

Review

Contamination by Potentially Toxic Elements and Solitary Bees: a Little-explored Topic

Amanda dos Santos Felix da Silva¹, Taise Bomfim de Jesus¹, Willian Moura de Aguiar^{1*}

¹Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra do Ambiente (PPGM), Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Feira de Santana, BA, Brazil

Received March 06, 2025; Accept July 02, 2025

Abstract

Approximately 80% of the 20,000 known bee species are solitary, providing the ecosystem service of pollination in natural and agricultural environments. However, metal contamination can impair the functioning of these pollinators and, consequently, affect biodiversity maintenance. Despite this, there remains a lack of studies investigating the relationship between toxic elements and solitary bees. Thus, this study surveyed publications on the subject indexed in the *Scopus* database. After applying eligibility and exclusion criteria, seven studies published between 2012 and 2023 were selected for full review. Overall, 71.4% of the studies focused on only two species of the genus *Osmia* (*O. rufa* L. and *O. bicornis* L.), both of which are of agricultural importance in their regions of occurrence. The most investigated metals were cadmium (Cd), lead (Pb), and zinc (Zn), and the ecotoxicological effects identified ranged from alterations in bee behavior to reductions in species abundance and diversity. The research was restricted to Poland, the United Kingdom, and China, excluding biodiverse regions such as the Neotropics. These results highlight significant knowledge gaps regarding the effects of metals on solitary bees, which are exacerbated by geographic and taxonomic limitations in existing studies. The decline of these bees, associated with environmental contamination by toxic elements, can adversely impact ecosystem health and agricultural productivity, underscoring the need for increased investment in future research to advance conservation efforts for these vital pollinators.

Keywords: Bee Ecotoxicology, Ecosystem Service, Environmental Contamination, Pollination.

*Corresponding author: willianaguiar@uefs.br

Contaminação por Elementos Potencialmente Tóxicos e Abelhas Solitárias: um Tema Pouco Explorado

Resumo

Cerca de 80% das 20 mil espécies de abelhas conhecidas possuem hábitos solitários, atuando no serviço ecossistêmico de polinização em ambientes naturais e agrícolas. Contudo a contaminação por metais pode reduzir a função desempenhada por esses polinizadores e consequentemente afetar a manutenção da biodiversidade. Ainda assim, existe uma carência de pesquisas que investiguem a relação entre elementos potencialmente tóxicos e abelhas solitárias. Diante disso, este estudo realizou um levantamento de publicações sobre a temática indexadas na base de dados *Scopus*. Após a aplicação de critérios de elegibilidade e exclusão, foram selecionados sete estudos a serem revisados na íntegra, que abrangem o período de 2012 a 2023. No geral, 71,4% dos estudos focaram em apenas duas espécies do gênero *Osmia* (*O. rufa* L. e *O. bicornis* L.), ambas de interesse agrícola em suas áreas de ocorrência. Os metais mais investigados foram cádmio (Cd), chumbo (Pb) e zinco (Zn) e os efeitos ecotoxicológicos identificados vão desde mudanças no comportamento das abelhas, até redução na abundância e diversidade de espécies. As pesquisas foram restritas à Polônia, ao Reino Unido e à China, o que deixa de fora regiões biodiversas como a Neotropical. Esses resultados evidenciam lacunas no conhecimento sobre os efeitos dos metais em abelhas solitárias, agravadas por restrições geográficas e taxonômicas nos estudos. O declínio das abelhas solitárias associado à contaminação ambiental por elementos potencialmente tóxicos, pode impactar a saúde dos ecossistemas e a produtividade agrícola, destacando a necessidade de maiores investimentos em pesquisas futuras nessa área, a fim de contribuir para o avanço nas medidas de conservação desses importantes polinizadores.

Palavras-chave: Contaminação Ambiental, Ecotoxicologia de Abelhas, Polinização, Serviço Ecossistêmico.

INTRODUÇÃO

A contaminação por elementos potencialmente tóxicos (ETs) é um campo de pesquisa emergente e em expansão, associado ao aumento das concentrações dessas substâncias no ambiente. O crescimento da população humana gera demandas como a expansão de áreas urbanizadas, intensificação de atividades industriais e de tráfego de veículos, o que tem aumentado a disponibilidade desses metais e, consequentemente seus efeitos sinérgicos e muitas vezes deletérios em organismos vivos (Lima *et al.*, 2024; Scott *et al.*, 2022; Skaldina & Sorvari, 2019).

Embora parte desses ETs estejam envolvidos em processos fisiológicos e bioquímicos, alguns são tóxicos mesmo em quantidades mínimas, como o chumbo (Pb) (Bosso & Enzweiler, 2008). Independente da presença ou não de uma função metabólica, a bioacumulação desses elementos compromete a saúde da fauna e flora, que são elementos-chave para a saúde ambiental (Alsherif *et al.*, 2022; Tovar-Sánchez *et al.*, 2018). Atualmente essas questões têm fomentado propostas para investigar a amplitude e a intensidade dos riscos dessa contaminação para a biodiversidade e estrutura e funcionamento dos ecossistemas (Pujari & Kapoor, 2021).

Nesse contexto, as abelhas se destacam como bioindicadores bem estabelecidos para diferentes tipos de poluentes, incluindo os metais (Fiore *et al.*, 2022; Gekière *et al.*, 2023). Esses insetos abrangem uma riqueza de

espécies de grande importância econômica e ecológica, associada, em especial, ao serviço de polinização fundamental para a manutenção da vegetação nativa e produtividade agrícola, e, consequentemente, contribuem para a segurança alimentar global (Patel *et al.*, 2020; Requier *et al.*, 2023).

As abelhas são expostas a elementos potencialmente tóxicos por diferentes vias de exposição. Durante suas atividades de forrageamento, esses insetos podem ser contaminados pelo contato direto com elementos ambientais como vegetação, água, solo ou indiretamente através da ingestão de alimento (pólen e néctar) (Goretti *et al.*, 2020; Scott *et al.*, 2023). Estudos anteriores demonstram que a resposta desses insetos a exposição crônica a ETs pode ser observada por meio de efeitos subletais como mudanças na composição e estrutura da comunidade, alteração no sucesso reprodutivo e redução da eficácia desses insetos como polinizadores, até efeitos letais (Monchanin *et al.*, 2024; Musah, 2024; Xun *et al.*, 2018).

