

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA

EUGENIO FELICIANO DE MELO FILHO

**Bioindicadores como ferramenta de avaliação e monitoramento de *brownfields*  
provenientes de atividades industriais metalúrgicas: uma revisão do estado da arte**

São Paulo

2024

**Bioindicadores como ferramenta de avaliação e monitoramento de *brownfields*  
resultantes de atividades industriais metalúrgicas**

**Versão Corrigida**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de *Brownfields*.

Orientador: Allan Pretti Ogura

São Paulo

2024

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

#### Catálogo-na-publicação

MELO FILHO, EUGENIO FELICIANO DE

Bioindicadores como ferramenta de avaliação e monitoramento de brownfields provenientes de atividades industriais metalúrgicas: uma revisão do estado da arte / E. F. D. MELO FILHO -- São Paulo, 2024.  
45 p.

Monografia (MBA em Especialização: MBAPoli-USP Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
Departamento de Engenharia Química.

1.Contaminação por Elementos Potencialmente Tóxicos [EPTs] 2.Áreas contaminadas-gerenciamento 3.Meio ambiente-reabilitação 4.Indústrias Metalúrgicas 5.Gestão de Áreas Contaminadas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

## AGRADECIMENTOS

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, por disponibilizar o MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de *Brownfields*.

Aos professores do MBA, pelo valioso conhecimento compartilhado e experiências trazidas durante as aulas e encontros síncronos. À coordenação do MBA, agradeço o suporte técnico oferecido.

À CONSULTEC Consultoria e Engenharia Ambiental, sou grato pelo financiamento parcial do meu MBA.

Ao Allan Pretti Ogura, pela colaboração e rapidez no apoio às etapas de pesquisa e desenvolvimento da monografia.

À Izabel Barros, pelo companheirismo, apoio e contribuição com sugestões para o melhor desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais Reneuza Eleuterio dos Santos Melo e Eugenio Feliciano de Melo, pelo apoio e motivação durante o desenvolvimento do MBA.

## RESUMO

MELO FILHO, Eugenio Feliciano de. Bioindicadores como ferramenta de avaliação e monitoramento de *brownfields* provenientes de atividades industriais metalúrgicas: uma revisão do estado da arte. 2024. 45 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de *Brownfields*) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Os *brownfields* são terrenos negligenciados ou subutilizados, frequentemente associados a atividades industriais passadas. Especificamente, aqueles provenientes de indústrias metalúrgicas têm o potencial de estarem impactados por Elementos Potencialmente Tóxicos [EPTs] e representam um desafio significativo para a gestão ambiental. Diante desse cenário, o presente trabalho propôs uma análise da literatura sobre estratégias de utilização de bioindicadores com foco na avaliação e monitoramento do solo para gestão de áreas contaminadas e recuperação ambiental. A revisão sistemática abordou as metodologias, os bioindicadores selecionados, as características das áreas de estudo e as substâncias químicas avaliadas. Dos onze estudos analisados, nenhum foi conduzido no Brasil, destacando a necessidade de expandir pesquisas nesse contexto. As abordagens para o uso de bioindicadores enfatizaram a importância de considerar as características físicas, químicas e mineralógicas do solo, bem como o estágio sucessional de urbanização, especialmente em áreas metalúrgicas. A revisão também abordou a complexa relação entre as concentrações de EPTs, sua biodisponibilidade e os impactos ecológicos futuros, destacando a necessidade de adaptar as metodologias analíticas com base no conhecimento sobre a área de estudo, os bioindicadores a serem utilizados e a interação entre eles. O estudo demonstrou ainda que nematoides do solo, especialmente aqueles em níveis tróficos mais elevados, e a ordem Oribatida são bioindicadores promissores de solo impactado por EPTs. Destacaram-se os desafios na padronização de bioindicadores para avaliação do solo em *brownfields* metalúrgicos, ressaltando a importância de avançar na compreensão dos impactos dos EPTs. Esses resultados fornecem uma base para futuras pesquisas voltadas para a sustentabilidade urbana e a reabilitação de áreas contaminadas.

Palavras-chave: Contaminação por Elementos Potencialmente Tóxicos [EPTs]. Meio ambiente-reabilitação. Áreas contaminadas-gerenciamento. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

MELO FILHO, Eugenio Feliciano de. Bioindicators for assessing and monitoring *brownfields* resulting from metallurgical industrial activities: a state-of-the-art review. 2024. 45 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de *Brownfields*) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Brownfield sites are defined as neglected or underutilised areas that have been previously used for industrial purposes. These sites are often associated with past metallurgical activities and present a significant challenge for environmental management due to the potential impact of potentially toxic elements (PTEs). This paper proposes a literature review of strategies for using bioindicators with a focus on soil assessment and monitoring for contaminated site management and environmental remediation. The systematic review encompassed methodologies, selected bioindicators, characteristics of study areas and evaluated chemical substances. Of the eleven studies analysed, none were conducted in Brazil, underscoring the necessity to expand research in this context. The approaches to the use of bioindicators emphasised the significance of considering the physical, chemical, and mineralogical characteristics of the soil, as well as the successional stage of urbanisation, particularly in metallurgical areas. The review also addressed the complex relationship between PTE concentrations, their bioavailability, and future ecological impacts. It highlighted the need to adapt analytical methodologies based on knowledge about the study area, the bioindicators to be used and the interaction between them. Furthermore, the review showed that soil nematodes, especially those at higher trophic levels, and the order Oribatida are promising bioindicators of soil impacted by PTEs. The difficulties in standardising bioindicators for soil assessment in metallurgical brownfields were highlighted, emphasising the necessity of furthering the comprehension of the effects of PTEs. These outcomes provide a foundation for future research aimed at urban sustainability and the rehabilitation of contaminated areas.

Keywords: Potentially Toxic Element [PTEs]. Environment rehabilitation. Metallurgical industries. Management of contaminated areas. Sustainability.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Sistematização da literatura .....	22
Figura 2: Contagem da produção acadêmica resgatada por área industrial. ....	24
Tabela 3: Bioindicadores utilizados e metodologias aplicadas nos estudos selecionados. ....	30

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estudos analisados sobre bioindicadores em áreas de <i>brownfields</i> .....	23
Tabela 2: Caracterização das áreas de estudo e substâncias químicas avaliadas nos estudos selecionados.....	25



## LISTA DE SIGLAS

AI – Inteligência Artificial (do inglês, *Artificial Intelligence*)

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

EMI – Índice Eco-Morfológico (do inglês, *Eco-Morphological Index*)

EPT – Elementos Potencialmente Tóxicos (do inglês, *Potentially Toxic Element*)

FDA – Diacetato de Fluoresceína (do inglês, *fluorescein diacetate*)

GAC – Gerenciamento de Áreas Contaminadas

GSRS – Padrões Genéricos de Remediação do Solo (do inglês, *Generic Soil Remediation Standards*)

LBD – Fluxos de Trabalho Baseados em Literatura (do inglês, *Literature-Based*)

NLP – Métodos de Processamento de Linguagem Natural (do inglês, *Natural Language Processing*)

PAH – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (do inglês, *Polycyclic aromatic hydrocarbons*)

QBS – Biológico da Qualidade do Solo (do italiano, *Qualità Biologica del Suolo*)

VI – Valores de Intervenção

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	14
3. JUSTIFICATIVA.....	15
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
4.1. <i>Brownfields</i> e Contaminação por EPTs .....	16
4.2. Importância dos Bioindicadores na Avaliação Ambiental .....	18
5. MATERIAIS E MÉTODOS .....	20
5.1. Revisão sistemática .....	22
5.2. Caracterização dos estudos analisados: .....	25
5.3. Aplicação de bioindicadores na avaliação e monitoramento de <i>brownfields</i> metalúrgicos com solos potencialmente impactados por EPTs:.....	29
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39

## 1. INTRODUÇÃO

*Brownfields* são áreas cujo uso pretérito do solo envolveu instalações industriais e/ou comerciais, mas que foram abandonadas ou subutilizadas após o término dessas atividades. A reutilização dessas áreas pode ser dificultada pela presença ou potencial presença de substâncias perigosas, poluentes ou contaminantes (USC, 2002). Geralmente, os *brownfields* estão localizados em áreas urbanas que já possuem infraestrutura estabelecida, como malhas viárias e ferroviárias bem consolidadas (EEA, 2016). Uma vez que a impermeabilização do solo compromete os serviços ecossistêmicos (TOBIAS *et al.*, 2018), revitalizar os *brownfields* com base na sua vocação e nos interesses sociais (VASQUES e MENDES, 1992) possibilita a reintegração de suas características no ciclo econômico e evita que a expansão urbana avance sob áreas não impactadas (CLARINET, 2002).

Nesse cenário, destaca-se a Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009 (BRASIL, 2009), que estabelece diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas [GAC] no Brasil e define valores orientadores para os variados usos pretendidos para o solo. Esse instrumento aplica o conceito de reabilitação de áreas contaminadas para o uso declarado, ou seja, o projeto deve levar em conta o seu uso futuro (uso pretendido) e os valores das concentrações dos contaminantes identificados na área. Entretanto, o tema do GAC no Brasil tem sido tratado de maneira marginal, com muitos estados da Federação falhando no cumprimento dos requisitos mínimos estabelecidos para a gestão dessas ocorrências, incluindo a divulgação pública de dados sobre a existência de áreas impactadas (CANARIO e BETTINE, 2020). Segundo os autores, à época pesquisada, apenas São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro disponibilizavam informações, sendo que a maioria das áreas contaminadas cadastradas são oriundas de postos de combustíveis, atividades industriais, disposição de resíduos e atividades comerciais. A análise do Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas do Estado de São Paulo (CETESB, 2023a) revela que os principais grupos de contaminantes em áreas submetidas ao gerenciamento ambiental são os combustíveis automotivos (4806 áreas), solventes aromáticos (4468 áreas), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos [PAHs] (2855 áreas) e metais (1352 áreas).

As plantas industriais metalúrgicas enfrentam o risco de contaminação por Elementos Potencialmente Tóxicos [EPTs] ou *Potentially Toxic Element(s)*, os quais têm a capacidade de causar impactos significativos no ambiente e na saúde humana (FREEDMAN, 1995; ANDRADE *et al.*, 2009; POURRET; HURSTHOUSE, 2019; RIBÉ *et al.*, 2012;). Existem

evidências de áreas de atividades metalúrgicas com concentrações de EPTs em níveis considerados contaminantes, incluindo chumbo (Pb), cádmio (Cd), zinco (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni) e cromo (Cr) (RIBÉ *et al.*, 2012; ANDRADE *et al.*, 2009). Diante desse cenário, é importante avaliar criteriosamente os *brownfields* derivados dessas atividades. DOS SANTOS (2020) avaliou o impacto da atividade metalúrgica em uma dada área, no qual concluiu que as contaminações por EPTs persistem como um problema ambiental para os moradores locais, mesmo décadas após o encerramento das atividades poluentes.

