo em organismos edáficos e aquáticos. Na busca pela remediação de solos contaminados com Cu no Brasil a utilização de espécies vegetais como *Bidens pilosa*, *Mucuna cinereum*, *Mucuna aterrina*, *Canavalia ensiformis* e *Avena sativa* associadas ou não a condicionantes e fertilizantes, com destaque para a inoculação de fungos micorrízicos arbusculares, são capazes de promover o acúmulo de Cu em sistema radicular e parte aérea.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A. de. et al. **Phytoremediation of a soil contaminated by heavy metals and boron using castor oil plants and organic matter amendments.** Journal of Geochemical Exploration, v. 123, p. 3-7, 2012.
- ALI, H., KHAN, E., SAJAD, M. A. **Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications.** Chemosphere, v. 91, n. 7, p. 869-881, 2013.
- AMPHALOP, N. et al. **Ecological risk assessment of arsenic, cadmium, copper, and lead contamination in soil in e-waste separating household area, Buriram province, Thailand.** Environmental Science and Pollution Research, v. 27, n. 35, p. 44396-44411, 2020.
- ANDREAZZA, R. et al. **Use of high-yielding bioenergy plant castor bean (*Ricinus communis* L.) as a potential phytoremediator for copper-contaminated soils.** Pedosphere, v. 23, n. 5, p. 651-661, 2013.
- ANDREAZZA, R. et al. **Potential phytoextraction and phytostabilization of perennial peanut on copper-contaminated vineyard soils and copper mining waste.** Biological trace element research, v. 143, p. 1729-1739, 2011.
- ANDREAZZA, R. et al. **Bacterial stimulation of copper phytoaccumulation by bioaugmentation with rhizosphere bacteria.** Chemosphere, v. 81, n. 9, p. 1149-1154, 2010.
- ARAÚJO, W.S. et al. **Relação entre adsorção de metais pesados e atributos químicos e físicos de classes de solo no Brasil.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, p.17 – 27, 2002.
- ASENSIO, V. et al. **The potential of a Technosol and tropical native trees for reclamation of copper-polluted soils.** Chemosphere, v. 220, p. 892-899, 2019.
- BALLABIO, C. et al. **Copper distribution in European topsoils: An assessment based on LUCAS soil survey.** Science of the Total Environment, v. 636, p. 282-298, 2018.
- BARBOSA, J. Z. et al. **Assessing soil contamination in automobile scrap yards by portable X-ray fluorescence spectrometry and magnetic susceptibility.** Environmental monitoring and assessment, v. 192, n. 1, p. 1-10, 2020.
- BASSO, C. J. et al. **Teores totais de metais pesados no solo após aplicação de dejetos líquidos de suínos.** Ciência Rural, 42, 653-659, 2012.
- BENEDET, L. et al. **Physiological changes in maize grown in soil with copper and zinc accumulation resulting from the addition of pig slurry and deep litter over 10 years.** Water, Air, & Soil Pollution, v. 227, n. 11, p. 1-15, 2016.

BENEDET, L. et al. **Copper and Zn distribution in humic substances of soil after 10 years of pig manure application in south of Santa Catarina, Brazil.** Environmental geochemistry and health, v. 42, n. 10, p. 3281-3301, 2020.

BETANCUR-AGUDELO, M., MEYER, E., LOVATO, P. E. **Arbuscular mycorrhizal fungus richness in the soil and root colonization in vineyards of different ages.** Rhizosphere, v. 17, p. 100307, 2021.

BOLAN, N. S. **A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants.** Plant and soil, v. 134, n. 2, p. 189-207, 1991.

BRASIL. **Resolução nº420, de 28 de dezembro de 2009.** Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acs.pdf>. Acesso em: 20 set. 2022.

BRUNETTO, G. et al. **Copper and zinc fractions in the profile of an Inceptisol cultivated with apple in southern Brazil.** Bragantia, v. 77, n. 2, p. 333-347, 2018(a).

BRUNETTO, G. et al. **Copper and zinc accumulation, fractionation and migration in vineyard soils from Santa Catarina State, Brazil.** Bragantia, v. 77, n. 1, p. 141-151, 2018(b).

BRUNETTO, G. et al. **Heavy metals in vineyards and orchard soils.** Revista Brasileira de Fruticultura, v. 39, 2017.

BRUNETTO, G., et al. **Frações de cobre e zinco em solos de vinhedos no Meio Oeste de Santa Catarina.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, n. 8, p. 805-810, 2014.