No entanto, a compreensão dos impactos dos metais nas abelhas é oriunda, em grande parte, de trabalhos com espécies sociais. Relativamente poucos estudos abordaram o impacto desses contaminantes em abelhas solitárias (Shi *et al.*, 2023), que representam 80% das espécies de abelhas catalogadas no mundo (Danforth *et al.*, 2019; Michener *et al.*, 2000). Abelhas solitárias, ou seja, espécies que não vivem em colônias e nem produzem mel, contudo atuam igualmente como

polinizadores, podem diferir na resposta à contaminação por ETs. Isso se deve a diferenças em características da história de vida, na sensibilidade a contaminantes ambientais e em aspectos etológicos exclusivos, como diversidade de nichos ocupados e especificidade no uso de recursos de nidificação (Bänsch *et al.*, 2020; Grüter & Hayes, 2022; Sampson *et al.*, 2023; Sgolastra *et al.*, 2024). Esses fatores fazem com que esses insetos interajam com matrizes ambientais de forma distinta, sendo exposta a vias únicas de contaminação.

Estudos que investigam essa temática com um foco mais direcionado, como o caso de pesquisas sobre o uso de biomarcadores em abelhas como ferramenta ecotoxicológica tendem a reproduzir esse padrão relacionado a super-representação de espécies sociais (Badiou-Bénéteau *et al.*, 2013; Caliani *et al.*, 2021; Martinello *et al.*, 2021; Taylor, 2019). No entanto, embora ainda incipiente, estudos como os de Martins *et al.* (2022) e Mokkapati *et al.* (2022) já investigaram essa abordagem com espécies solitárias do gênero *Osmia*. Nestes casos, os autores destacam a resposta de biomarcadores como a enzima acetilcolinesterase, cuja inibição nas abelhas solitárias pode ser associada à exposição a pesticidas e outros contaminantes neurotóxicos oriundos de atividades humanas. A resposta mensurável dessas abelhas por meio de biomarcadores amplamente utilizados em espécies do gênero *Apis* amplia a possibilidade de uso dessas abelhas solitárias na detecção dos efeitos de diferentes poluentes químicos (Leroy *et al.*, 2023; Misiewicz *et al.*, 2024).

A falta de dados sobre a relação entre metais e abelhas solitárias pode levar a previsões pouco precisas e tendenciosas sobre os efeitos ecotoxicológicos da exposição a esses elementos em abelhas solitárias, gerados a partir de generalizações de estudos com espécies sociais (Breidenbach *et al.*, 2023; Shi *et al.*, 2023, Shi *et al.*, 2024; Sivakoff & Gardiner, 2017; Szentgyörgyi *et al.*, 2017). Dessa forma, o objetivo desta revisão foi realizar um levantamento acerca do conhecimento sobre a contaminação por elementos potencialmente tóxicos em abelhas solitárias, identificando as lacunas no conhecimento a respeito do tema e oportunidades de pesquisa futura. Justifica-se o estudo frente a relevância econômica e ecológica das abelhas solitárias, o que torna essencial o estabelecimento de dados de referência para o grupo, de modo a embasar estratégias e ações referentes à conservação direcionadas para essas espécies.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo consiste em uma revisão da literatura científica relativa a elementos potencialmente tóxicos e abelhas solitárias. Para isso buscou-se trabalhos indexados na base de dados *Scopus*, no campo “all

fields”, sem limitar os anos de pesquisa. A primeira busca foi realizada utilizando as combinações dos descritores e operadores booleanos (“bee” OR “solitary bee” OR “apis” OR “meliponini”) AND (“heavy metals” OR “metals” OR “trace metals” OR “trace element” OR “chemical element”), com o objetivo de compreender o panorama geral acerca do tema. Em seguida, essa busca foi refinada, até se chegar aos descritores finais utilizados na pesquisa, a fim de restringir os resultados para estudos focados nas abelhas solitárias: (“solitary bees”) AND (“metals” OR “heavy metals” OR “trace metals” OR “trace element”).

Foram aplicados nesse resultado como critérios de exclusão artigos de revisão e capítulos de livros. Após leitura de título e resumo foram eliminados também estudos focados exclusivamente na ecotoxicologia de pesticidas, fungicidas e inseticidas, bem como trabalhos que não faziam referência às abelhas solitárias em seu conteúdo, ou que fugiam do tema proposto. Os artigos restantes foram lidos na íntegra e avaliados quanto ao conteúdo a fim de verificar se relacionavam a contaminação por elementos potencialmente tóxicos às abelhas solitárias. O resumo gráfico dos procedimentos adotados para seleção dos artigos pode ser visualizado na Figura 1.

Após a leitura criteriosa dos estudos selecionados, os dados referentes aos itens: informações de identificação (título, autoria, país, ano), identificação das espécies de abelhas solitárias, metais investigados e os principais efeitos observados sobre esses insetos, foram compiladas e organizadas em um banco de dados criado no *Microsoft Office Excel*, e utilizados como base para responder às questões colocadas nesta pesquisa.

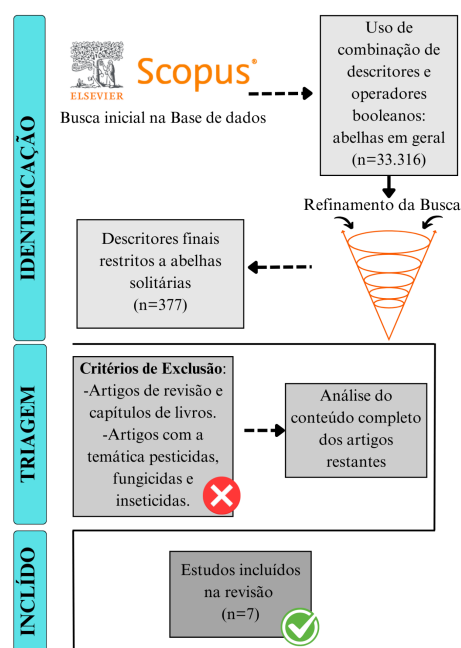


Figura 1: Fluxograma ilustrando as etapas de busca e triagem dos artigos incluídos na presente revisão sobre contaminação por elementos potencialmente tóxicos em abelhas solitárias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca inicial incluindo descritores para abelhas retornou 33.316 resultados, o que demonstra que esse é um campo de pesquisa amplamente explorado. Quando a string de busca foi alterada para limitar a referências com abelhas solitárias, o número de estudos diminuiu para 377 resultados, uma redução de aproximadamente 98%, o que evidencia a discrepância na quantidade de estudos, e indica uma lacuna significativa de pesquisa nesse campo específico.