Os Valores de Intervenção [VI] servem como metas de remediação para que se evite riscos à saúde humana e que, portanto, viabilizariam o uso de áreas contaminadas. Porém, outros receptores podem estar sujeitos a níveis de contaminação, levando em consideração o grau de interação desses receptores com os compartimentos ambientais afetados. Essa possibilidade jurídica de reabilitar uma área contaminada para o uso declarado permite que concentrações menos restritivas de contaminantes sejam aceitas no GAC, reduzindo os investimentos necessários para a execução do projeto. Esse cenário amplia a busca por ferramentas e soluções de remediação eficazes, tornando relevante considerar o uso de outras formas de avaliar e monitorar a qualidade dos compartimentos ambientais, além das usuais análises químicas. Nesse contexto, os bioindicadores podem ser importantes para o monitoramento e avaliação da qualidade dos compartimentos ambientais (SIMONE *et al.*, 2018; ABDULLAHI; IBRAHIM, 2018).

Bioindicadores são organismos vivos, como fungos, animais ou plantas, ou até mesmo produtos da atividade desses seres, que podem ser utilizados para detectar poluentes em um determinado ecossistema (ZAGHLOUL *et al.*, 2020). Conhecer as tolerâncias ou sensibilidades desses organismos à poluição é crucial para sua eficaz utilização (FRED, 2022). Os bioindicadores podem indicar qualitativamente a qualidade ambiental em relação à poluição com base em suas respostas a estímulos ambientais, sendo importante a calibração de todas as condições relevantes para garantir sua precisão (ZAGHLOUL *et al.*, 2020). Embora os bioindicadores forneçam informações sobre a qualidade ambiental, suas limitações exigem uma abordagem complementar para uma avaliação abrangente (ABDULLAHI; IBRAHIM, 2018; ZAGHLOUL *et al.*, 2020). Além disso, a frequência de uso dos bioindicadores em programas nacionais e internacionais sugere não apenas sua confiabilidade, mas também sua eficácia em diferentes contextos (ZAGHLOUL *et al.*, 2020). Estudos demonstram que há potencial no uso de bioindicadores nas etapas de avaliação e monitoramento de EPTs para identificar e gerenciar

esses impactos em áreas industriais (SANTO, 2004; BARROS, 2008; VAMPRE *et al.*, 2010; CAKAJ *et al.* 2023).

A avaliação e monitoramento de áreas contaminadas tradicionalmente dependem de análises químicas (MENDONÇA e PICADO, 2002; SCHWARTZ, ESHEL, BEM-DOR, 2011; KASEMODEL *et al.*, 2016), as quais frequentemente acarretam custos elevados (SCHWARTZ, ESHEL, BEM-DOR, 2011; MENDONÇA e PICADO, 2002). Diante da crescente preocupação com os custos associados ao GAC, tem-se buscado soluções financeiramente viáveis e ferramentas de monitoramento alternativas. Nesse sentido, os bioindicadores surgem como uma abordagem complementar, que pode reduzir os custos das etapas de avaliação e monitoramento, bem como fornecer informações valiosas sobre as condições biológicas dos ecossistemas (SCHWARTZ, ESHEL, BEM-DOR, 2011; HÄGERBÄUMER *et al.*, 2015), desempenhando um papel complementar na avaliação e monitoramento da qualidade ambiental em áreas contaminadas por EPTs, provenientes, por exemplo, de atividades industriais metalúrgicas (RIBÉ *et al.*, 2012; ANDRADE *et al.*, 2009). Portanto, a utilização de bioindicadores em *brownfields* metalúrgicos, potencialmente contaminados por EPTs, pode auxiliar a obtenção e monitoramento da contaminação, contribuindo para estratégias de remediação e na tomada de decisões para uma reabilitação eficaz dessas áreas.

## 2. OBJETIVOS

No contexto apresentado, o objetivo geral desta pesquisa foi realizar uma revisão do estado da arte sobre a aplicação de bioindicadores no âmbito do GAC, com foco na revitalização de *brownfields* originados de atividades industriais metalúrgicas. Diante desse propósito, os principais objetivos específicos foram:

- i) Por meio de avaliação crítica dos trabalhos sobre bioindicadores, relacionar as aplicações reconhecidas desses na etapa de investigação confirmatória e no monitoramento ambiental de *brownfields* possivelmente impactados por EPTs, com destaque para investigação dos solos contaminados;
- ii) Apresentar os principais desafios para a aplicação de bioindicadores (animais e plantas) nas etapas de investigação e monitoramento do compartimento ambiental solo, em áreas de *brownfields*, especificamente provenientes de indústrias metalúrgicas. Destacando as principais lacunas identificadas nas pesquisas nesse campo de conhecimento, de maneira a propor abordagens para futuras pesquisas.

### 3. JUSTIFICATIVA

Em síntese, a relevância do estado da arte referente a utilização de bioindicadores no processo de revitalização de *brownfields* provenientes de áreas metalúrgicas, especialmente com compartimento ambiental solo contaminado, está associada aos seguintes fatores:

- i) Diante de múltiplos desafios enfrentados na reutilização de *brownfields*, torna-se urgente no contexto do GAC a apresentação de métodos complementares, alternativos, economicamente viáveis e ambientalmente adequados para avaliar e monitorar a qualidade do compartimento ambiental solo (SCHWARTZ, ESHEL, BEM-DOR, 2011);
- ii) No contexto brasileiro, a contaminação por EPTs se destaca dentre o número de áreas registradas no Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas do Estado de São Paulo (CETESB, 2023a). Considerando que esses elementos estão associados as indústrias metalúrgicas (RIBÉ *et al.*, 2012; ANDRADE *et al.*, 2009), torna-se importante ampliar o conhecimento referente aos métodos de avaliação e monitoramento desses contaminantes no contexto de *brownfields* provenientes dessas atividades; e,
- iii) O desenvolvimento da aplicação de bioindicadores como ferramenta no GAC pode contribuir para o desenvolvimento de protocolos de monitoramento e avaliação de áreas impactadas por indústrias metalúrgicas.

## 4. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, foi apresentado o referencial teórico que embasou o estudo sobre a utilização de bioindicadores na avaliação e monitoramento de *brownfields* de indústrias metalúrgicas impactados por EPTs. Inicialmente, foram discutidos os conceitos de *brownfields* e a contaminação por EPTs em áreas industriais, destacando suas características comuns, impactos ambientais e riscos à saúde humana associados a essa contaminação. Em seguida, foi abordada a importância dos bioindicadores como ferramentas de avaliação ambiental e foram explorados os tipos de bioindicadores utilizados na detecção de contaminação por EPTs em *brownfields*.

### 4.1. *Brownfields* e Contaminação por EPTs

Os *brownfields*, que representam uma ampla variedade de espaços industriais ou comerciais frequentemente abandonados ou subutilizados, são intimamente associados à presença de EPTs devido a atividades industriais anteriores (AHMAD et al., 2018; REY; LAPRISE; LUFKIN, 2022). Esses elementos, como Zn, Cd, Cr e Pb, podem acumular-se no solo, representando um risco significativo para a saúde humana e o ambiente (KHELIFI et al., 2019; SHARMA; KAUR; NAGPAL, 2021). A presença de EPTs em *brownfields* pode ser influenciada por vários fatores, incluindo as propriedades do solo, a proximidade da fonte de contaminação e a topografia (LIU et al., 2020). Nas áreas de plantas metalúrgicas, as atividades exercidas nessas instalações têm o potencial de liberar EPTs no ecossistema, o que pode levar a riscos de poluição, dependendo da quantidade liberada. Portanto, a relação entre *brownfields* e EPTs é caracterizada por um potencial de contaminação e risco, destacando a necessidade de estratégias eficazes de remediação e gestão (LIU et al., 2020).

O redesenvolvimento dessas áreas é considerado mais sustentável em comparação com a urbanização de novas áreas, pois implica na reutilização de terrenos previamente desenvolvidos, muitas vezes abandonados ou contaminados, ao invés de utilizar novas áreas que poderiam ser ecossistemas naturais ou espaços verdes. Assim, a sustentabilidade no uso dessas áreas refere-se à prática ambientalmente responsável de revitalizar e reutilizar espaços já impactados, evitando o consumo adicional de recursos para a expansão de novas áreas (VENTER, 2020). Além disso, o redesenvolvimento de *brownfields* pode reduzir a pressão sobre a ocupação de áreas ainda não exploradas e servir como uma alternativa à escassez de



áreas urbanas (AHMAD *et al.*, 2018). A remoção da contaminação não é a única abordagem para lidar com *brownfields* e um planejamento interdisciplinar bem estruturado é necessário para superar as barreiras do redesenvolvimento (AHMAD *et al.*, 2018). As atitudes e a colaboração dos proprietários de *brownfields* podem influenciar significativamente o sucesso dos projetos de renovação nessas áreas afetadas (ADAMS *et al.*, 2018).

Uma série de EPTs foi identificada em áreas industriais, com elementos específicos e suas fontes variando de acordo com a região e as atividades industriais envolvidas. KESHAVARZI *et al.* (2019) demonstraram que as indústrias de aço e ferro são a principal fonte de EPTs, atingindo níveis superiores a mais que o dobro das fontes naturais, seguidas por polos industriais e usinas de energia. Os solos industriais podem alcançar níveis de poluição por EPTs que excedem os limites de risco à saúde humana, abrangendo uma variedade de elementos como Mercúrio (Hg), Zinco (Zn), Chumbo (Pb), Cobre (Cu), Cromo (Cr) e Níquel (Ni). Dependendo da atividade industrial, a composição dos EPTs pode variar; por exemplo, em áreas onde ocorrem atividades relacionadas ao carvão, podem ser observadas altas concentrações de Arsênio (As), Ni, Cádmio (Cd), Cu, Cr, Hg, Pb e Zn nos solos. Assim, medidas específicas devem ser adotadas para mitigar o risco de exposição a esses elementos e proteger a população vulnerável (XIAO *et al.*, 2020). A contaminação por EPTs não se limita unicamente às áreas de atividade industrial, mas também se estende para o entorno dessas áreas (KESHAVARZI *et al.*, 2019; JEONG *et al.*, 2020). JEONG *et al.* (2020) analisaram poeira de estradas em áreas industriais e identificaram a presença de EPTs acumulados nas superfícies, incluindo Cu, Cr, Pb, Zn e Cd, sendo este último mais severo em termos de poluição e risco ecológico. Os elementos Zn, Pb, Cu, Hg, Manganês (Mn), e Molibdênio (Mo) podem apresentar fatores de mobilidade elevados, indicando a alta biodisponibilidade desses elementos em solos industriais (KESHAVARZI *et al.*, 2019).