CASALI, C. A. et al. **Formas e dessorção de cobre em solos cultivados com videira na Serra Gaúcha do Rio Grande do Sul.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, n. 4, p. 1479-1487, 2008.

CASSELLA, R. J. et al. **Distribution of copper in the vicinity of a deactivated mining site at Carajas in the Amazon region of Brazil.** Journal of hazardous materials, v. 142, n. 1-2, p. 543-549, 2007.

CESAR, R. et al. **Influence of the properties of tropical soils in the toxicity and bioavailability of heavy metals in sewage sludge-amended lands.** Environmental Earth Sciences, v. 66, n. 8, p. 2281-2292, 2012.

CHILESHE, M. N. et al. **Physico-chemical characteristics and heavy metal concentrations of copper mine wastes in Zambia: implications for pollution risk and restoration.** Journal of Forestry Research, v. 31, n. 4, p. 1283-1293, 2020.

CHOWDHURY, N., RASID, M. M. **Heavy metal concentrations and its impact on soil microbial and enzyme activities in agricultural lands around ship yards in Chattogram, Bangladesh.** Soil Science Annual, v. 72, n. 2, p. 135994, 2021.

COELHO, D. G. et al. **Evaluation of metals in soil and tissues of economic-interest plants grown in sites affected by the Fundão dam failure in Mariana, Brazil.** Integrated Environmental Assessment and Management, v. 16, n. 5, p. 596-607, 2020.

COELHO, F. C. et al. **Agricultural use of copper and its link to Alzheimer's disease.** Biomolecules, v. 10, n. 6, p. 897, 2020.

COSTA, M. P. et al. **A socio-eco-efficiency analysis of integrated and non-integrated crop-livestock-forestry systems in the Brazilian Cerrado based on LCA.** Journal of Cleaner Production, v. 171, p. 1460-1471, 2018.

COUTO, R. R., et al. **Accumulation of copper and zinc fractions in vineyard soil in the mid-western region of Santa Catarina, Brazil.** Environmental earth sciences, v. 73, n. 10, p. 6379-6386, 2015.

COUTO, R. R. et al. **Accumulation and distribution of copper and zinc in soils following the application of pig slurry for three to thirty years in a microwatershed of southern Brazil.** Archives of Agronomy and Soil Science, v. 62, n. 5, p. 593-616, 2016.

CURY, A. **O vendedor de sonhos 2: A revolução dos anônimos.** DreamSellers Pictures, 2021.

DA SILVA JÚNIOR, F. M. R. et al. **Genotoxic damage in coelomocytes of Eisenia andrei exposed to urban soils.** Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, v. 842, p. 111-116, 2019.

DE CONTI, L., CERETTA, C. A., FERREIRA, P. A., LOURENZI, C. R., GIROTTO, E., LORENSINI, F., TIECHER, T. L., MARCHEZAN C., ANCHIETA, M. G., BRUNETTO, G. **Soil solution concentrations and chemical species of copper and zinc in a soil with a history of pig slurry application and plant cultivation.** Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 216, p. 374-386, 2016.

DE CONTI, L. et al. **Intercropping of young grapevines with native grasses for phytoremediation of Cu-contaminated soils.** Chemosphere, v. 216, p. 147-156, 2019.

DE CONTI, L., et al. **Growth and chemical changes in the rhizosphere of black oat (*Avena strigosa*) grown in soils contaminated with copper.** Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 163, p. 19-27, 2018.

FAGNANO, M., et al. **Copper accumulation in agricultural soils: Risks for the food chain and soil microbial populations.** Science of The Total Environment, v. 734, p. 139434, 2020.

FAOSTAT. Data. 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 08 ago. 2021.

FARIAS, C. P., ALVES, G. S., OLIVEIRA, D. C., DE MELO, E. I., AZEVEDO, L. C. B. **A consortium of fungal isolates and biochar improved the phytoremediation potential of Jacaranda mimosifolia D. Don and reduced copper, manganese, and zinc leaching.** Journal of Soils and Sediments, v. 20, n. 1, p. 260-271, 2020.

FERREIRA, P. A. et al. **Soil amendment as a strategy for the growth of young vines when replanting vineyards in soils with high copper content.** Plant Physiology and Biochemistry, v. 126, p. 152-162, 2018.

FISHEL, F.M. **Pest Management and Pesticides: A Historical Perspective.**

Disponível

em:[http://moodle.toxoer.com/pluginfile.php/8421/mod\\_imscp/content/1/Pest\\_Management\\_and\\_Pesticides.pdf](http://moodle.toxoer.com/pluginfile.php/8421/mod_imscp/content/1/Pest_Management_and_Pesticides.pdf). Acesso em: 24 abr. 2020.