Essa redução de referências reflete a priorização das abelhas sociais em relação às espécies solitárias em pesquisas de contaminação ambiental, o que pode ser atribuído a inúmeros fatores, dentre os quais destaca-se a facilidade de manejo e a padronização de protocolos experimentais em espécies sociais. Diretrizes internacionais de ecotoxicologia (e.g. Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Económicos - OCDE), utilizam abelhas melíferas como espécie-teste em avaliação de toxicidade de possíveis contaminantes ambientais — embora os protocolos sejam mais relacionados a pesticidas e menos a metais, ainda que muitos façam parte da composição desses produtos — atribuído em especial a existência de métodos validados e dados históricos disponíveis sobre essas abelhas (Gekière *et al.*, 2024).

No entanto, no estudo conduzido pelo *Centre for Ecology & Hydrology* (Spurgeon *et al.*, 2016) os autores demonstraram que abelhas solitárias, submetidas a testes de toxicidade aguda oral apresentaram diferenças na tolerância a metais como cádmio (Cd), em comparação com *Apis mellifera* L. e *Bombus terrestris* L., resultado que reforça a necessidade de ampliar os protocolos de avaliação de risco para incluir uma maior diversidade de abelhas. Há, porém, uma explicação alternativa para a diferença pronunciada nos números de estudos encontrados, que diz respeito a um viés predominantemente econômico. A falta de visibilidade pública acerca de espécies de abelhas solitárias, incluindo sua importância econômica, pode estar limitando o fomento a projetos e, consequentemente, o ingresso de pesquisadores nessa área de estudo.

Mesmo com o recorte nos descritores de busca, 16,9% dos trabalhos filtrados ainda foram com as abelhas sociais e eusociais dos gêneros *Apis* (n=57) e *Bombus* (n=7). Ao final da leitura na íntegra dos artigos, apenas sete dos trabalhos forneceram dados sobre a relação entre elementos potencialmente tóxicos e abelhas solitárias. Detalhes dos estudos elegíveis para revisão, como títulos e autores, podem ser acessados na Tabela 1. Kline e Joshi (2020) realizaram um estudo sobre a perda de habitat em abelhas solitárias em ecossistemas agrícolas. Apesar do contexto diferente, no trabalho em questão, os autores destacam que a predominância de estudos sobre os

gêneros *Apis* e *Bombus* se deve, principalmente, a um caráter econômico associado a dois fatores intrinsecamente relacionados: sua relevância como polinizadores e o declínio populacional das abelhas. Em contrapartida, os estudos com espécies solitárias foram escassos.

A análise detalhada do conteúdo dos artigos filtrados revelou importantes consequências da exposição das abelhas solitárias a elementos potencialmente tóxicos, que variam em magnitude e tipo de impacto. Os efeitos foram distinguidos no indivíduo (alteração no comportamento, reprodução e fenótipo) (28,5%) e na comunidade (redução na diversidade e abundância) (42,8%). Apenas um estudo (Heard *et al.*, 2017) investigou os efeitos dos metais a nível metabólico, a partir da mortalidade das abelhas submetidas a testes de toxicidade aguda. E um dos trabalhos não especificou os efeitos dos metais nas abelhas, apontando apenas as espécies como bioindicadores da contaminação ambiental a partir da concentração de metais identificados nos organismos. Apesar de existir uma tendência a efeitos negativos nesses insetos devido à contaminação por metais, o fato de essas informações serem escassas e pontuais, limita a possibilidade de generalizar com segurança esses resultados.

Os impactos relacionados à diminuição na capacidade de forrageamento e redução no sucesso reprodutivo observados nos estudos revisados são consistentes com achados de outras pesquisas sobre polinizadores, como os de Musah (2025) e Monchanin *et al.* (2023), que relatam efeitos adversos semelhantes em abelhas sociais expostas a elementos potencialmente tóxicos. Outro aspecto a ser destacado, é a relação com os poucos estudos sobre os efeitos metabólicos dos metais nesses organismos. Embora investigue essa questão com espécies sociais, Gao *et al.* (2024) argumentam que a avaliação dos efeitos metabólicos da contaminação por ETs pode ser crucial para um entendimento mais refinado dos impactos ambientais em polinizadores e dos mecanismos subjacentes aos efeitos observados em níveis de organismo e comunidade.

Apesar da riqueza de espécies de abelhas solitárias registrada mundialmente, foi observado que 71,4% dos estudos avaliaram a contaminação por elementos potencialmente tóxicos em apenas duas espécies do gênero *Osmia* (*O. rufa* L. e *O. bicornis* L.). Essas são espécies de interesse econômico nas regiões de ocorrência devido ao histórico de manejo bem estabelecido para polinização comercial em áreas agrícolas, o que pode ser associado a esse resultado (Morón *et al.*, 2014; Zajdel *et al.*, 2023). O estudo de Shi *et al.* (2023) analisou simultaneamente duas espécies (*Xylocopa tranquabarorum* e *Eucera floralia*), enquanto Phillips *et al.* (2020) não especificou a classificação taxonômica, identificando apenas como abelhas solitárias.

Tabela 1. Artigos elegíveis sobre contaminação de elementos potencialmente tóxicos em abelhas solitárias analisados na íntegra.