A exposição aos EPTs presentes no solo pode representar riscos significativos para a saúde humana, uma vez que esses elementos podem ser absorvidos e acumulados pelas plantas, entrando na cadeia alimentar e sendo consumidos como alimentos contaminados (SHARMA; KAUR; NAGPAL, 2021). Essa contaminação pode interferir nos mecanismos fisiológicos e moleculares, levando a uma série de problemas de saúde, incluindo fraqueza óssea, distúrbios de pele, problemas respiratórios, cardiovasculares, endócrinos, nervosos, reprodutivos, distúrbios hepáticos e até mesmo câncer (SHARMA; KAUR; NAGPAL, 2021). Os riscos à saúde humana podem variar entre não carcinogênicos e carcinogênicos (XIAO *et al.*, 2020; ZHANG, 2022). Destaca-se que a principal via de exposição dos EPTs presentes no solo,

causadores de riscos não carcinogênicos, ocorre por ingestão oral, seguida pelo contato dérmico e inalação (XIAO et al., 2020). Devido ao hábito de brincar no chão e ingerir solo, as crianças se tornam o grupo mais vulnerável em relação aos riscos não carcinogênicos associados aos EPTs (XIAO et al., 2020; HUANG et al., 2020; ZHANG, 2022).

#### **4.2. Importância dos Bioindicadores na Avaliação Ambiental**

Os bioindicadores abrangem uma variedade de seres vivos, desde microrganismos e plantas até insetos, cianobactérias e abelhas (PARMAR; RAWTANI; AGRAWAL, 2016). Essa ferramenta é essencial para avaliar a integridade e a funcionalidade dos ecossistemas, ajudando na identificação de ameaças ambientais e na avaliação da saúde do ambiente. Devido a essas características, os bioindicadores têm potencial para serem utilizados na avaliação e monitoramento ambiental, especialmente quando combinados com análises químicas convencionais, podendo fornecer resultados ou dados mais apropriados para interpretar as mudanças ambientais decorrentes da poluição e da tolerância ecológica a ela em um determinado ecossistema (ABDULLAHI, IBRAHIM, 2018; ZAGHLOUL *et al.*, 2020). Os insetos que vivem no solo são especialmente úteis na avaliação dos efeitos das atividades antropogênicas (MANU et al., 2019; VACHT et al., 2019). Além disso, para o sistema aquático e atmosférico, eles também são importantes, pois, devido aos seus hábitos, entram em contato com os elementos tóxicos possivelmente presentes no solo, na água e no ar (PARIKH, RAWTANI E KHATRI, 2020).

Alguns bioindicadores, como besouros, abelhas, borboletas, mariposas, libélulas (Ordem Odonata), moscas e mosquitos, podem ser empregados na avaliação e monitoramento de contaminações por EPTs (PARIKH, RAWTANI E KHATRI, 2020). Esses bioindicadores também são importantes para avaliar a qualidade do solo, como os cupins que são um grupo importante de bioindicadores da fertilidade do compartimento ambiental solo (NITHYATHARANI, 2018). As formigas são um bom grupo de bioindicadores da qualidade do solo e servem ainda um papel crucial na recuperação de áreas degradadas e reflorestadas (MAJER 1983). Os colêmbolos, insetos que podem influenciar na fertilidade do solo estimulando a atividade microbiana, são sensíveis à redução da diversidade e às mudanças no solo, podendo servir como bioindicadores (ARENHARDT; VITORINO; MARTINS, 2010).

O mel de abelha coletado em áreas impactadas por EPTs pode conter concentrações elevadas de Cu, Pb, Ferro (Fe) e Zn. Esse fenômeno ocorre devido à transferência desses contaminantes do solo para as plantas afetadas por EPTs. Posteriormente, esses elementos podem ser absorvidos pelas abelhas através do néctar das plantas contaminadas, resultando em níveis elevados de EPTs no mel produzido. Assim, com base na análise do mel, é possível avaliar e monitorar a presença de EPTs na região de ação dessas abelhas (RASHED; EL-HATY; MOHAMED, 2009). As comunidades de ácaros do solo são capazes de revelar concentrações significativamente elevadas de EPTs, demonstrando potencial para agir como bioindicadores (MANU, 2019; VACHT *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2023). Além disso, os nematoides do solo, que apresentam uma abundante variação de níveis tróficos, podem ser bons bioindicadores (PEN-MOURATOV *et al.*, 2008; MURRAY *et al.*, 2000; HUO *et al.*, 2024).

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa aplicou uma revisão sistemática, com base nas diretrizes PRISMA de identificação, seleção, elegibilidade e inclusão (MOHER *et al.*, 2009), para analisar o estado da arte referente à aplicação de bioindicadores como ferramenta no processo de avaliação e monitoramento de *brownfields* resultantes de atividades industriais metalúrgicas. A pesquisa utilizou bases de dados, como a Biblioteca Digital de Trabalhos Acadêmicos da USP, Google acadêmico, Periódico CAPES, *ScienceDirect*, *Scopus*, *Taylor & Francis*, *SpringerLink*, *Scielo* e *Web of Science*. As *strings* de busca adotadas foram “*bioindicators AND brownfields*”, “*chemical substances of interest AND metallurgical industries*”, “*bioindicators AND Potentially Toxic Element(s)EPTs*”, considerando apenas documentos em inglês e português. Não foi determinado limite de ano de publicação para os artigos selecionados.

Na primeira fase, foram catalogados 159 documentos obtidos a partir das bases de dados. Informações relevantes, como nome do primeiro autor, ano de publicação, base de dados, título do trabalho, palavras-chave e ideias principais, foram registradas em uma tabela utilizando o *software* Excel (Microsoft 365). Na segunda fase, foram selecionados 98 artigos científicos, excluindo-se publicações como livros e resumos de eventos, bem como documentos não experimentais, como revisões bibliográficas. Além disso, foram excluídos artigos redigidos em idiomas distintos do inglês e aqueles que não abordavam diretamente o tema de estudo. As revisões bibliográficas foram identificadas e avaliadas quanto ao potencial de referência para os artigos levantados. Na terceira fase, por meio da leitura dos resumos identificou-se aqueles artigos que aparentemente exploravam o uso de bioindicadores em *brownfields* provenientes de indústrias metalúrgicas ou áreas com solo impactado por EPTs, culminando na seleção de 44 artigos.

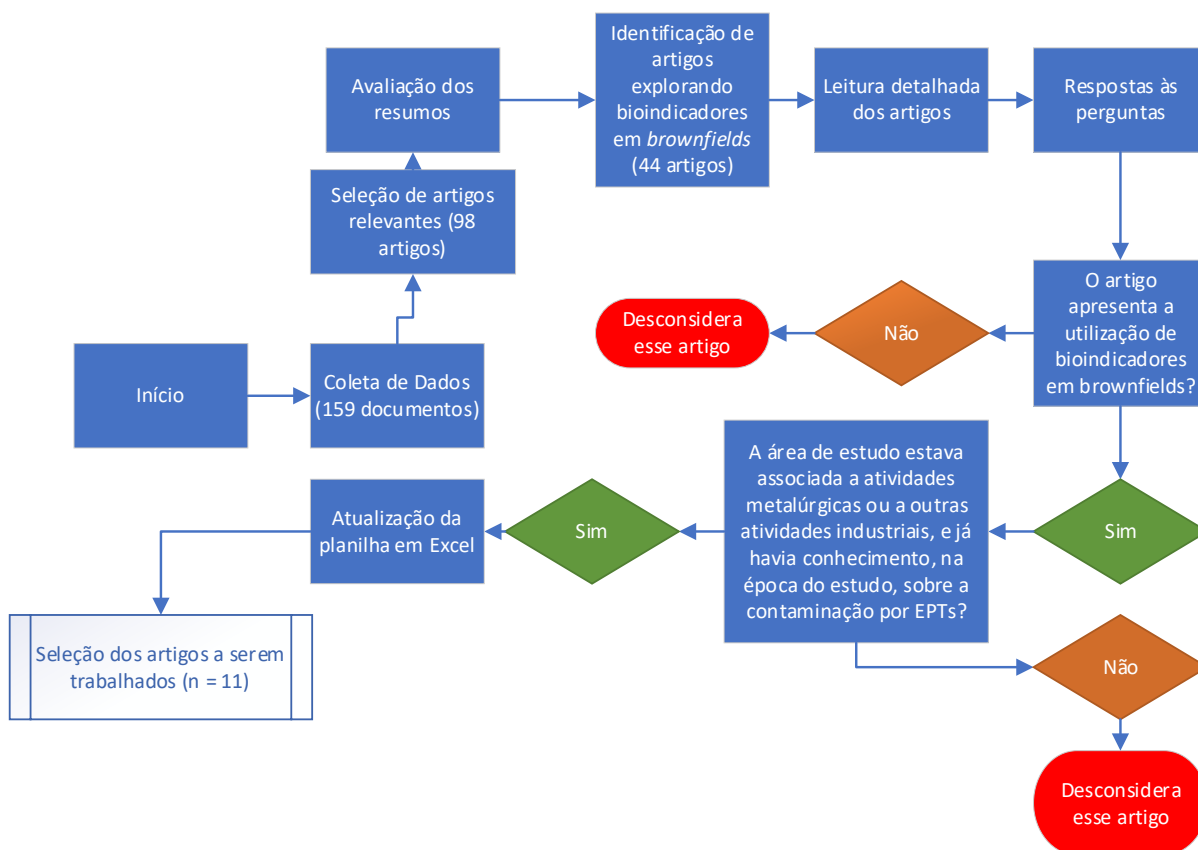
Com o intuito de otimizar a revisão sistemática, buscou-se a utilização de Inteligência Artificial [IA] ou *Artificial Intelligence* para automatizar o processo e reduzir possíveis lacunas na pesquisa. A utilização de IA é crucial para lidar com grandes volumes de dados em um curto espaço de tempo, além de minimizar o viés humano na seleção de artigos (MOHAN, 2021). Fluxos de Trabalho Baseados em Literatura [LBD] ou *Literature-Based Discovery* também podem se beneficiar da AI e automação para a descoberta automatizada de conhecimento (Thilakaratne, 2019). Métodos de Processamento de Linguagem Natural [PLN] ou *Natural Language Processing*, como a recuperação automatizada de informações, podem aprimorar o

procedimento tradicional de revisão bibliográfica da literatura (Dušková, 2022) e pode auxiliar na identificação de artigos relevantes que poderiam ser perdidos em uma revisão manual.

A sistematização dos procedimentos foi realizada de acordo com os seguintes passos (Figuras 1 e 2):

1. Obteve-se as “*seeds*”, ou seja, os artigos relevantes, por meio do uso das palavras-chave previamente mencionadas, utilizando o portal *Elicit* (<https://elicit.com/?workflow=table-of-papers>);
2. Foi utilizado o aplicativo Litmaps para mapear as publicações, demonstrando as conexões do arquivo analisado e fornecendo informações sobre quais artigos estão relacionados ao artigo fornecido, sua relevância, data de publicação e o número de citações recebidas. Além disso, o aplicativo também destaca quais artigos relacionados ao original são considerados importantes, apresentando graficamente sua relevância, permitindo priorizar o uso dos artigos mais relevantes relacionados ao tema em questão;
3. Organizou-se os artigos importantes em coleções ou pastas no aplicativo *Zotero*;
4. Realizou-se leitura dos artigos selecionados buscando-se responder às seguintes perguntas:
  - a. O artigo retrata o uso de bioindicadores?
  - b. O artigo retrata o uso de bioindicadores em *brownfields*?
  - c. A área de estudo estava associada a atividades metalúrgicas ou a outras atividades industriais, ou já havia conhecimento, na época do estudo, sobre a contaminação por EPTs?
  - d. O uso trata do compartimento ambiental solo?
5. Por base dessas respostas, a planilha em Microsoft Excel foi realimentada.
6. O “sim” para as perguntas determinou a filtragem dos artigos que foram trabalhos.

