

Organismos bioindicadores de metais pesados: uma revisão

Metais pesados compreendem uma classe de metais com densidade superior a 5g/cm³ que em concentrações mínimas exercem funções importantes para os seres vivos, porém, quando em altas concentrações se tornam tóxicos para os organismos e para o meio ambiente. A liberação destes metais pesados na natureza está frequentemente relacionada a ações antropogênicas, como nas indústrias, na agricultura e nas atividades de mineração. Portanto, o monitoramento destes poluentes é de grande importância, a fim de evitar danos ao meio ambiente e aos seres vivos. A utilização de organismos ou comunidades de organismos como bioindicadores é um método de monitoramento ambiental bastante vantajoso, visto que há a possibilidade de avaliação dos impactos ao longo do tempo, as análises não são tendenciosas e apresentam resultados confiáveis. Diante disso, este trabalho teve como objetivo compilar artigos dos últimos 20 anos sobre organismos utilizados como bioindicadores da contaminação por metais pesados no meio ambiente. Dentre estes organismos destacaram-se as plantas, mamíferos, microrganismos, aves, peixes e insetos com notório potencial bioindicador de uma ampla gama de metais pesados. Diante da dinâmica ambiental, a obtenção de diferentes dados de bioindicadores para o monitoramento de um local se torna necessária para a obtenção de resultados mais precisos e rápidos.

Palavras-chave: Metais pesados; Bioindicadores; Biomonitorios; Poluição ambiental.

Bioindicator Organisms of Heavy Metals: a review

Heavy metals comprise a class of metals with a density greater than 5g/cm³ which in minimal concentrations exert important functions for living beings, however, when in high concentrations they become toxic to organisms and the environment. The release of these heavy metals into nature is often related to anthropogenic actions, such as in industries, agriculture and mining activities. Therefore, monitoring this pollutant is of great importance, in order to avoid major damage to the environment and living beings. The use of organisms or communities of organisms as bioindicators is a very advantageous environmental monitoring method, since there is a possibility of evaluating impacts over time, as analyzes are not biased and present results obtained. Therefore, this work aimed to compile articles from the last 20 years on organisms used as bioindicators of heavy metal contamination in the environment. Among these organisms stood out as plants, mammals, microorganisms, birds, fish and insects with notorious bioindicator potential of a wide range of heavy metals. Given the environmental dynamics, obtaining different data from bioindicators for monitoring a location becomes necessary to obtain more accurate and faster results.

Keywords: Heavy metals; Bioindicators; Biomonitorios; Environmental pollution

Topic: **Biotechnology**

Received: **14/12/2021**

Approved: **15/01/2022**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Jonatas Alécio dos Prazeres 
Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/5411779048151155>
<https://orcid.org/0000-0003-4753-0351>
jonatasap2008@hotmail.com

Débora Leal 
Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7189520711272602>
<http://orcid.org/0000-0002-1863-3848>
pg403629@uem.br

Paola Pereira Constantin 
Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8699271832215069>
<http://orcid.org/0000-0001-9695-4244>
paolaconstantin@gmail.com

Carolina de Sousa 
Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/9956682367329609>
<http://orcid.org/0000-0002-6124-8777>
carolinasousa08@outlook.com

Caroline Rosa Silva 
Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7005841803891310>
<http://orcid.org/0000-0003-0828-1145>
carolinerosa5@hotmail.com

Gilsemara dos Santos Cagni 
Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1918081047288115>
<http://orcid.org/0000-0002-4204-4349>
gscagni18@gmail.com

Helio Conte 
Universidade Estadual de Maringá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7805899028515988>
<http://orcid.org/0000-0002-2090-0554>
hconte@uem.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.001.0015

Referencing this:

PRAZERES, J. A.; LEAL, D.; CONSTANTIN, P. P.; SOUSA, C.; SILVA, C. R.; CAGNI, G. S.; CONTE, H.. Organismos bioindicadores de metais pesados: uma revisão. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.13, n.1, p.179-194, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.001.0015>

INTRODUÇÃO

Metais pesados são metais com densidade superior a 5g/cm³, como exemplos cobre (Cu) cádmio (Cd), cromo (Cr), prata (Ag), chumbo (Pb), zinco (Zn), ferro (Fe), mercúrio (Hg), níquel (Ni), entre outros (AGARWAL, 2009). Em quantidades mínimas os metais, exceto Pb e Cd, desempenham papéis importantes para os seres vivos, mas em quantidades elevadas, são tóxicos (WHO, 1996; HERAWATI, 2000; RASHED et al., 2005). Apesar disso, os metais estão presentes na natureza e sua liberação em excesso pode ocorrer em erupções vulcânicas, incêndios florestais, intemperismo de rochas, fontes biogênicas e partículas de solo transportadas pelo vento, no entanto, a principal fonte de liberação excessiva de metais está relacionada às atividades antropogênicas, a partir de indústrias em geral, agricultura, águas residuais, mineração e processos metalúrgicos (MASINDI et al., 2018). Diante disso, é de extrema importância o biomonitoramento de metais pesados para manutenção da qualidade ambiental e da conservação dos seres vivos.