Título	Autores	País (Ano)	Abelhas (Táxon)	Metais ¹	Principais efeitos observados
Abundance and diversity of wild bees along gradients of heavy metal pollution	Moroń <i>et al.</i>	Polônia e Reino Unido (2012)	<i>Osmia rufa</i>	Cd, Pb e Zn	Redução na abundância e diversidade. Aumento da mortalidade de imaturos.
Survival, reproduction and population growth of the bee pollinator, <i>Osmia rufa</i> (Hymenoptera: Megachilidae), along gradients of heavy metal pollution	Moroń <i>et al.</i>	Polônia e Reino Unido (2014)	<i>Osmia rufa</i>	Cd, Pb e Zn	Menor reprodução e sobrevivência das abelhas e redução na abundância e a diversidade de espécies.
Comparative toxicity of pesticides and environmental contaminants in bees: Are honey bees a useful proxy for wild bee species?	Heard <i>et al.</i>	Reino Unido (2017)	<i>Osmia bicornis</i>	Cd	Toxicidade cumulativa letal.
Forewing structure of the solitary bee <i>Osmia bicornis</i> developing on heavy metal pollution gradient	Szentgyörgyi <i>et al.</i>	Polônia (2017)	<i>Osmia bicornis</i>	Cd, Pb e Zn	Afetou negativamente o tamanho da asa das fêmeas, mas não dos machos.
Impacts of multiple pollutants on pollinator activity in road verges	Phillips <i>et al.</i>	Reino Unido (2020)	Abelhas solitárias ²	Cd, Cu, Pb, Sb e Zn	Alterações no comportamento de forrageamento
Concentration of Heavy Metals in Pollen and Bees <i>Osmia bicornis</i> L. in Three Different Habitats in the Łowicz District in Central Poland	Zajdel <i>et al.</i>	Polônia (2023)	<i>Osmia bicornis</i>	Ag, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn	O estudo apenas quantificou as concentrações dos metais nas abelhas, mas não investigou diretamente os efeitos deles.
The impact of heavy metal pollution on wild bee communities in smallholder farmlands	Shi <i>et al.</i>	China (2023)	<i>Xylocopa tranquebarana</i> , <i>Eucera floricola</i> e pequenas abelhas selvagens	Cd, Cr, Pb, Ni, V e Zn	Redução na riqueza de espécies.

Note: ¹ Antimônio (Sb), cádmio (Cd), chumbo (Pb), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Prata (Ag), Vanádio (V), Zinco (Zn). ² No estudo os autores identificam as espécies apenas como “abelhas solitárias (não *Bombus* e não *Apis*)”.

No mundo são registradas cerca de 20.000 espécies de abelhas, das quais a maioria é solitária, logo, as possíveis implicações dessa lacuna taxonômica incluem a falta de representatividade real dos impactos na diversidade de espécies de abelhas do grupo, o que leva a uma avaliação equivocada e pouco precisa acerca do tema, uma vez que cada grupo responde de maneira única a estressores ambientais (Harrison *et al.*, 2018; LeBuhn & Luna, 2021; Raine & Rundlöf, 2024; Zhao *et al.*, 2021). A falta de uma base taxonômica diversificada dificulta a obtenção de conhecimentos detalhados e verdadeiramente informativos, além de inviabilizar a identificação de possíveis padrões relacionados às respostas dessas abelhas à contaminação por metais (Crandall, 2009).

Os metais mais investigados entre os estudos

foram chumbo (Pb), zinco (Zn) e cádmio (Cd), sendo o último presente em todos os trabalhos. Apesar desses elementos possuírem origens naturais, atualmente suas emissões são principalmente decorrentes de fontes antrópicas, como atividades de mineração, agrícolas e industriais, que se destacam como fontes em comum desses metais (Butt *et al.*, 2018). A dispersão desses elementos no ambiente se dá por meio da deposição atmosférica, poluindo o solo, a água e as plantas. Essa contaminação atinge as abelhas por meio da inalação, ingestão e/ou deposição de partículas presentes no ar (Bosso & Enzweiler, 2008; Knoll & Cappai, 2024; Schmarsow *et al.*, 2023). No entanto, a recorrência desses três metais pode refletir não apenas a ampla dispersão desses elementos no ambiente, mas também seus

impactos ecotoxicológicos sobre diferentes espécies de abelhas. Uma vez absorvidos, esses metais podem desencadear efeitos negativos como estresse oxidativo, alteração na capacidade cognitiva e, consequentemente, capacidade de forrageamento e comportamento alimentar, até redução na aptidão e sobrevivência (Glavan *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2025; Monchanin *et al.*, 2021).

Nesse sentido, Ćwieląg-Drabek *et al.* (2020) observaram um padrão semelhante relacionado à presença desses elementos no ambiente; os autores encontraram esses metais nos solos e na vegetação de hortas familiares, ressaltando seu potencial de ingresso nas cadeias tróficas. No entanto, compreender os impactos desses elementos exige mais do que a identificação de sua presença no ambiente, é necessário investigar seus efeitos diretos e interativos nos organismos expostos.

Estudos como o de Robinson *et al.* (2017) evidenciam que o Cd, além de ser um contaminante ambiental frequente, pode suprimir a taxa metabólica de abelhas, levando a danos celulares que afetam diretamente a sobrevivência e o desempenho dos polinizadores. Enquanto Filipiak e Filipiak (2020) apontam que a escassez de Zn na dieta larval de abelhas do gênero *Osmia* aumenta a mortalidade masculina. Embora esses estudos apresentem resultados acerca dos efeitos de metais isolados, o mais provável é que, no ambiente, os organismos sejam expostos a múltiplos contaminantes, com a possibilidade de sinergismo entre eles (Laetz *et al.*, 2015). Uma série de estudos relata como a interação entre diferentes metais potencializa os efeitos tóxicos desses elementos e seus efeitos na biodiversidade (e.g., Akram *et al.*, 2022; Cedergreen, 2014; Fettweis *et al.*, 2023; Gong *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2024). O estudo de Musah (2024), por exemplo, apresenta evidências de que a exposição combinada a metais compromete aspectos relacionados a interações planta-polinizador, desde a qualidade do néctar até a eficiência da polinização.

Além disso, geralmente apenas o contato com ETs não é suficiente para gerar efeitos deletérios à biodiversidade; essa contaminação depende ainda de fatores como a biodisponibilidade e o tempo de exposição a esses elementos (Hamelink *et al.*, 2024). O estudo de But *et al.* (2018) encontrou diferenças significativas na bioacumulação de Cd, Pb e Zn em gafanhotos, pulgões e joaninhas, que segundo os autores se deve a fatores como grupo taxonômico e nível trófico, que interferem diretamente em como insetos acumulam metais. Assim, o entendimento desses processos é fundamental para abordagens empíricas que utilizem ferramentas da ecotoxicologia para avaliar a saúde dos polinizadores, de modo a considerar não apenas a presença de um metal, mas também a complexidade das dinâmicas entre biodisponibilidade, período e efeitos combinados das exposições a múltiplos elementos (Peakall & Burger, 2003).