FORMENTINI, T. A., MALLMANN, F. J. K., PINHEIRO, A., FERNANDES, C. V. S., BENDER, M. A., DA VEIGA, M., DOS SANTOS, D. R., DOELSCH, E. **Copper and zinc accumulation and fractionation in a clayey Hapludox soil subject to long-term pig slurry application.** Science of the Total Environment, v. 536, p. 831-839, 2015.

FRAGOMENI, L. P. de M.; ROISENBERG, A., MIRLEAN, N. **Poluição por mercúrio em aterros urbanos do período colonial no extremo sul do Brasil.** Química Nova, v. 33, p. 1631-1635, 2010.

FU, K., LIU, L., FAN, L., LIU, T., CHEN, J. **Accumulation of copper in Trichoderma reesei transformants, constructed with the modified Agrobacterium tumefaciens-mediated transformation technique.** Biotechnology letters, v. 32, n. 12, p. 1815-1820, 2010.

FURTADO E SILVA, J. A. M. et al. **Mitigation of Heavy Metal Contamination in Soil via Successive Pig Slurry Application.** Soil and Sediment Contamination: An International Journal, v. 26, n. 7-8, p. 675-690, 2017.

GIROTTTO, E. et al. **Copper availability assessment of Cu-contaminated vineyard soils using black oat cultivation and chemical extractants.** Environmental monitoring and assessment, v. 186, n. 12, p. 9051-9063, 2014.

GIROTTTO, E. et al. **Biochemical changes in black oat (Avena strigosa Schreb) cultivated in vineyard soils contaminated with copper.** Plant Physiology and Biochemistry, v. 103, p. 199-207, 2016.

GUJRE, N., RANGAN, L., MITRA, S. **Occurrence, geochemical fraction, ecological and health risk assessment of cadmium, copper and nickel in soils contaminated with municipal solid wastes.** Chemosphere, v. 271, p. 129573, 2021.

- HOELTGEBAUM, D. et al. **Metals in Brazilian family farming grapes and estimated daily intake**. Food Additives & Contaminants: Part B, v. 14, n. 3, p. 236-243, 2021.
- HUGEN, C. et al. **Teores de Cu e Zn em perfis de solos de diferentes litologias em Santa Catarina**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi, v. 17, n. 6, p. 622–628, 2013.
- HUMMES, A. P. et al. **Transfer of copper and zinc from soil to grapevine-derived products in young and centenarian vineyards**. Water, Air, & Soil Pollution, v. 230, n. 7, p. 1-11, 2019.
- IÑIGO, V., MARÍN, A., ANDRADES, M., JIMÉNEZ-BALLESTA, R. **Evaluation of the copper and zinc contents of soils in the vineyards of La Rioja (Spain)**. Environments, v. 7, n. 8, p. 55, 2020.
- Jafari, Y., Jones, B. G., Pacheco, J. C., Umoru, S. **Trace element soil contamination from smelters in the Illawarra region, New South Wales, Australia**. Environmental Earth Sciences, v. 79, n. 15, p. 1-14, 2020.
- KABATA-PENDIAS, A., SZTEKE, B. **Trace elements in abiotic and biotic environments**. Taylor & Francis, 2015.
- KEBROM, T. H. et al. **Identification of phytotoxic levels of copper and nickel in commercial organic soil amendments recycled from poultry farms and municipal wastes**. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, v. 105, n. 6, p. 921-926, 2020.
- KHOSARAVI, M.; SAADAT, S.; DABIRI, R. **Evaluation of heavy metal contamination in soil and water resources around Taknar copper mine (NE Iran)**. Iranian Journal of Earth Sciences, v. 12, n. 3, p. 212-222, 2020.
- KLUMPP, A., HINTEMANN, T., LIMA, J. S., KANDELER, E. **Bioindication of air pollution effects near a copper smelter in Brazil using mango trees and soil microbiological properties**. Environmental Pollution, v. 126, n. 3, p. 313-321, 2003.
- KORCHAGIN, J. et al. **Distribution of copper and zinc fractions in a Regosol profile under centenary vineyard**. Environmental Earth Sciences, v. 79, n. 19, p. 1-13, 2020.
- KORF, E. P., MELO, E. F. R. Q., THOMÉ, A., ESCOSTEGUY, P. A. V. **Retenção de metais em solo da antiga área de disposição de resíduos sólidos urbanos de Passo Fundo - RS**. Revista de Ciências Ambientais, v. 2, n. 2, p. 43-60, 2008.
- KUMAR, V. et al. **Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review**. Chemosphere, v. 262, p. 127810, 2021.
- LANGE, C. N. et al. **Trace elements status in the terrain of an impounded vehicle scrapyards**. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, v. 311, n. 2, p. 1323-1332, 2017.