Figura 1: Sistematização da literatura



Fonte: Autor, 2024

### 5.1. Revisão sistemática

Onze artigos atenderam afirmativamente a essas perguntas (Tabela 1) e foram coletadas informações sobre esses artigos, como atividade exercida na área de estudo, responsáveis pelo artigo, país da pesquisa, data da publicação, revista e quartil da revista (CLARIVATE, 2024). Em seguida, foram realizadas algumas considerações sobre os países que se destacaram na produção acadêmica com esse enfoque, bem como sobre o impacto das revistas nas quais esses artigos foram publicados. Além disso, a forma de seleção dos artigos é apresentada em subtópicos, incluindo a caracterização dos estudos analisados e a aplicação de bioindicadores na avaliação e monitoramento de *brownfields* metalúrgicos com solo potencialmente impactado por EPTs.

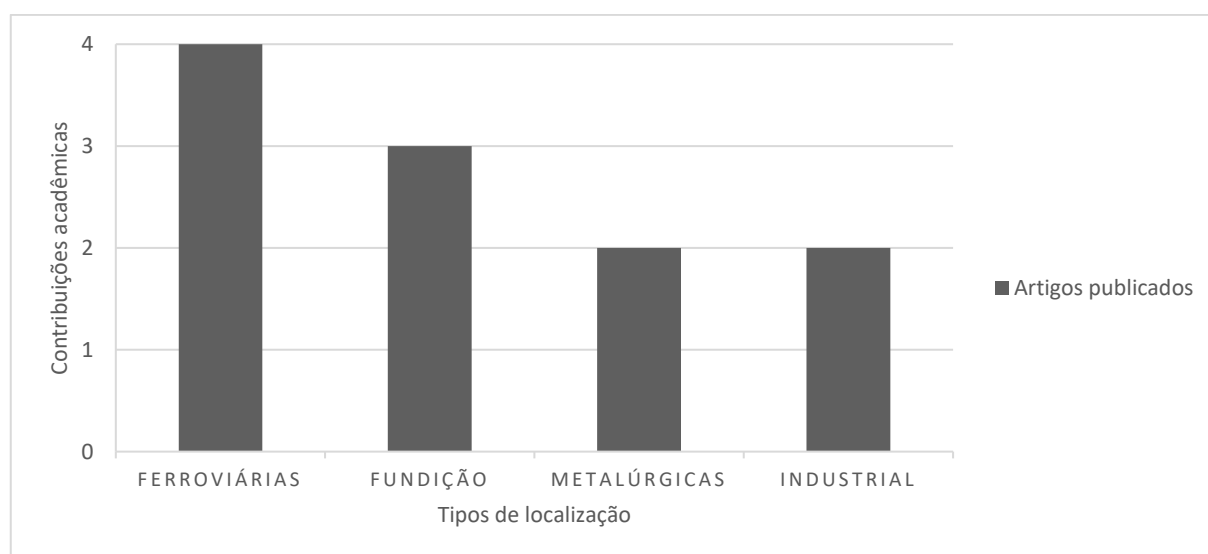
Tabela 1: Estudos analisados sobre bioindicadores em áreas de *brownfields*.

<b>Autores(as)</b>	<b>Ano</b>	<b>País</b>	<b>Revista</b>	<b>Quartil*</b>	<b>Atividade exercida</b>
Murray, P; Ge, Y; Hendershot, W.H	2000	Canada	<i>Environmental Pollution</i>	Q1	Pátio ferroviário
Brohon; Delolme; Gourdon	2001	França	<i>Soil Biology and Biochemistry</i>	Q1	Área Industrial
Ge <i>et al.</i>	2002	Canada	<i>Environmental Toxicology and Chemistry</i>	Q2	Pátio ferroviário
Gallagher <i>et al.</i>	2008	Estados Unidos da América	<i>Environmental Pollution</i>	Q1	Pântano de sal/Pátio ferroviário
Hartley <i>et al.</i>	2008	Reino Unido	<i>Science of The Total Environment</i>	Q1	Indústria metalúrgica/Bosque urbano de Betula
Pen-Mouratov; Shukurov; Steinberger	2008	Israel	<i>Environmental Pollution</i>	Q1	Mineradora/Complexo metalúrgico
Rodriguez <i>et al.</i>	2012	Argentina	<i>Atmospheric Environment</i>	Q1	Fundição de Al
Vacht <i>et al.</i>	2019	Estonia	<i>Acarologia</i>	Q3	Estrada férrea/Aeródromo militar
Manu <i>et al.</i>	2019	Romenia	<i>Scientific Reports</i>	Q1	Barragem de mineração de ouro
Liu <i>et al.</i>	2023	China	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	Q2	Fundição de Cu
Huo <i>et al.</i>	2024	China	<i>Global Ecology and Conservation</i>	Q1	Produtora de sal de cromo

Fonte: Autor, 2023; \* CLARIVATE, 2024

A produção acadêmica relacionada ao uso de bioindicadores na avaliação e monitoramento de solos em áreas de *brownfields*, provenientes de indústrias metalúrgicas ou impactadas por EPTs, é escassa e dispersa, sendo o Canadá o único país com duas contribuições acadêmicas relevantes sobre o assunto. Embora a contaminação por EPTs seja um problema destacado no estado de São Paulo, Brasil, e haja uma presença relevante de *brownfields* (CETESB, 2023a), não há publicações acadêmicas no Brasil que abordem o uso de bioindicadores para a avaliação e monitoramento de solos em *brownfields* impactados por EPTs. Entre os artigos relacionados ao tema, quatro abordam *brownfields* originados de áreas ferroviárias, que foram incluídos neste estudo por representarem ambientes diversos, característica compartilhada com as áreas metalúrgicas (HARTLEY *et al.*, 2008). Ademais, três artigos estão relacionados a áreas de fundição, dois focados na indústria metalúrgica e um destinado a uma área industrial não especificada (Figura 2).

Figura 2: Contagem da produção acadêmica resgatada por área industrial.



Fonte: Autor, 2023

Para avaliar a relevância e influência das revistas onde foram publicados os artigos selecionados, foram considerados os quartis das revistas com base no *Journal Citation Reports*. Esse sistema classifica as revistas acadêmicas de acordo com o número de citações recebidas por artigos publicados, dividindo-as em quatro grupos. O primeiro quartil [Q1] é composto pelas revistas com maior impacto, enquanto o quarto quartil [Q4] engloba aquelas de menor impacto. Dos estudos revisados, a maioria foi publicada em revistas classificadas nos quartis superiores, sendo oito em revistas classificadas como Q1, dois em revistas Q2 e um em revista Q4.



## 5.2. Caracterização dos estudos analisados:

A partir dos 11 artigos selecionados, este estudo exibiu uma breve caracterização das áreas de estudo e as substâncias químicas avaliadas (Tabela 2). Dentre os EPTs considerados pelos pesquisadores, destacam-se Cu, Pb e Zn, presentes em 8 artigos cada, seguidos de Cd (n = 8), Ni (n = 6), As (n = 3), Cr (n = 2), Hg (n = 2), Mn (n = 2) V (n = 1), Fe (n = 1) e Cr (VI) (n = 1). Ressalta-se que apenas um estudo abordou as concentrações de hidrocarbonetos totais.

Tabela 2: Caracterização das áreas de estudo e substâncias químicas avaliadas nos estudos selecionados.

Referência	Área de estudo	Substâncias químicas avaliadas
MURRAY; GE; HENDERSHOT (2000)	Pátio ferroviário em desuso, Canadá	Cd, Cu, Ni, Pb, e Zn
BROHON; DELOLME; GOURDON (2001)	Planta industrial em desuso, França	Hidrocarbonetos totais, Ni, Pb e Cd
GE <i>et al.</i> (2002)	Pátio ferroviário em desuso, Canadá	Cd, Cu, Ni, Pb, e Zn
GALLAGHER <i>et al.</i> (2008)	Pátio ferroviário em desuso, feito sob aterramento a base de lixo, Estados Unidos da América	As e Cr
HARTLEY <i>et al.</i> , 2008	Quatro áreas selecionadas, incluindo 6 <i>brownfields</i> , 2 apresentam contaminação. Os demais são áreas periféricas abandonadas e pequenos campos de agricultura	As, Cu, Cd, Zn, Pb e Ni
PEN-MOURATOV; SHUKUROV; STEINBERGER, 2008	Complexo metalúrgico e de mineração, Uzbequistão	Cu, Pb, Cd e Zn
RODRIGUEZ <i>et al.</i> , 2012	Fundição de alumínio, Argentina	Cd, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn
VACHT <i>et al.</i> , 2019	Áreas em desuso em diferentes estágios sucessionais	Não são especificamente listadas
MANU <i>et al.</i> , 2019	Área de exploração de ouro e prata em desuso	As, Cu, Ni, Mn, Pb, e Zn
LIU <i>et al.</i> , 2023	Área de fundição em desuso, China	Cu, Zn, Pb, e Cd
HUO <i>et al.</i> , 2024	Fábrica de produtos químicos e áreas periféricas, China	Cr (VI), Cr, Cd, b, As, Cu, Zn e Hg

Fonte: Autor, 2024

O trabalho de MURRAY; GE; HENDERSHOT (2000) apresentou estudos sobre pátios ferroviários em Montreal, Canadá. A área de estudo, preteritamente foi utilizada como estacionamento e manutenção dos vagões de trem. Durante o período analisado, a área estava coberta por grama, árvores e vegetação herbácea. Mapas históricos demonstraram que já houve edificações, cujos escombros se mantinham na área. As atividades nesses pátios diminuíram a

partir da década de 1960, mas se encerraram no final dos anos 1980. Conforme apresentado pelos autores, o solo das áreas apresentava concentrações de EPTs como Cd, Cu, Ni, Pb e Zn que superavam os critérios de qualidade do solo estabelecidos para o Quebec. Destaca-se que em todos os pátios ferroviários analisados foram detectadas concentrações de EPTs que excediam os limites de qualidade do solo estipulados por Quebec.

Em contraste, BROHON; DELOLME; GOURDON, 2001 analisaram uma área com solo contaminado por hidrocarbonetos em Macon, França. A área recebeu contaminantes a partir tanques com vazamentos por cerca de 50 anos. Após a inativação das atividades a área recebeu solo de boa procedência. No entanto, como apresentado nesse estudo por meio das características físico-químicas, atividades enzimáticas e bioensaios das amostras de solo de diferentes zonas, a área foi determinada como poluída pela presença de hidrocarbonetos totais, e EPTs como Ni, Pb e Cd.