Outro aspecto analisado diz respeito aos países em que os estudos foram desenvolvidos. A localização restrita a Polônia, Reino Unido e China constata a existência de um viés geográfico e deixa de fora áreas como a região Neotropical que é rica em biodiversidade (Freitas *et al.*, 2009; Lagomarsino & Frost, 2020). Esse resultado evidencia que o tema ainda é um assunto negligenciado na maior parte do mundo.

Cenário ainda mais preocupante em países ricos em biodiversidade e de dimensões continentais como o Brasil, que nos últimos anos tem registrado de forma recorrente os rompimentos de barragens de rejeitos, que resultam na liberação abrupta e descontrolada de elementos potencialmente tóxicos no ambiente (Reis *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2022; Vergilio *et al.*, 2020). Embora existam iniciativas destinadas ao estudo dos impactos desses desastres ambientais na biodiversidade, incluindo em abelhas solitárias (por exemplo, Plano EKOS Brasil, 2020 – Proposta de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre), ainda não há publicações sobre o tema, logo os efeitos desses poluentes na fauna de abelhas solitárias no país permanecem pouco compreendidos, assim como na maior parte do mundo.

Entre os resultados encontrados, destaca-se também a temporalidade das publicações analisadas. Embora não tenha sido estabelecido como critério de elegibilidade, os estudos selecionados compreendem o intervalo de 11 anos, distribuídos entre os anos de 2012 e 2023, apresentando apenas uma publicação por ano, exceto nos anos de 2017 e 2023, que apresentam 2 publicações cada. A partir desses dados, é possível perceber que esse é um campo de pesquisa relativamente novo, com um histórico recente de publicações. Na última década têm se intensificado as preocupações no meio científico e político acerca do declínio de polinizadores, o que representa uma ameaça econômica a nível global (Murphy *et al.*, 2022; Nath *et al.*, 2022). Acompanhado disso, existe um avanço tecnológico que permite análises mais rápidas e precisas sobre efeitos da contaminação ambiental por elementos potencialmente tóxicos. Esses fatores juntos podem explicar o surgimento de pesquisas sobre o tema em função de melhorias nas condições de pesquisa, como recursos, tecnologia e apoio financeiro (Chauhan *et al.*, 2022; Ferrari *et al.*, 2020; Lebuhn & Luna, 2021; Lima *et al.*, 2022).

CONCLUSÃO

Os resultados encontrados evidenciam lacunas de conhecimentos acerca da ecotoxicologia dos elementos potencialmente tóxicos em abelhas solitárias. Além do número reduzido de estudos, observa-se uma limitação taxonômica e geográfica nos resultados. A limitação de trabalhos impossibilita fazer conclusões precisas sobre a temática. Assim, compreender os reais impactos dos

elementos potencialmente tóxicos em abelhas solitárias apresenta dificuldades únicas que ainda precisam ser superadas para avançar como um ramo da ecotoxicologia.

Nesse sentido, torna-se fundamental expandir o escopo das pesquisas acerca dos impactos da contaminação por elementos potencialmente tóxicos para englobar a riqueza de espécies de abelhas solitárias, além de ampliar a abrangência espacial abordando múltiplas fontes de poluição e contaminantes. De modo que, o nível de bioacumulação de elementos potencialmente tóxicos nos tecidos dessas abelhas possa ser utilizado como bioindicadores capazes de complementar dados fornecidos por outros métodos, químicos ou físicos nas análises ambientais, ou mesmo revelar novos aspectos sobre a influência de contaminantes ambientais na biodiversidade. Para isso, é fundamental que se aumente o fomento a pesquisas nessa área de estudo, a fim de contribuir para o avanço nas medidas de conservação direcionadas a esse grupo particular de polinizadores.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o financiamento fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB, através do programa Biorrecursos, Recursos Hídricos e Sustentabilidade Ambiental na Bahia, por meio do Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Edital nº 38/2022, Acordo de Cooperação Técnica nº 294/2023 e Acordo de Subvenção nº PPF0003/2023. ASFS agradece pela bolsa de mestrado de demanda social da Capes. Agradecemos também o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) CNPq/MCTI através do projeto: Presente, passado e futuro da biodiversidade do Semiárido: inventários, monitoramento, impacto das mudanças climáticas e implicações para o uso e conservação da flora, fauna e fungos, nº 441271/2023-5.

DECLARAÇÃO DE CRÉDITO DO AUTOR

ASFS: Redação e Metodologia, **WMA:** Conceituação, Redação e Revisão, **TBJ:** Conceituação, Redação e Revisão. Todos os autores editaram o manuscrito.

REFERÊNCIAS

- Akram, S., Butt, A., & Khan, S. A. (2022) Toxicity of Imidacloprid Administered Alone and in Combination with Heavy Metal Lead on Silkworm, *Bombyx mori* (Lepidoptera: Bombycidae). *Pakistan Journal of Zoology*, 55(1), 1-7. [Http://dx.doi.org/10.17582/journal.pjz/20210623070](http://dx.doi.org/10.17582/journal.pjz/20210623070)
- Alsherif, E. A., Al-Shaikh, T. M., & Abdelgawad, H. (2022). Heavy metal effects on biodiversity and stress responses of plants inhabiting contaminated soil in Khulais, Saudi Arabia. *Biology*, 11(2), 164. <https://doi.org/10.3390/biology11020164>
- Badiou-Bénéteau, A., Benneveau, A., Gêret, F., Delatte, H., Becker, N., Brunet, J. L., Reynaud, B., & Belzunces, L. P. (2013) Honeybee biomarkers as promising tools to monitor environmental quality. *Environment International*, 60, 31-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2013.07.002>.
- Bänsch, S., Tschardtke, T., Gabriel, D., & Westphal, C. (2021). Crop pollination services: Complementary resource use by social vs solitary bees facing crops with contrasting flower supply. *Journal of Applied Ecology*, 58(3), 476-485. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13777>
- Bosso, S. T., & Enzweiler, J. (2008). Ensaios para determinar a (Bio)disponibilidade de chumbo em solos contaminados: revisão. *Química Nova*, 31(2), 394-400. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422008000200036>.
- Breidenbach, L. R., Benner, L., Roß-Nickoll, M., Linnemann, V., & Schäffer, A. (2023). Monitoring metal patterns from urban and agrarian sites using the bumblebee *Bombus terrestris* as a bioindicator. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(57), 119947-119960. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30504-w>
- Butt, A., Qurat-Ul-Ain, Rehman, K., Khan, M. X., & Hesselberg, T. (2018). Bioaccumulation of cadmium, lead, and zinc in agriculture-based insect food chains. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(12), 1-12. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-018-7051-2>.
- Caliani, I., Campani, T., Conti, B., Cosci, F., Bedini, S., D'agostino, A., Ammendola, A., Noi, A. D., Gori, A., & Casini, S. (2021). Multi-biomarker approach and IBR index to evaluate the effects of different contaminants on the ecotoxicological status of *Apis mellifera*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111486. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111486>.
- Cedergreen, N. (2014). Quantifying Synergy: a systematic review of mixture toxicity studies within environmental toxicology. *Plos One*, 9(5), e96580. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0096580>.
- Chauhan, S., Dahiya, D., Sharma, V., Khan, N., Chaurasia, D., Nadda, A. K., Varjani, S., Pandey, A., & Bhargava, P. C. (2022). Advances from conventional to real-time detection of heavy metal(loid) for water monitoring: An overview of biosensing applications. *Chemosphere*, 307, 136124. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136124>
- Crandall, K. A. (2009). A multifaceted approach to