LI, X. et al. **Status of copper accumulation in agricultural soils across China (1985–2016)**. Chemosphere, v. 244, p. 125516, 2020.

LI, Z. et al. **A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment**. Science of the total environment, v. 468, p. 843-853, 2014.

LIMA, J. S. **Copper balances in cocoa agrarian ecosystems: effects of differential use of cupric fungicides**. Agriculture, ecosystems & environment, v. 48, n. 1, p. 19-25, 1994.

LOUREIRO, R. C. et al. **The influence of the environment in the incorporation of copper and cadmium in scraper insects**. Environmental Monitoring and Assessment, v. 193, p. 1-13, 2021.

MACHADO, M. E., MENEZES, J. D. S., COSTA, J. F. C. L., SCHNEIDER, I. A. H. **Análise e avaliação da distribuição de metais pesados em um antigo aterro de resíduos sólidos urbanos “Aterro Invernadinha”**. Evidência, Joaçaba, v. 1, n. 2, p. 69-82, 2011.

MAGALHÃES, S. S. D. A., WEBER, O. L. D. S. **Zinc and copper fractions in Oxisols of different textures fertilized with pig slurry**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 25, p. 386-392, 2021.

MARQUES, R. F. P. V. ET AL. **Impactos da disposição de resíduos sólidos urbanos no solo em municípios de Minas Gerais–Brasil**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 14, n. 03, p. 1382-1392, 2021.

MARTINS, C. D. et al. **Phytoremediation of soil multi-contaminated with hydrocarbons and heavy metals using sunflowers**. International Journal of Engineering & Technology, v. 14, n. 5, p. 1-6, 2014.

MATTIAS, J. L. et al. **Copper, zinc and manganese in soils of two watersheds in Santa Catarina with intensive use of pig slurry**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, n. 4, p. 1445-1454, 2010.

MELO, G. W. et al. **Identification and phytoremediation potential of spontaneous species in vineyard soils contaminated with copper**. International Journal of Phytoremediation, v. 24, n. 4, p. 342-349, 2022.

MILHOME, M. A. L., et al. **Diagnóstico da contaminação do solo por metais tóxicos provenientes de resíduos sólidos urbanos e a influência da matéria orgânica**. Revista virtual de química, v. 10, n. 1, p. 59-72, 2018.

MIOTTO, A. et al. **Copper uptake, accumulation and physiological changes in adult grapevines in response to excess copper in soil**. Plant and Soil, v. 374, n. 1, p. 593-610, 2014.

MIOTTO, A. et al. **Copper accumulation and availability in sandy, acid, vineyard soils**. Communications in soil science and plant analysis, v. 48, n. 10, p. 1167-1183, 2017.



MIRLEAN, N.; BAISCH, P.; MEDEANIC, S. **Copper bioavailability and fractionation in copper-contaminated sandy soils in the wet subtropics (Southern Brazil)**. Bulletin of environmental contamination and toxicology, v. 82, n. 3, p. 373-377, 2009.

MIRLEAN, N.; ROISENBERG, A.; CHIES, J. O. **Metal contamination of vineyard soils in wet subtropics (southern Brazil)**. Environmental Pollution, v. 149, n. 1, p. 10-17, 2007.

NAPOLI, M. et al. **Phytoextraction of copper from a contaminated soil using arable and vegetable crops**. Chemosphere, v. 219, p. 122-129, 2019.

NIEMEYER, J. C. et al. **Microbial indicators of soil health as tools for ecological risk assessment of a metal contaminated site in Brazil**. Applied Soil Ecology, v. 59, p. 96-105, 2012.

NOGUEIRA, T. A. R. et al. **Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination**. Journal of Environmental Management, v. 114, p. 168-177, 2013.

OKKENHAUG, G. et al. **Shooting range contamination: mobility and transport of lead (Pb), copper (Cu) and antimony (Sb) in contaminated peatland**. Journal of soils and sediments, v. 18, n. 11, p. 3310-3323, 2018.