GE *et al.* (2002) por sua vez, analisaram um pátio ferroviário na região de Québec, Canada. À época dos estudos os trilhos já haviam sido retirados, mas os mordentes de madeira, e plataformas de concreto permaneciam na área. O pátio já estava desativado desde o final dos anos 1960. O solo local estava impactado por EPTs como Cd, Cu, Ni, Pb e Zn, todos excedendo os valores de qualidade ambiental estabelecidos para a área.

GALLAGHER *et al.* (2008) avaliaram a área do *Liberty State Park* em Nova Jersey, Estados Unidos da América. Os autores levantaram que originalmente a área se tratava de um estuário, que foi preenchido entre os anos 1860 e 1919, para ser utilizado como pátio ferroviário. Os materiais de preenchimento consistiam principalmente de detritos de construção civil e resíduos sólido urbano da cidade de Nova York. Os autores observaram que as atividades de transporte e armazenamento de diversas mercadorias na área resultaram em concentrações de EPTs no solo, como As e Cr, que excediam os critérios de qualidade estabelecidos. Esses EPTs estavam distribuídos de forma desigual devido à intensidade e à dispersão das atividades que haviam sido exercidas na área. A pesquisa concluiu que os níveis de As e Cr no solo excediam os valores-limite determinados pelos padrões de remediação de solo, como os do Departamento de Proteção Ambiental de Nova Jersey e os *Generic Soil Remediation Standards (GSRS)*.

HARTLEY *et al.* (2008) examinaram antigos aterros sanitários contendo resíduos alcalinos e outros resíduos industriais, bem como uma antiga indústria metalúrgica. O estudo determinou que diversas das áreas avaliadas possuíam concentrações de metais pseudototais (extraíveis por  $\text{HNO}_3$ ) no solo, indicando a presença de contaminantes.

Em contrapartida, PEN-MOURATOV, SHUKUROV e STEINBERGER (2008) observaram uma mineração e complexo metalúrgico no Uzbequistão que produzia diversos elementos químicos, incluindo Cu, Au, Ag, concentrado de Pb e Zn. Destaca-se que a produção anual de alguns metais, como Cu, Zn e Pb atingiam quantias de 130,000, 40,000, e 80,000 toneladas, respectivamente. A área foi considerada contaminada no compartimento ambiental solo por EPTs como Cu, Pb, Cd e Zn.

RODRIGUEZ *et al.* 2012 analisaram uma área associada a uma grande instalação de produção de alumínio na Patagônia, Argentina. O estudo confirmou que a fundição de alumínio promoveu deposição de PAH na área de estudo, indicando um gradiente de poluição acentuado associado à indústria do alumínio. Segundo os autores foi analisada a presença de Cd, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn, onde se identificou a contaminação por PAHs e EPTs.

MANU *et al.* (2019) avaliaram uma área metalúrgica que envolvia a exploração de prata e ouro na Romênia. O principal período de atividade industrial na região se deu entre 1965 e 1990. Anteriormente às atividades industriais a área apresentava horizontes naturais florestados, que foram alterados para ecossistemas antropogênicos, incluindo minas, áreas e lagos de rejeitos. No período de maior produção, a área chegou a produzir entre 1,000 e 2,000 toneladas de ouro. O depósito de minério foi classificado como um depósito epitérmico de sulfeto intermediário devido à sua associação com Au, Ag, Pb, Zn e outros elementos. Segundo os autores a área é considerada contaminada pela presença de EPTs em níveis acima dos permitidos, especificamente As, Cu, Ni, Mn, Pb e Zn, com valores entre o dobro e até 54 vezes os limites de intervenção determinados legalmente.

Por outro lado, VACHT *et al.* (2019) analisaram *brownfields* em Tallin, Estônia. Os *brownfields* apresentavam diferentes estágios sucessionais de urbanização. Os autores classificaram os solos analisados como *Technosols*, devido ao elevado volume de artefatos antropogênicos encontrados neles, tais como resíduos de construção civil, que potencialmente contém EPTs. Essa presença de EPTs foi considerada pelos autores como contribuintes para que as áreas avaliadas fossem determinadas como contaminadas.

LIU *et al.* (2023) examinaram uma área no leste da China cujas atividades foram encerradas no início dos anos 2000. O uso do solo local se deu por atividades de fundição, apresentando diversas fundições espalhadas de forma irregular pelo terreno. Essa atividade resultou em contaminação do solo por Cu, Zn, Pb e Cd, sendo que em 76% a 98% da área de estudo, as concentrações desses EPTs excederam os valores de referência do Padrão Chinês de

Qualidade do Solo. Os autores ressaltaram que a principal fonte de contaminação foram as atividades de fundição de cobre realizadas na área de estudo ao longo de cerca de 10 anos.

HUO, Z. *et al.* (2024) avaliaram uma das primeiras produtoras de sal de cromo da China. Na área analisada operava a *Xincheng Chemical Plant*, fundada em 1956, cujo encerramento das atividades ocorreu no ano 2000. Os autores trabalharam com as concentrações de EPTs como Cr (VI), Cr, Cd, Pb, As, Cu, Zn e Hg. O estudo considerou as instalações da *Xincheng Chemical Plant* como a principal fonte de contaminação do solo. Ao comparar os valores desses compostos no solo com os de triagem de risco, para o cenário industrial, no padrão de controle de risco de qualidade ambiental para contaminação do solo de terrenos de desenvolvimento para avaliar a contaminação por EPTs em *brownfields* urbanos (GB36600-2018), o Cr (VI) foi considerado o principal contaminante.

Com base nas análises das diversas áreas investigadas, observou-se uma variedade de contextos e tipos de contaminação do solo por EPTs. Em Montreal, Canadá, os estudos de MURRAY, GE e HENDERSHOT (2000) revelaram a presença de EPTs como Cd, Cu, Ni, Pb e Zn em pátios ferroviários, indicando uma contaminação do solo. Em contrapartida, em Macon, França, BROHON, DELOLME e GOURDON (2001) identificaram solo contaminado por hidrocarbonetos totais e EPTs como Ni, Pb e Cd, decorrente de vazamentos de tanques ao longo de décadas. Já em Quebec, Canadá, GE *et al.* (2002) constataram altas concentrações de Cd, Cu, Ni, Pb e Zn em um pátio ferroviário desativado. No *Liberty State Park* em Nova Jersey, Estados Unidos, GALLAGHER *et al.* (2008) encontraram EPTs como As e Cr provenientes das atividades de transporte e armazenamento de mercadorias. Em áreas de antigos aterros sanitários e indústrias metalúrgicas, HARTLEY *et al.* (2008) detectaram metais pseudototais no solo, evidenciando a contaminação. Em contraste, PEN-MOURATOV, SHUKUROV e STEINBERGER (2008) observaram contaminação por EPTs como Cu, Pb, Cd e Zn em uma mineração e complexo metalúrgico no Uzbequistão. Por fim, em áreas na Romênia, Argentina, China e Estônia, foram registradas diversas fontes de contaminação por EPTs, em áreas de mineração de ouro e prata, fundições de metais, produção de alumínio e indústrias químicas, refletindo os diferentes desafios ambientais enfrentados em diferentes regiões do mundo.

### **5.3. Aplicação de bioindicadores na avaliação e monitoramento de *brownfields* metalúrgicos com solos potencialmente impactados por EPTs:**

Entre os 11 estudos analisados, os autores utilizaram uma variedade de bioindicadores e metodologias para avaliar e monitorar *brownfields* metalúrgicos com solos potencialmente impactados por EPTs, conforme demonstrado na Tabela 3. Destaca-se que cinco estudos empregaram análises de espécies de plantas como bioindicadores, seguidos por análises de grupos de ácaros ( $n = 3$ ), invertebrados ( $n = 2$ ), atividades microbianas ( $n = 2$ ), nematoides ( $n = 2$ ), bioensaios microbianos ( $n = 1$ ) e ensaios microbianos ( $n = 1$ ). Entre as metodologias aplicadas, o levantamento das comunidades de invertebrados foi abordado em 7 dos artigos selecionados, dos quais 3 focaram especificamente na análise das comunidades de ácaros, enquanto 2 abordaram as comunidades de nematoides. Além disso, as metodologias de bioacumulação, bioensaios e levantamento de espécies de plantas foram igualmente empregadas em 3 estudos cada.

Tabela 3: Bioindicadores utilizados e metodologias aplicadas nos estudos selecionados.

Referência	Bioindicadores utilizados	Metodologia(s) aplicada(s) na análise de bioindicadores
MURRAY; GE; HENDERSHOT, 2000	Invertebrados, atividade microbiana e espécies de plantas	Medições da atividade microbiana; diversidade das comunidades de plantas e invertebrados, com determinação de bioacumulação
BROHON; DELOLME; GOURDON, 2001	Atividade microbiana e bioensaios microbianos	Bioensaios; medições da atividade microbiana
GE <i>et al.</i> , 2002	Espécies de plantas, como dente-de-leão, campina e chicória	Bioensaios; bioacumulação em plantas
GALAGHER <i>et al.</i> 2008	Betula populifolia, Populus deltoides e Artemisia vulgaris	Levantamento de espécies de plantas
HARTLEY <i>et al.</i> , 2008	Espécies de plantas, invertebrados (anelídeos)	Levantamento de espécies de plantas e invertebrados; bioensaios microbianos
PEN-MOURATOV; SHUKUROV; STEINBERGER, 2008	Nematoides de vida livre do solo	Análise da comunidade de nematoides
RODRIGUEZ <i>et al.</i> , 2012	Espécies de plantas, como <i>Eucalyptus rostrata</i> , <i>Pinus radiata</i> e <i>Populus hybridus</i>	Bioacumulação em plantas
MANU <i>et al.</i> , 2019	Ácaros, como Mesostigmata e oribatida	Análise da comunidade de ácaros
VACHT <i>et al.</i> , 2019	Ácaros, como Oribatida	Análise da comunidade de ácaros
LIU <i>et al.</i> , 2023	Ácaros, como Oribatida e mesostigmata	Análise da comunidade de ácaros
HUO <i>et al.</i> , 2024	Nematoides	Análise da comunidade de nematoides

Fonte: Autor, 2024

O trabalho de MURRAY; GE; HENDERSHOT (2000) avaliou a presença e a atividade da biota nativa por meio de investigações de campo e de laboratório. O objetivo era conhecer quais organismos estavam presentes em *brownfields* urbanos, assim como medir se os elevados índices de EPTs alteravam a presença e a atividade da biota. Foram realizados estudos para determinar até que ponto a atividade microbiana é afetada pelo teor de traços de EPTs, para avaliar a diversidade das comunidades de plantas e invertebrados do solo e para medir a fitoacumulação de traços de EPTs. Dentre as espécies de plantas, várias foram analisadas, incluindo *Acer negundo*, *Acer ginnala*, *Rhus typhina*, *Asclepias syriaca*, *Achillea millefolium*, *Anaphalis margaritacea*, *Anthemis cotula*, *Artemisia vulgaris*, *Cichorium intybus*, *Cirsium arvense*, *Erigeron canadensis*, *Lactuca serriola*, *Solidago virgaurea*, *Sonchus arvensis*, *Sonchus asper*, *Tanacetum vulgare*, *Taraxacum officinale*, *Xanthium strumarium*, *Betula populifolia*, *Echium vulgare*, *Silene cucubalus*, *Cerastium holosteoides*, *Euphorbia corollata*, *Medicago lupulina*, *Melilotus albus*, *Melilotus officinalis*, *Trifolium agrarium*, *Trifolium pratense*, *Vicia cracca* e *Ulmus thomasii*. Os autores concluíram que as atividades microbianas, medidas pela respiração basal e induzida pelo substrato e pela nitrificação, não foi afetada pelos níveis de Cd, Cu, Ni, Pb e Zn do solo registrados nas mesmas áreas. Sete dos 12 grupos de invertebrados coletados foram amostrados em solos com concentrações semelhantes de Cd, Cu, Ni, Pb e Zn, demonstrando uma variação. A diversidade de espécies de plantas aumentou em função do tempo em que os locais ficaram inativos. Os níveis de EPTs no tecido vegetal foram influenciados pelas características do solo e não pela presença de Cd, Cu, Ni, Pb e Zn total do solo. Os dados coletados indicaram que os três pátios ferroviários foram capazes de sustentar a fauna e a vegetação do solo apesar das altas concentrações de EPTs, sugerindo que os locais estavam funcionando satisfatoriamente.