- species conservation. *Animal Conservation*, 12, 105–106.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-1795.2009.00254.x>
- Ćwieląg-Drabek, M., Piekut, A., Gut, K., & Grabowski, M. (2020). Risk of cadmium, lead, and zinc exposure from consumption of vegetables produced in areas with mining and smelting past. *Scientific Reports*, 10(1), 1–9.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-60386-8>
- Danforth, B. N., Minckley, R. L., & Neff, J. L. (2019). *The solitary bees: Biology, evolution, conservation*. Princeton University Press.
- Ferrari, A. G.-M., Carrington, P., Rowley-Neale, S. J., & Banks, C. E. (2020). Recent advances in portable heavy metal electrochemical sensing platforms. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6, 2676–2690.
<https://doi.org/10.1039/D0EW00407C>
- Fettweis, A., Hansul, S., Schamphelaere, K., & Smolders, E. (2023). Metal Mixture Toxicity of Ni, Cu, and Zn in Freshwater Algal Communities and the Correlation of Single-Species Sensitivities Among Single Metals: a comparative analysis. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 42(12), 2666–2683. <http://dx.doi.org/10.1002/etc.5735>.
- Filipiak, Z. M., & Filipiak, M. (2020). The Scarcity of Specific Nutrients in Wild Bee Larval Food Negatively Influences Certain Life History Traits. *Biology*, 9(12), 462.
<http://dx.doi.org/10.3390/biology9120462>.
- Fiore, C. di, Nuzzo, A., Torino, V., Cristofaro, A., Notardonato, I., Passarella, S., Giorgi, S. di, & Avino, P. (2022). Honeybees as bioindicators of heavy metal pollution in urban and rural areas in the South of Italy. *Atmosphere*, 13(4), 624.
<https://doi.org/10.3390/atmos13040624>
- Freitas, B. M., Imperatriz-Fonseca, V. L., Medina, L. M., Kleinert, A. M. P., Galetto, L., Nates-Parra, G., & Quezada-Euán, J. J. G. (2009). Diversity, threats and conservation of native bees in the Neotropics. *Apidologie*, 40(3), p. 332–346.
<http://dx.doi.org/10.1051/apido/2009012>.
- Gao, S., Zheng, F., Yue, L., & Chen, B. (2024). Chronic cadmium exposure impairs flight behavior by dampening flight muscle carbon metabolism in bumblebees. *Journal of Hazardous Materials*, 466, 133628.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133628>
- Gekièrè, A., Breuer, L., Dorio, L., Vanderplanck, M., & Michez, D. (2024). Lethal effects and sex-specific tolerance of copper and cadmium in the buff-tailed bumble bee. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 110, 104546.
<https://doi.org/10.1016/j.etap.2024.104546>
- Gekièrè, A., Vanderplanck, M., & Michez, D. (2023). Trace metals with heavy consequences on bees: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 895, 165084.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165084>
- Glavan, G., Benko, G., & Božič, J. (2024). Impact of copper and zinc oral chronic exposure on Carniolan honey bee survival and feeding preference. *Journal of Economic Entomology*, 117(4), 1485–1492.
<http://dx.doi.org/10.1093/jee/toae108>.
- Gong, B., Qiu, H., Romero-Freire, A., Van Gestel, C. A. M., & He, E. (2020). Incorporation of chemical and toxicological availability into metal mixture toxicity modeling: state of the art and future perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(10), 1730–1772.
<http://dx.doi.org/10.1080/10643389.2020.1862560>.
- Goretti, E., Pallottini, M., Rossi, R., Laporta, G., Gardi, T., Goga, B. T. C., Elia, A. C., Galletti, M., Moroni, B., & Petroselli, C. (2020). Heavy metal bioaccumulation in honey bee matrix, an indicator to assess the contamination level in terrestrial environments. *Environmental Pollution*, 256, 113388.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113388>
- Grüter, C., & Hayes, L. (2022). Sociality is a key driver of foraging ranges in bees. *Current Biology*, 32, 5390–5397.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.10.064>
- Hamelink, J. L., Landrum, P. F., Bergman, H. L., & Benson, W. H. (Eds.). (2024) *Bioavailability: physical, chemical, and biological interactions*. Setac.
- Harrison, T., Gibbs, J., & Winfree, R. (2018). Forest bees are replaced in agricultural and urban landscapes by native species with different phenologies and life-history traits. *Global Change Biology*, 24, 287–296. <https://doi.org/10.1111/gcb.13921>
- Heard, M. S., Baas, J., Dorne, J. L., Lahive, E., Robinson, A. G., Rortais, A., Spurgeon, D. J., Svendsen, C., & Hesketh, H. (2017) Comparative toxicity of pesticides and environmental contaminants in bees: are honey bees a useful proxy for wild bee species?. *Science of the Total Environment*, 578, 357–365.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.180>
- Kline, O., & Joshi, N. K. (2020). Mitigating the effects of habitat loss on solitary bees in agricultural ecosystems. *Agriculture*, 10(4), 115.
<https://doi.org/10.3390/agriculture10040115>
- Laetz, C. A., Hecht, S. A., Incardona, J. P., Collier, T. K., & Scholz, N. L. (2015) *Ecotoxicological Risk of Mixtures*. *Aquatic Ecotoxicology*, 441–462.
<http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-800949-9.00018-8>.
- Lagomarsino, L. P., & Frost, L. A. (2020). The central role of taxonomy in the study of Neotropical biodiversity. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 105(3), 405–421.
<https://doi.org/10.3417/2020601>
- Lebuhn, G., & Luna, J. V. (2021). Pollinator decline:

- What do we know about the drivers of solitary bee declines? *Current Opinion in Insect Science*, 46, 106-111. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2021.05.004>
- Leroy, C., Brunet, J., Henry, M., & Alaux, C. (2023) Using physiology to better support wild bee conservation. *Conservation Physiology*, 11(1), 1-15. <http://dx.doi.org/10.1093/conphys/coac076>.
- Li, D., Liu, J., Yuan, Y., Chen, J., & Mu, J. (2025) Cadmium Contaminants in Pollen and Nectar Are Variably Linked to the Growth and Foraging Behaviors of Honey Bees. *Insects*, 16(3), 306. <http://dx.doi.org/10.3390/insects16030306>.
- Li, X., Li, Y., Chernick, M., Hinton, D. E., Zheng, N., Du, C., Dong, W., Wang, S., & Hou, S. (2024) Single and mixture toxicity of cadmium and copper to swim bladder in early life stages of Japanese medaka (*Oryzias latipes*). *Environmental Geochemistry and Health*, 46(1), 1-15. <http://dx.doi.org/10.1007/s10653-023-01817-z>.
- Lima, L. H. V., da Silva, F. B. V., Araújo, P. R. M., Alvarez, A. M., Pôrto, K. C., & Nascimento, C. W. A. (2024). Assessing heavy metal contamination in a Brazilian metropolis: a case study with a focus on (bio)indicators. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196, 481. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12661-8>
- Lima, M. A. P., Cutler, G. C., Mazzeo, G., & Hrncir, M. (2022). Editorial: The decline of wild bees. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 1-3. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1027169>
- Martinello, M., Manzinello, C., Dainese, N., Giuliano, I., Gallina, A., & Mutinelli, F. (2021) The Honey Bee: an active biosampler of environmental pollution and a possible warning biomarker for human health. *Applied Sciences*, 11(14), 6481. <http://dx.doi.org/10.3390/app11146481>.
- Martins, C. A. H.; Caliani, I., D'agostino, A., Noi A. D., Casini, S., Parrilli, M., Azpiazu, C., Bosch J., & Sgolastra, F. (2022) Biochemical responses, feeding and survival in the solitary bee *Osmia bicornis* following exposure to an insecticide and a fungicide alone and in combination. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 27636-27649. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-022-24061-x>.
- Michener, C. D. (2000). *The bees of the world*. Johns Hopkins University Press.
- Misiewicz, A., Filipiak, Z. M., Kadyrova, K., & Bednarska, A. J. (2024) Combined effects of three insecticides with different modes of action on biochemical responses of the solitary bee *Osmia bicornis*. *Chemosphere*, 359, 142233. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142233>
- Mokkapat, J. S., Bednarska, A. J., & Laskowski, R. (2022) Physiological and biochemical response of the solitary bee *Osmia bicornis* exposed to three insecticide-based agrochemicals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 230, 113095. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113095>.
- Monchanin, C., Blanc-Brude, A., Drujont, E., Negahi, M. M., Pasquaretta, C., Silvestre, J., Baqué, D., Elger, A., Barron, A. B., & Devaud, J. (2021) Chronic exposure to trace lead impairs honey bee learning. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 212, 112008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112008>.
- Monchanin, C., Burden, C., Barron, A. B., & Smith, B. H. (2023). Heavy metal pollutants: The hidden pervasive threat to honey bees and other pollinators. *Advances in Insect Physiology*, 255-288. <https://doi.org/10.1016/bs.aiip.2023.01.005>
- Monchanin, C., Drujont, E., Roux, G. L., Lösel, P. D., Barron, A. B., Devaud, J.-M., Elger, A., & Lihoreau, M. (2024). Environmental exposure to metallic pollution impairs honey bee brain development and cognition. *Journal of Hazardous Materials*, 465, e133218. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133218>
- Moroń, D., Szentgyörgyi, H., Skórka, P., Potts, S., & Woyciechowski, M. (2014) Survival, reproduction and population growth of the bee pollinator, *Osmia rufa* (Hymenoptera: megachilidae), along gradients of heavy metal pollution. *Insect Conservation and Diversity*, 7(2), 113-121. <http://dx.doi.org/10.1111/icad.12040>.
- Murphy, J. T., Breeze, T. D., Willcox, B., Kavanagh, S., & Stout, J. C. (2022). Globalisation and pollinators: pollinator declines are an economic threat to global food systems. *People And Nature*, 4(3), 773-785. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pan3.10314>.
- Musah, B. I. (2024) Effects of heavy metals and metalloids on plant-animal interaction and biodiversity of terrestrial ecosystems—an overview. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(1), 1-26. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-024-13490-5>.
- Nath, R., Singh, H., & Mukherjee, S. (2022). Insect pollinators decline: an emerging concern of anthropocene epoch. *Journal Of Apicultural Research*, 62(1), 23-38. <https://doi.org/10.1080/00218839.2022.2088931>
- Patel, V., Pauli, N., Biggs, E., Barbour, L., & Boruff, B. (2020). Why bees are critical for achieving sustainable development. *Ambio*, 50(1), 49-59. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01333-9>
- Peakall, D., & Burger, J. (2003) Methodologies for assessing exposure to metals: speciation, bioavailability of metals, and ecological host factors. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 56(1), 110-121. [http://dx.doi.org/10.1016/s0147-6513\(03\)00055-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0147-6513(03)00055-1).
- Phillips, B. B., J. M. Bullock, K. J. Gaston, *et al.*, 2021. "Impacts of Multiple Pollutants on Pollinator Activity in Road Verges." *Journal of Applied Ecology* 58, no. 5: 1017–1029. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13844>.