OLIVEIRA, D. P., NÓBREGA, G.N., RUIZ, F., PERLATTI, F., SOARES A. A., OTERO, X.L., FERREIRA, T.O. **Risk assessment and copper geochemistry of an orchard irrigated with mine water: a case study in the semiarid region of Brazil**. Environmental geochemistry and health, v. 41, n. 2, p. 603-615, 2019.

OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M. **Metais pesados em solos de uma topolitossequência do Triângulo Mineiro**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, n. 4, p.785-796, 2004.

PANAGOS, P. et al. **Potential sources of anthropogenic copper inputs to European agricultural soils**. Sustainability, v. 10, n. 7, p. 2380, 2018.

PANZIERA, A. G. et al. **Potencial de fitoextração de cobre por aveia preta em área de vinhedos no sul do Brasil**. Revista Engenharia na Agricultura, v. 26, n. 6, p. 565, 2018.

PATEL, R., ASCHNER, M. **Commonalities between copper neurotoxicity and Alzheimer's disease**. Toxics, v. 9, n. 1, p. 4, 2021.

PENHA, H. G. V. et al. **Nutrient accumulation and availability and crop yields following long-term application of pig slurry in a Brazilian Cerrado soil**. Nutrient cycling in agroecosystems, v. 101, n. 2, p. 259-269, 2015.

PENTEADO, J. O. et al. **Health risk assessment in urban parks soils contaminated by metals, Rio Grande city (Brazil) case study**. Ecotoxicology and Environmental Safety, 208, 111737, 2021.

PEREIRA, A. A., BORGES, J. D., LEANDRO, W. M. **Metais pesados e micronutrientes no solo e em folhas de *Brachiaria decumbens* às margens de rodovias.** Bioscience Journal, v. 26, n. 3, 2010.

PERLATTI, F. et al. **Copper release from waste rocks in an abandoned mine (NE, Brazil) and its impacts on ecosystem environmental quality.** Chemosphere, 262, 127843, 2021.

PERLATTI, F. et al. **Copper accumulation and changes in soil physical-chemical properties promoted by native plants in an abandoned mine site in northeastern Brazil: Implications for restoration of mine sites.** Ecological Engineering, v. 82, p. 103-111, 2015.

PHILIPPSEN, D. F. et al. **Copper uses in organic production are safe to the nervous system of *Caenorhabditis elegans*?** Environmental Quality Management, v. 30, n. 4, p. 61-70, 2021.

PILON-SMITS, E. **Phytoremediation.** Annu. Rev. Plant Biol., v. 56, p. 15-39, 2005.

POMPERMAIER, A. et al. **Water and suspended sediment runoff from vineyard watersheds affecting the behavior and physiology of zebrafish.** Science of the Total Environment, v. 757, p. 143794, 2021.

PRABAGAR, S. et al. **Accumulation of heavy metals in grape fruit, leaves, soil and water: A study of influential factors and evaluating ecological risks in Jaffna, Sri Lanka.** Environmental and Sustainability Indicators, v. 12, p. 100147, 2021.

PRESTON, W., SILVA Y. J. A. B. DA., NASCIMENTO, C. W. A. DO., CUNHA, K. P. V DA., SILVA, D. J., FERREIRA., H. A. **Soil contamination by heavy metals in vineyard of a semiarid region: An approach using multivariate analysis.** Geoderma Regional, v. 7, n. 4, p. 357-365, 2016.

Pu, W. et al. **Effects of copper mining on heavy metal contamination in a rice agrosystem in the Xiaojiang River Basin, southwest China.** Acta Geochimica, v. 38, n. 5, p. 753-773, 2019.

ROBINSON, B. H. et al. **The potential of *Thlaspi caerulescens* for phytoremediation of contaminated soils.** Plant and Soil, v. 203, n. 1, p. 47-56, 1998.

RODRIGUES, B. B. et al. **Contamination of Urban Watersheds: the Case of Arroio Moinho, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil.** Anuário do Instituto de Geociências, v. 44, 2021.

ROVIELLO, V. et al. **Assessment of Copper and Heavy Metals in Family-Run Vineyard Soils and Wines of Campania Region, South Italy.** International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 18, n. 16, p. 8465, 2021.

SANTANA, N. A. et al. **Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and vermicompost on copper phytoremediation in a sandy soil.** Applied Soil Ecology, v. 96, p. 172-182, 2015.

SANTANA, N. A. et al. **Earthworms and mycorrhization increase copper phytoextraction by *Canavalia ensiformis* in sandy soil.** Ecotoxicology and environmental safety, v. 182, p. 109383, 2019.