Outras maneiras de se utilizar bioindicadores foram realizadas, como a análise da complementaridade de bioensaios e medições de atividade microbiana para avaliar a qualidade de solos contaminados por hidrocarbonetos e presença de EPTs. O estudo de BROHON, DELOLME e GOURDON (2001) analisou a atividade microbiana e utilizou dois bioensaios microbianos distintos, o *Lumistox* e o *MetPlate*, para avaliar o grau de poluição das amostras de solo coletadas das diferentes áreas estudadas. Os autores obtiveram resultados quanto às características físico-químicas, atividades enzimáticas, e bioensaios de amostras de solo de diferentes áreas contaminadas. Os resultados foram utilizados para determinar o grau de poluição e potencial impacto no ecossistema do solo e os autores consideraram que os bioindicadores foram boas ferramentas para avaliar o grau de poluição do solo. Os

pesquisadores destacaram ainda que a sensibilidade das medições de atividade microbiana, em combinação com as medições obtidas dos dois testes de toxicidade disponíveis comercialmente, fornece informações valiosas para a avaliação da qualidade do solo.

GE *et al.* (2002) empregaram ensaios microbianos em sua abordagem, complementando-a com análise da bioacumulação em plantas como uma metodologia de análise de bioindicadores. O levantamento buscou estimar a especiação química de EPTs em áreas urbanas, quantificar a biodisponibilidade relativa de EPTs utilizando espécies vegetais e ensaios microbianos, além de avaliar como a especiação química e os índices de disponibilidade biológica podem ser empregados para explicar a biodisponibilidade relativamente baixa de EPTs observada em solos urbanos contaminados. Os trabalhos foram feitos com amostras de solo retiradas na área e levadas a laboratórios para análises. Os autores utilizaram três espécies de plantas como bioindicadores (*Taraxacum officinale*, *Silene cucubalus*, e *Cichorium intybus*). A biodisponibilidade de EPTs no pátio ferroviário era baixa e a ciclagem de nitrogênio poderia ser afetada devido à inibição da nitrificação encontrada na maioria dos solos contaminados.

GALLAGHER *et al.* (2008) selecionaram espécies de plantas que eram dominantes nos conjuntos vegetativos da área de interesse e que foram usadas para garantir uma boa correlação entre as amostras de solo e as amostras de tecido vegetal. Os autores usaram *Betula populifolia*, *Rhus copallinum*, *Populus deltoides* e *Artemisia vulgaris* como bioindicadores e coletaram amostras de solo e plantas da área de estudo. Os resultados relacionavam o impacto dos solos contaminados por EPTs sobre a estrutura e o desenvolvimento do conjunto vegetativo, incluindo a distribuição das concentrações de EPTs no solo, a relação entre a carga de EPTs e a porcentagem de cobertura de diferentes conjuntos vegetativos e a capacidade das espécies de plantas dominantes de translocar EPTs em altas taxas. Os bioindicadores selecionados apresentam potencial para serem ferramentas eficazes na avaliação da contaminação por EPTs. Os estudos indicaram que *Betula populifolia* e *Populus deltoides* possuem a capacidade de bioacumular Zn em níveis consideravelmente elevados em comparação com as condições ambientais do solo, o que fundamentaria seu uso como bioindicadores em áreas afetadas por EPTs.

HARTLEY *et al.* (2008) avaliaram o uso de bioindicadores para avaliar a qualidade da remediação de solos urbanos e a eficácia das estratégias de remediação. O levantamento envolveu a seleção de espécies de plantas e invertebrados, além de ensaios microbianos, investigando também os processos funcionais em diferentes estágios na área de estudo. Quanto



às espécies de plantas utilizadas, os autores trabalharam com *Agrostemma githago* L., *Trifolium pratense* L., *Anthyllis vulneraria*, *Centaurea cyanus*, *Leucanthemum vulgare* e *Lolium perenne*. Dentre os invertebrados, foram utilizados como bioindicadores minhocas, micro artrópodes e artrópodes móveis, com foco principal no número de minhocas. Foram considerados o número de indivíduos, grupos funcionais, além de ensaios microbianos, incluindo respiração do solo e produção de Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) *in situ*. Em porções selecionadas de solo, foi analisado o crescimento bacteriológico como bioindicador, com ensaios *in situ* e *ex situ*. As análises laboratoriais incluíram isolamento de DNA de amostras de solo e análise de PCR para determinar a biodiversidade bacteriana e fúngica. No entanto, o estudo concluiu que a aplicação desses bioindicadores apresentou resultados ambíguos, separando de forma convincente apenas os locais com poluição extremas ou permitindo interpretações específicas do local, o que indica a complexidade do uso de um conjunto de bioindicadores de referência universalmente aplicável.

PEN-MOURATOV, SHUKUROV e STEINBERGER (2008) analisaram o impacto da poluição industrial de EPTs na comunidade de nematoides do solo, concentrando-se na estrutura trófica, na proporção sexual e na composição dos táxons. O estudo considerou como bioindicadores os nematoides de vida livre existentes no solo da área de estudo. Segundo os autores, esses indivíduos podem ser avaliados usando diversos índices ecológicos, como diversidade trófica, dominância de gênero, índices de Shannon, maturidade, uniformidade e riqueza, de maneira que se permita avaliar as mudanças que ocorrem nas assembleias de nematoides sob distúrbios ambientais. As análises químicas e biológicas foram conduzidas em laboratório, a partir de amostras de solo coletadas na área de interesse, o que incluiu além das amostragens de solo, a identificação de população nematoides presentes nas amostras e a determinação da concentração dos EPTs. O efeito da poluição sobre a densidade e biomassa de nematoides de vida livre no solo foram maiores em áreas de fontes de poluição, com fungíveros e parasitas de plantas em dominância das porções mais superiores e igualmente nas mais profundas camadas de solo próximas a fonte de poluição. Esses grupos diminuíram ao longo do transecto, dando lugar a bacteriófagos e fungíveros. A proporção entre os sexos das comunidades de nematoides dependeu dos níveis de poluição por EPTs, sendo os juvenis o grupo de nematoides mais sensível. Como o índice mais sensível de perturbação do ecossistema do solo, os autores consideraram a maturidade e a maturidade modificada. Além disso, a biomassa total dos nematoides de vida livre do solo apresentou um aumento gradual e significativo com o aumento da distância da fonte de poluição.

RODRIGUEZ *et al.* (2012) avaliaram a capacidade de espécies de plantas como *Eucalyptus rostrata*, *Pinus radiata* e *Populus hybridus*, no papel de bioindicadores para PAHs e EPTs, em uma área de fundição de alumínio. Os autores avaliaram a acumulação de poluentes na folhagem das árvores estudadas. Os estudos envolveram a coleta, limpeza, análise em laboratório de PAHs e EPTs na folhagem das árvores. Os resultados demonstraram relação entre os altos índices de PAHs nas amostras e a proximidade com a fonte emissora. Destacou-se ainda que *Eucalyptus rostrata* e *Pinus radiata* foram os mais efetivos bioindicadores para PAHs, segundo os autores devido às características lipofílicas de suas folhas.

MANU *et al.* (2019) investigaram as comunidades de ácaros do solo em um ecossistema de lagoa de rejeitos na Romênia. Os objetivos eram verificar a correlação entre as comunidades de ácaros com as concentrações de EPTs, fatores abióticos e vegetação de cobertura. O estudo utilizou principalmente os ácaros do solo, especificamente os grupos Acari Mesostigmata e Oribatida, como bioindicadores para avaliar as condições ambientais em solos contaminados. A justificativa dos autores para a escolha desses grupos de ácaros no estudo baseou-se em sua alta densidade populacional, diversidade de espécies e sensibilidade às condições do solo. Além disso, o estudo mencionou que os invertebrados, incluindo os ácaros, são mais econômicos e refletem as tendências na riqueza de espécies e na composição da comunidade com mais precisão do que outros grupos, como os vertebrados. Isso os torna bioindicadores valiosos para avaliar as condições do solo. As análises foram conduzidas *in situ* e *ex situ*. A caracterização dos EPTs foi realizada em campo com o uso de espectrômetro de *X-ray fluorescence* [XRF], enquanto as identificações taxonômicas dos ácaros foram realizadas em laboratório, a partir de amostras de solo coletadas na área de interesse. Os resultados demonstraram que as concentrações de EPTs influenciaram as comunidades de ácaros do solo, com espécies específicas de ácaros associadas a diferentes concentrações de EPTs. A estrutura das comunidades de ácaros do solo teve impacto significativo perante a poluição por EPTs somados às condições ambientais de uma lagoa de rejeitos, principalmente as espécies de Oribatida. Esses resultados levaram os autores a intuírem que, particularmente os ácaros dos grupos Mesostigmata e Oribatida são bons bioindicadores para investigarem o estágio ecológico dos solos em estado natural ou em sistemas antropogênicos. A importância dos ácaros como bioindicadores se dá devido a suas altas densidades populacionais, riqueza de espécies, e sensibilidade às condições do solo. Os autores também destacaram que métodos de amostragem bem estruturados são importantes para a efetividade do uso de ácaros como bioindicadores.