- Pujari, M., & Kapoor, D. (2021). Heavy metals in the ecosystem: Sources and their effects. In *Heavy Metals in the Environment* (pp. 1-7). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821656-9.00001-8>
- Raine, N. E., & Rundlöf, M. (2024). Pesticide Exposure and Effects on Non-Apis Bees. *Annual Review of Entomology*, 69(1), 551-576. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-ento-040323-020625>.
- Reis, M. O., Moura, A. C. M. B., Cota, G. E. M., & Magalhães Júnior, A. P. (2020). Panorama dos rompimentos de barragens de rejeito de minério no mundo. *Caderno de Geografia*, 30(61), 368. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2020v30n61p368>
- Requier, F., Pérez-Méndez, N., Andersson, G. K. S., Blareau, E., Merle, I., & Garibaldi, L. A. (2023). Bee and non-bee pollinator importance for local food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 38(2), 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.10.006>
- Robinson, A., Hesketh, H., Lahive, E., Horton, A. A., Svendsen, C., Rortais, A., Dorne, J. L., Baas, J., Heard, M. S., & Spurgeon, D. J. (2017). Comparing bee species responses to chemical mixtures: common response patterns?. *Plos One*, 12(6), e0176289. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0176289>.
- Sampson, B., Gregorc, A., Alburaki, M., Werle, C., Karim, S., Adamczyk, J., & Knight, P. (2023). Sensitivity to imidacloprid insecticide varies among some social and solitary bee species of agricultural value. *PLoS ONE*, 18(5), e0285167. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285167>
- Scott, S. B., Sivakoff, F. S., & Gardiner, M. M. (2022). Exposure to urban heavy metal contamination diminishes bumble bee colony growth. *Urban Ecosystems*, 25(3), 989-997. <https://doi.org/10.1007/s11252-022-01206-x>
- Scott, S. B., Sivakoff, F. S., Meuti, M. E., & Gardiner, M. M. (2023). Metals could challenge pollinator conservation in legacy cities. *Journal of Insect Conservation*, 27(3), 361-375. <https://doi.org/10.1007/s10841-023-00474-y>
- Sgolastra, F., Arnan, X., Azpiazu, C., Bordoni, A., Bosch, J., Lenzi, L., Martins, C., Parrilli, M., & Porrini, C. (2024). Honey bees and mason bees as biological indicators of landscape pesticide loads: Different results but similar conclusions. *Ecological Indicators*, 166, 112425. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112425>
- Shi, X., Ma, C., Gustave, W., Orr, M. C., Yuan, Z., Chen, J., Yang, G., Niu, Z., Zhou, Q., & Xia, C. (2023). The impact of heavy metal pollution on wild bee communities in smallholder farmlands. *Environmental Research*, 233, 116515. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116515>
- Shi, X., Ma, C., Gustave, W., Orr, M., Sritongchuay, T., Yuan, Z., Wang, M., Zhang, X., Zhou, Q., & Huang, Y. (2024). Effects of arsenic and selenium pollution on wild bee communities in the agricultural landscapes. *Science of the Total Environment*, 907, 168052. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168052>
- Silva, F. L., Cunha-Santino, M. B., Fushita, Â. T., Mininel, V. A., & Bianchini Júnior, I. (2022). Relações entre saúde e ambiente: Potenciais impactos decorrentes do rompimento de barragens de rejeitos - uma revisão da literatura nos casos de Mariana e Brumadinho, MG. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 59, 94-109. <https://doi.org/10.5380/dma.v59i0.74469>
- Sivakoff, F. S., & Gardiner, M. M. (2017). Soil lead contamination decreases bee visit duration at sunflowers. *Urban Ecosystems*, 20(6), 1221-1228. <https://doi.org/10.1007/s11252-017-0674-1>
- Skaldina, O., & Sorvari, J. (2019). Ecotoxicological Effects of Heavy Metal Pollution on Economically Important Terrestrial Insects. In: Kesari, K. (Ed.). *Networking of Mutagens in Environmental Toxicology*. Environmental Science and Engineering (pp. 137-144). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96511-6_7
- Spurgeon D., Hesketh H., Lahive E., Svendsen C., Baas J., Robinson A., Horton A., & Heard M. (2016). Chronic oral lethal and sub-lethal toxicities of different binary mixtures of pesticides and contaminants in bees (*Apis mellifera*, *Osmia bicornis* and *Bombus terrestris*). EFSA supporting publication 13(9). doi: 10.2903/sp.efsa.2016.EN-1076
- Szentgyörgyi, H., Bláhová, P., Šigut, M., & Heneberg, P. (2017). Forewing structure of the solitary bee *Osmia bicornis* developing on heavy metal pollution gradient. *Ecotoxicology*, 26, 1031-1040. <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1833-7>
- Taylor, M. P. (2019) Bees as biomarkers. *Nature Sustainability*, 2(3), 169-170. <http://dx.doi.org/10.1038/s41893-019-0247-9>.
- Tovar-Sánchez, E., Hernández-Plata, I., Martínez, M. S., Valencia-Cuevas, L., & Galante, P. M. (2018). Heavy metal pollution as a biodiversity threat. In *Heavy metals* (pp. 383-399). InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74052>
- Vergilio, C. S., Lacerda, D., Oliveira, B. C. V. de, Sartori, E., Campos, G. M., Pereira, A. L. S., Aguiar, D. B., Souza, T. S., Almeida, M. G., & Thompson, F. (2020). Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). *Scientific Reports*, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62700-w>
- Xun, E., Zhang, Y., Zhao, J., & Guo, J. (2018). Heavy metals in nectar modify behaviors of pollinators and

nectar robbers: Consequences for plant fitness. *Environmental Pollution*, 242, 1166–1175. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.128>

Zajdel, B., Migdal, P., Murawska, A., Jojczyk, A., Berbeć, E., Kucharska, K. & Gąbka, J. (2023). Concentration of Heavy Metals in Pollen and Bees *Osmia bicornis* L. in Three Different Habitats in the Łowicz District in Central Poland. *Agriculture*, 13(12), 2209. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture13122209>.

Zhao, H., Li, G., Guo, D., Li, H., Liu, Q., Xu, B., & Guo, X. (2021). Response mechanisms to heat stress in bees. *Apidologie*, 52, 388–399. <https://doi.org/10.1007/s13592-020-00830-w>

Editor-in-chief:

Dr. Jeanylle Nilin

Associate Editor:

Dr. Adriana Gioda



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.