SANTANA, N. A. et al. **Vermicompost dose and mycorrhization determine the efficiency of copper phytoremediation by *Canavalia ensiformis*.** Environmental Science and Pollution Research, v. 25, p. 12663-12677, 2018.

SANTANA, O. A. et al. **Nutrientes e metais no solo e em árvores de cerrado adjacentes a um aterro sanitário.** Cerne, v. 14, n. 3, p. 212-219, 2008.

SANTOS, G. C. G. dos et al. **Vegetable species for phytoextraction of boron, copper, lead, manganese and zinc from contaminated soil.** Scientia Agricola, v. 67, p. 713-719, 2010.

SHEN, X. L. et al. **Positive relationship between mortality from Alzheimer's disease and soil metal concentration in mainland China.** Journal of Alzheimer's Disease, v. 42, n. 3, p. 893-900, 2014.

SILVA, T. A. da C. et al. **Deposition of potentially toxic metals in the soil from surrounding cement plants in a karst area of Southeastern Brazil.** Conservation, v. 1, n. 3, p. 137-150, 2021.

SILVA JÚNIOR, F. M. R. da. et al. **Genotoxic damage in coelomocytes of *Eisenia andrei* exposed to urban soils.** Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, v. 842, p. 111-116, 2019.

SILVA, A. O. et al. **Chemical, physical, and biological attributes in soils affected by deposition of iron ore tailings from the Fundão Dam failure.** Environmental Monitoring and Assessment, v. 193, n. 8, p. 462, 2021.

SILVA, I. C. B. da et al. **Spatial variation of herbaceous cover species community in Cu-contaminated vineyards in Pampa biome.** Environmental Science and Pollution Research, v. 27, p. 13348-13359, 2020.

SILVA, J. P. S. da et al. **Heavy metals in soils and plants in mango orchards in Petrolina, Pernambuco, Brazil.** Revista Brasileira de Ciência do solo, v. 36, p. 1343-1354, 2012.

SIMÕES, B. F. et al. **Ecotoxicity test as an aid in the determination of copper guideline values in soils.** Ciência Rural, v. 50, 2020.

SOMANI, M. et al. **Contaminants in soil-like material recovered by landfill mining from five old dumps in India.** Process Safety and Environmental Protection, v. 137, p. 82-92, 2020.

SONODA, K. et al. **Copper and zinc in vineyard and orchard soils at millimeter vertical resolution.** *Science of the Total Environment*, v. 689, p. 958-962, 2019.

SOROLDONI, S. et al. **Antifouling paint particles in soils: toxic impact that goes beyond the aquatic environment.** *Ecotoxicology*, 30, 1161–1169, 2021.

SQUITTI, R. et al. **Copper imbalance in Alzheimer's disease: Meta-analysis of serum, plasma, and brain specimens, and replication study evaluating ATP7B gene variants.** *Biomolecules*, v. 11, n. 7, p. 960, 2021.

TIECHER, T. L. et al. **Forms and accumulation of copper and zinc in a sandy typic hapludalf soil after long-term application of pig slurry and deep litter.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 3, p. 812-824, 2013.

USGS. **United States Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2021.** Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/iron-ore-statistics-and-information>. Acesso em: 08 ago. 2021.

VENDRUSCOLO, D. et al. **Differential behavior of the summer cover crops in the absorption and translocation of copper.** *Ciência Rural*, v. 48, 2018.

VERDEJO, J. et al. **Thresholds of copper phytotoxicity in field-collected agricultural soils exposed to copper mining activities in Chile.** *Ecotoxicology and environmental safety*, v. 122, p. 171-177, 2015.

WAN, Y. et al. **Ecological risk of copper and zinc and their different bioavailability change in soil-rice system as affected by biowaste application.** *Ecotoxicology and environmental safety*, v. 192, p. 110301, 2020.

WOJCIECHOWSKA, E. et al. **Heavy metals in sediments of urban streams: Contamination and health risk assessment of influencing factors.** *Sustainability*, v. 11, n. 3, p. 563, 2019.

ZANELLO, S. et al. **Mineralogia e teores de cromo, níquel, cobre, zinco e chumbo nos solos no entorno do aterro sanitário da Caximba em Curitiba-PR.** *Scientia Agraria*, v. 10, n. 1, p. 51-60, 2009.

ZHONG, L. et al. **Alteration of Metal Elements in Radiation Injury: Radiation-Induced Copper Accumulation Aggravates Intestinal Damage.** *Dose-Response*, v. 18, n. 1, p. 1559325820904547, 2020.