VACHT *et al.* (2019) igualmente investigaram comunidades de ácaros do solo em *brownfields*, porém em áreas que apresentavam diferentes estágios sucessionais. O estudo também analisou espécies de Oribatida como *Eupelops torulosus* e *Trichoribates novus*. Amostras de solo foram coletadas das áreas de interesse, levadas a laboratório, onde os ácaros foram extraídos, selecionados, identificados e contabilizados. Os resultados demonstraram que havia relação entre a abundância e diversidade dos ácaros Oribatida e os *brownfields*. Os autores identificaram que a abundância variava entre as áreas estudadas, com as áreas em estágio sucessional jovem apresentando baixa abundância em comparação com os mais antigos. No total foram identificadas 17 espécies. Os autores classificaram terrenos baldios urbanos como *Technosols* devido ao alto grau de artefatos antropogênicos, principalmente resíduos sólidos. Ademais, os autores consideraram que, isoladamente, os ácaros Oribatida não são bons bioindicadores de *brownfields* com estágios sucessionais variados. Isso se deve à alta interferência antropogênica nessas áreas e ao baixo volume de matéria orgânica, o que torna os chamados *Technosols* um habitat muito pobre para os ácaros Oribatida, resultando em baixa abundância e diversidade. Os autores sugeriram que novos estudos ampliem o volume das amostras e combine os resultados com outros grupos de organismos, como os Collembola e Mesostigmata, de maneira que se possa obter uma melhor avaliação das funções ecológicas das áreas.

LIU *et al.* (2023) também trabalharam com ácaros, no caso, em solos arenosos. O objetivo era compreender os efeitos da poluição por EPTs nos ácaros do solo, a partir de uma visão ecológica, por meio de um estudo integrativo, considerando a contaminação e distribuição dos EPTs, propriedades do solo e distribuição local associadas entre riqueza de espécies de ácaros e concentrações de EPTs. O estudo avaliou como bioindicadores, especificamente os ácaros Oribatida e Mesostigmata, para a avaliação do impacto da poluição de atividades de fundição de longo tempo na biodiversidade do solo. Os ensaios envolveram os riscos ecológicos e a avaliação das condições ambientais da poluição no solo. As amostras de solo foram coletadas em campo, levadas a laboratório para a determinação da concentração e distribuição de EPTs, assim como a extração e análise dos ácaros do solo. Os resultados obtidos demonstraram que os efeitos da poluição nas comunidades de ácaros do solo dependem dos grupos de ácaros ou espécies envolvidas e suas sensibilidades aos diferentes EPTs, assim como os tipos de uso realizados na área de interesse. Os estudos mostraram ainda que a ordem Oribatida foi fortemente relacionada com solos impactados por EPTs, enquanto as demais ordens trabalhadas pelos autores respondiam aos EPTs do solo dependendo do tipo de uso,

propriedades dos ácaros, ou EPTs específicos. Os autores consideraram que a avaliação das propriedades da comunidade e diversidade de espécies utilizando ácaros são uma abordagem importante, pois pode refletir direta, objetiva e sinteticamente a situação do solo e os impactos da poluição nos organismos e ecossistemas do solo.

HUO *et al.* (2024) por sua vez trabalharam com o efeito da contaminação por EPTs nas comunidades de nematoides em *brownfields*. A ênfase do trabalho se deu sobre os índices ecológicos usados para descrever a diversidade de espécies de nematoides do solo. Amostras de solo foram coletadas das áreas estudadas, e as comunidades de nematoides foram analisadas a partir dessas amostras. A estrutura das comunidades dos nematoides era influenciada pelas propriedades do solo e pela presença de EPTs, sendo que os EPTs mostraram uma ligação ligeiramente mais forte do que as propriedades do solo. Nematoides de cadeias tróficas elevadas estavam positivamente correlacionados com Cr (VI), o que indicaria uma resposta adaptativa a poluição. Por fim, os nematoides foram considerados bioindicadores eficazes para EPTs. Especificamente, aqueles dos níveis tróficos mais altos têm o potencial de serem utilizados na avaliação do impacto ambiental da contaminação por Cr (VI). Os autores sugeriram novas pesquisas para explorar os mecanismos fundamentais que regem as respostas adaptativas dos nematoides dominantes à exposição ao Cr (VI) e para investigar as possíveis aplicações dessas descobertas em estratégias de biorremediação em áreas contaminadas.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O campo de estudo relacionado à utilização de bioindicadores em *brownfields* metalúrgicos, onde os solos podem estar potencialmente impactados por EPTs, carece de pesquisas acadêmicas adicionais. Dos onze estudos analisados, apenas dois estavam diretamente relacionados à indústria metalúrgica, enquanto os demais investigaram áreas com contaminação por EPTs tão diversas quanto as metalúrgicas e, portanto, foram considerados neste estudo. Essa diversidade de intervenções destaca a importância da avaliação e monitoramento da qualidade do solo diante dos diferentes riscos de contaminação por EPTs. Além disso, a maioria dos estudos revisados foi publicada em revistas classificadas nos quartis superiores, indicando um impacto significativo dos artigos selecionados dentro de seu meio de pesquisa.

Os desafios encontrados incluem o entendimento aprofundado da área a ser estudada, exigindo uma avaliação preliminar abrangente que eficientemente identifique todas as SQIs para a área. A seleção adequada dos bioindicadores, em conjunto com metodologias apropriadas, é fundamental nesse processo. A padronização das técnicas de amostragem também se destaca como um desafio, dada a variedade de metodologias presentes nos estudos, dificultando a comparação entre eles. Ademais, a interpretação dos resultados é complexa, exigindo um entendimento profundo das interações entre os bioindicadores analisados e os EPTs presentes no solo, especialmente considerando que os bioindicadores oferecem resultados exclusivamente qualitativos.

O tipo de uso do solo pode ter um impacto significativo nas comunidades de bioindicadores, atuando como um mediador dos efeitos dos EPTs. Portanto, é crucial considerar as condições ambientais, os usos históricos e atuais da área, bem como o estágio sucessional, ao empregar bioindicadores. Ademais, a diversidade dinâmica das áreas urbanas pode igualmente influenciar as características do ambiente, modificando o impacto dos EPTs nos bioindicadores. Dos estudos analisados, observa-se que os nematoides do solo, especialmente os que ocupam níveis tróficos mais altos, e a ordem Oribatida surgem como bioindicadores promissores. No entanto, ressalta-se a falta de uniformidade nos bioindicadores recomendados, indicando a necessidade de um maior aprofundamento no estudo desses grupos para sua padronização e melhor utilização como indicadores de EPTs em *brownfields* metalúrgicos.

No Brasil, não foram identificados estudos específicos sobre a utilização de bioindicadores na avaliação e monitoramento do compartimento ambiental solo impactado por

EPTs em *brownfields* originados por indústrias metalúrgicas. Como a contaminação por EPTs se destaca dentre o número de áreas contaminadas e reabilitadas do Estado de São Paulo, torna-se importante ampliar o conhecimento referente aos métodos de avaliação e monitoramento dessas áreas. Além disso, a combinação do uso de bioindicadores com análises químicas tradicionais pode oferecer resultados mais apropriados para interpretar as mudanças ambientais decorrentes da poluição e das respostas dos ecossistemas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAHI, U. A.; IBRAHIM, S. An assessment of pollution in aquatic environment using bioindicators: a review. **Bayero Journal of Pure and Applied Sciences**, v. 10, n. 2, p. 64, 16 abr. 2018.

ADAMS, D. *et al.* Brownfield Land: Owner Characteristics, Attitudes and Networks. Em: THORNLEY, A. (Ed.). **Planning in the UK**. 1. ed. [s.l.] Routledge, 2018. p. 317–336.

AHMAD, N. *et al.* Development of a Standard Brownfield Definition, Guidelines, and Evaluation Index System for Brownfield Redevelopment in Developing Countries: The Case of Pakistan. **Sustainability**, v. 10, n. 12, p. 4347, 22 nov. 2018.

ANDRADE, M. G. DE; MELO, V. DE F.; GABARDO, J.; SOUZA, L. C. DE P.; REISSMANN, C. B. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo. I - Fitoextração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.33, p. 1879-1888, out. 2009. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/hNLjRp8byHZMW3cLfKFFPJz/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ARENHARDT, T. C. P.; VITORINO, M. D.; MARTINS, S. V. Insecta and Collembola as bioindicators of ecological restoration in the Ombrophilous Dense Forest in Southern Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 4, p. e20210008, 2021.

BARROS, Y. J. Indicadores biológicos de qualidade de solos de área de mineração e processamento de chumbo, no Município de Adrianópolis (PR). Dissertação (Mestre em Ciência do Solo) - **Universidade Federal do Paraná Setor de Ciências Agrárias Departamento de Solos e Engenharia Agrícola Pós-Graduação em Ciência do Solo**. Curitiba, p. 90, 2008.

BROHON, B.; DELOLME, C.; GOURDON, R. Complementarity of bioassays and microbial activity measurements for the evaluation of hydrocarbon-contaminated soils quality. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 33, n. 7–8, p. 883–891, jun. 2001.

CAKAJ, A.; LISIAK-ZIELINSKA, M.; HANC, A.; MATECKA, A.; BOROWIAK, K.; DRAPIKOWSKA, M. Common weeds as heavy metal bioindicators: a new approach in biomonitoring. **Scientific Reports**, v. 13, 6926, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-023-34019-9>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

CANARIO, P. G. G., BETTINE, S. do C. Gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil: Uma análise crítica. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 39, n. 3, p. 751 - 764, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.5016/geociencias.v39i03.13180>>. Acesso em: 13 nov. 2023.

CETESB. Sistemas de Áreas Contaminadas e Reabilitadas. **Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo**, 2023a. Disponível em: <<https://mapas.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=28e7bb2238a443819447a8ec3ae4abe5>>. Acesso em: 29 dez 2023.

CETESB. Emergências Químicas. **Licenciamento**, 2023b. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/emergencias-quimicas/tipos-de-acidentes/postos-de-combustiveis/acoes-preventivas/licenciamento-postos/>>. Acesso em: 29 dez 2023.

CLARINET. Contaminated land rehabilitation network for environmental technologies. In: *Brownfields and redevelopment of urban areas*. **Federal Environment Agency**, Austria. [S. l.: s. n.], 2002.

DOS SANTOS, A. S. Evolução da contaminação do solo por metais tóxicos: o caso da PLUMBUM MINERAÇÃO E METALURGIA LTDA., Santo Amaro, Bahia, Brasil. Dissertação (Mestre em Geologia, Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrologia e Recursos Hídricos) - **Universidade Federal da Bahia Instituto de Geociências Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geologia Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos**. Salvador, 41 p., 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/33211/1/Aldeneidiane.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2023.

DUŠKOVÁ, M.; VÍTA, M. **Automated Information Retrieval from the Bibliographic Metadata: A Way to Facilitate the Systematic Literature Review**. 4th International Conference on Advanced Research Methods and Analytics (CARMA 2022). **Anais...** Em: CARMA 2022 - 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED RESEARCH METHODS AND ANALYTICS. Universitat Politècnica de València, 29 jun. 2022. Disponível em: <<http://ocs.editorial.upv.es/index.php/CARMA/CARMA2022/paper/view/15104>>. Acesso em: 12 fev. 2024

EEA, European Environment Agency (2016). Land recycling in Europe. **EEAReport**. 31, 51. Luxembourg, 2016. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/publications/land-recycling-in-europe>> . Acesso em: 11 nov. 2023.



FRED, A. O. Trace metal pollution in the environment: A comparison of the bio-indicator concept in three bivalves. **Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology**, jan-jun 2022. Disponível em: < <https://academicjournals.org/journal/JECE/article-abstract/B1270EE68852>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

FREEDMAN, B. **Environmental ecology: the ecological effects of pollution, disturbance and other stresses**. 2 ed. London: Academic Press, 1995. 605 p.

GALLAGHER, F. J. *et al.* Soil metal concentrations and vegetative assemblage structure in an urban brownfield. **Environmental Pollution**, v. 153, n. 2, p. 351–361, maio 2008.

GĄŁUSZKA, A. The Chemistry of Soils, Rocks and Plant Bioindicators in Three Ecosystems of the Holy Cross Mountains, Poland. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 110, n. 1–3, p. 55–70, nov. 2005.

GE, Y.; MURRAY, P.; HENDERSHOT, W. H. Trace metal speciation and bioavailability in urban soils. **Environmental Pollution**, v. 107, n. 1, p. 137–144, jan. 2000.

GE, Y. *et al.* Low metal bioavailability in a contaminated urban site. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 21, n. 5, p. 954–961, maio 2002.

HARTLEY, W. *et al.* Assessing biological indicators for remediated anthropogenic urban soils. **Science of The Total Environment**, v. 405, n. 1–3, p. 358–369, nov. 2008.

HUANG, Y.-N. *et al.* Environmental and human health risks from metal exposures nearby a Pb-Zn-Ag mine, China. **Science of The Total Environment**, v. 698, p. 134326, jan. 2020.

HUO, Z. *et al.* Effect of heavy metal contamination on soil nematode communities in urban *Brownfields*. **Global Ecology and Conservation**, v. 49, p. e02787, jan. 2024.

JEONG, H. *et al.* Pollution Caused by Potentially Toxic Elements Present in Road Dust from Industrial Areas in Korea. **Atmosphere**, v. 11, n. 12, p. 1366, 17 dez. 2020.

CLARIVATE. Journal Citation Reports. **Journal Impact Factor 2022**, 2024.

KASEMODEL, M. C. *et al.* Soil contamination assessment for Pb, Zn and Cd in a slag disposal area using the integration of geochemical and microbiological data. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 188, n. 12, p. 698, dez. 2016.

KESHAVARZI, B. *et al.* Risk-based assessment of soil pollution by potentially toxic elements in the industrialized urban and peri-urban areas of Ahvaz metropolis, southwest of Iran. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 167, p. 365–375, jan. 2019.

KHELIFI, F. *et al.* Evaluation of potentially toxic elements' (EPTs) vertical distribution in sediments of Gafsa–Metlaoui mining basin (Southwestern Tunisia) using geochemical and multivariate statistical analysis approaches. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 2, p. 53, jan. 2019.

LIU, M. *et al.* The effects of pollution by multiple metals derived from long-term smelting activities on soil mite communities in arable soils under different land use types in East China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 16, p. 47182–47208, 3 fev. 2023.

LIU, Y. *et al.* Identifying the sources and spatial patterns of potentially toxic trace elements (EPTs) in Shanghai suburb soils using global and local regression models. **Environmental Pollution**, v. 264, p. 114171, set. 2020.

MAJER, J. D.; NICHOLS, O. G. Long-term recolonization patterns of ants in Western Australian rehabilitated bauxite mines with reference to their use as indicators of restoration success. **Journal of Applied Ecology**, v. 35, n. 1, p. 161–182, fev. 1998.

MANU, M. *et al.* Soil mite communities (Acari: Mesostigmata, Oribatida) as bioindicators for environmental conditions from polluted soils. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 20250, 27 dez. 2019.

MENDONÇA, E.; PICADO, A. Ecotoxicological monitoring of remediation in a coke oven soil. **Environmental Toxicology**, v. 17, n. 1, p. 74–79, jan. 2002.

MOHAN, K. *et al.* A review on use of automation in systematic reviews for scientific evidence generation Short title: An Overview of Automation in Systematic Reviews. **EJMCM**, 2021.

MOHER, David *et al.* Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. **PLoS Medicine**, [s. l.], v. 6, n. 7, p. e1000097, 2009. Disponível em: <<https://www.bmj.com/content/339/bmj.b2535>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

MURRAY, P.; GE, Y.; HENDERSHOT, W. H. Evaluating three trace metal contaminated sites: a field and laboratory investigation. **Environmental Pollution**, 2000.

NITHYATHARANI, R. Termite Soil as Bio-Indicator of Soil Fertility. **International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology**, v. 6, n. 1, p. 659–661, 31 jan. 2018.

PARIKH, G.; RAWTANI, D.; KHATRI, N. “Insects as an Indicator for Environmental Pollution”. **Environmental Claims Journal**, v. 33, n. 2, p. 161–181, 3 abr. 2021.

PARMAR, T. K.; RAWTANI, D.; AGRAWAL, Y. K. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. **Frontiers in Life Science**, v. 9, n. 2, p. 110–118, 2 abr. 2016.

PEN-MOURATOV, S.; SHUKUROV, N.; STEINBERGER, Y. Influence of industrial heavy metal pollution on soil free-living nematode population. **Environmental Pollution**, v. 152, n. 1, p. 172–183, mar. 2008.

POURRET, O. HURSTHOUSE, A. It's time to replace the term “heavy metals” with “potentially toxic elements” when reporting environmental research. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health*, 16 (2019), p. 4446. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1660-4601/16/22/4446>>. Acesso em: 13 nov. 2023

RASHED, M. N.; EL-HATY, M. T. A.; MOHAMED, S. M. Bee honey as environmental indicator for pollution with heavy metals. **Toxicological & Environmental Chemistry**, v. 91, n. 3, p. 389–403, abr. 2009.

RIBÉ, V.; AULENIUS, E.; NEHRENHEIM, E.; MARTELL, U.; ODLARE, M. Applying the Triad method in a risk assessment of a former surface treatment and metal industry site. **Journal of Hazardous Materials**, v. 207–208, p. 15–20, 15 mar. 2012.

RODRIGUEZ, J. H. *et al.* Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in the tree foliage of *Eucalyptus rostrata*, *Pinus radiata* and *Populus hybridus* in the vicinity of a large aluminium smelter in Argentina. **Atmospheric Environment**, v. 55, p. 35–42, ago.

2012.

REY, E.; LAPRISE, M.; LUFKIN, S. Urban *Brownfields*: Origin, Definition, and Diversity. Em: REY, E.; LAPRISE, M.; LUFKIN, S. (Eds.). **Neighbourhoods in Transition**. The Urban Book Series. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 7–45.

SANTO, A. A. DO E. Influência da poluição atmosférica e variáveis ambientais no comportamento de bioindicadores de solo no entorno de uma metalúrgica de cobre na Bahia. Dissertação (Magister Scientiae em Ecologia e Biomonitoramento) - **Universidade Federal da Bahia Instituto de Biologia Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Biomonitoramento**.. Salvador, p. 126, 2004.

SHABANOV, ILYA. **The Effortless Academic's Manual**. 2023. Disponível em: <<https://effortlessacademic.carrd.co/>>. Acesso em: 13 dez. 2023.

SIMONE, L. R. L.; AMARAL, A. C. Z.; TAVARES, M. D. S.; MELO FILHO, E. F. Groups are bioindicators of environmental changes: the presence of molluscs, crustaceans, echinoderms and other groups indicates quality of water and ecosystems. **Ciência no Zoo**, São Paulo, p. 28 - 29, 01 fev. 2018.

SCHWARTZ, G.; ESHEL, G.; BEN-DOR, E. Reflectance Spectroscopy as a Tool for Monitoring Contaminated Soils. Em: PASCUCCI, S. (Ed.). **Soil Contamination**. [s.l.] InTech, 2011.

SHARMA, S.; KAUR, I.; NAGPAL, A. K. Contamination of rice crop with potentially toxic elements and associated human health risks—a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 10, p. 12282–12299, mar. 2021.

THILAKARATNE, M., FALKNER, K., ATAPATTU, T.: A systematic review on literature-based discovery: general overview, methodology, & statistical analysis. **ACM Computing Surveys**. v. 52, i. 6, p. 1–34, 10 dec. 2019.

TOBIAS, S., CONEN, F., DUSS, A., WENZEL, L.M., BUSER, C., ALEWELL, C., 2018. Soil sealing and unsealing: state of the art and examples. **Land Degradation and Development**. 2018; 1 – 10. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/ldr.291910> TOBIAS *ET AL.*>. Acesso em: 09 nov. 2023.

USC. Public Law 107-118-Jan. 11, 2002. Small Business Liability Relief and *Brownfields* Revitalization Act. To provide certain relief for small businesses from liability under the Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act of 1980, and to amend such Act to promote the cleanup and reuse of *Brownfields*, to provide financial assistance for *Brownfields* revitalization, to enhance State response programs, and for other purposes. 107th **Congress**. 42 USC 9601 note. Jan. 11, 2002. Disponível em: <<https://www.congress.gov/107/plaws/publ118/PLAW-107publ118.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2023.

VACHT, P. *et al.* Oribatid mite (Acari: Oribatida) communities of urban *Brownfields* in Tallinn, Estonia, and their potential as bioindicators of wasteland successional stage. **Acarologia**, v. 59, n. 1, p. 26–32, 30 mar. 2019.

VAMPRÉ, T. M.; FUCCILLO, R.; DE ANDRÉA, M. M. Oligoqueta *Elisenia andrei* como bioindicador de contaminação de solo por hexaclorobenzeno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 59-66, 2010.

VASQUES, A. R., MENDES, A. A. **Refuncionalização de *Brownfields***. In Gerardi, L. H. O., Carvalho, P. F. (Orgs). Geografia: ações e reflexões. (pp. 247-261). Rio Claro: Ageteo. Jan 2006. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/313557827\\_REFUNCIONALIZACAO\\_DE\\_BROWNFIELDS](https://www.researchgate.net/publication/313557827_REFUNCIONALIZACAO_DE_BROWNFIELDS)>. Acesso em: 12 nov. 2023.

VENTER, T. Brownfield development is the new green for sustainable mine-dump redevelopment. **Town and Regional Planning**, v. 76, p. 42–55, 29 jun. 2020.

XIAO, X. *et al.* Distribution and health risk assessment of potentially toxic elements in soils around coal industrial areas: A global meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 713, p. 135292, abr. 2020.

ZAGHLOUL, A. *et al.* Biological indicators for pollution detection in terrestrial and aquatic ecosystems. **Bulletin of the National Research Centre**, v. 44, n. 1, p. 127, dez. 2020.

ZHANG, L. *et al.* Contamination Levels and the Ecological and Human Health Risks of Potentially Toxic Elements (EPTs) in Soil of Baoshan Area, Southwest China. **Applied Sciences**, v. 12, n. 3, p. 1693, 7 fev. 2022.