A presença de metais pesados pode ser avaliada pelo solo, água e ar ou por bioindicadores (SLAVKA et al., 2013; SHAWAI, 2017; NOOR et al., 2018). Bioindicadores são organismos ou comunidades de organismos usados para avaliar a qualidade do ambiente. Comparada a outras técnicas, a utilização de bioindicadores para monitoramento ambiental é vantajosa, já que é possível avaliar impactos cumulativos (impactos ao longo do tempo), as análises não são tendenciosas e os organismos podem indicar uma faixa de segurança do poluente e interação entre contaminantes (HOLT et al., 2010). Espécies bioindicadoras incluem pássaros, animais, plantas, insetos, microrganismos, entre outros (BAIG, 2018). A seleção de bioindicadores apropriados é de extrema importância para programas de biomonitoramento e está baseada na faixa de tolerância ou sensibilidade de organismos à variabilidade ambiental (GARCÍA et al., 2019). Diante disso, o presente artigo de revisão tem o objetivo de compilar estudos de grupos de organismos e seus resultados utilizados na avaliação de metais pesados.

METODOLOGIA

Com o objetivo de compilar artigos que tratam do biomonitoramento de metais pesados, foi realizado uma pesquisa sistemática usando os termos “environmental biomonitoring heavy metals”, “plants heavy metals”, “mammals heavy metals”, “microorganisms heavy metals”, “birds heavy metals”, “fishes heavy metals”, “insects heavy metals” e a combinação desses termos nos bancos de dados BIOSYS, ELSEVIER, PUBMED e ResearchGate. Os estudos relevantes a partir de 2001 até 2021 foram selecionados para essa revisão.

DISCUSSÃO TEÓRICA

Plantas

As plantas se mostram como uma abordagem eficiente e alternativa no biomonitoramento da poluição ambiental por metais pesados seja no solo, ar ou em ambientes aquáticos. Alguns parâmetros físico-químicos auxiliam as plantas para que sejam consideradas bioindicadores eficazes, entre eles,

temperatura, pH, composição microbiológica, umidade, entre outros. Além disso, com a descoberta de novas espécies vegetais, há uma maior possibilidade de encontrar outros espécimes para servirem como bioindicadores para diferentes metais pesados, e serem utilizados regularmente no monitoramento da poluição ambiental (MALIZIA, 2012).

Plantas expostas a metais pesados podem apresentar diferenças morfológicas comparadas a amostras não expostas. Um exemplo disso foi à exposição de *Shorea robusta* ao arsênio (As), Cd e Pb, que resultou na redução do comprimento radicular e caulinar e no aumento de ácido ascórbico e polifenol quando em concentrações mais elevadas. A parte aérea apresentou uma maior quantidade de As do que de Cd e Pb, além disso, Cd e As foram mais eficazes do que Pb em impossibilitar o crescimento e desenvolvimento da planta (PANT et al., 2014).

Em plantas herbáceas e leguminosas Malizia et al. (2012) também observaram a possibilidade de sua utilização como bioindicadoras de poluição no solo por metais pesados. Em solos urbanos da cidade de Slupsk na Polônia, experimentos realizados com *Pinus sylvestris* L. demonstraram a contaminação do solo com Manganês (Mn), Zn e Pb, com o Mn tendo a maior concentração nas camadas superficiais do solo, enquanto o Pb mostrou a menor. Ademais, as maiores concentrações de metais pesados foram localizadas na parte central da cidade, enquanto as menores foram encontradas em regiões periféricas (PARZYCH et al., 2014). O fluxo intenso nas estradas também é responsável pela grande quantidade de emissões de poluentes de metais pesados, Galal et al. (2015) constataram que *Plantago major*, presente nos acostamentos das estradas, possuía concentrações de alumínio (Al) e Fe em quantidade maior que 1000 mg/kg⁻¹, e por esse motivo é considerado um hiperacumulador para esses metais e, conseqüentemente, um bom biomarcador. Plantas silvestres cultivadas na Jordânia, foram reconhecidas como bioindicadoras para metais pesados por genotoxicidade, já que foi apontada uma considerável correlação entre o índice de danos ao DNA, taxa de peroxidação lipídica, frequência de danos ao DNA, biomarcadores de Cu, Cd e Pb do solo, demonstrando que a poluição por metais pesados é a causa dominante da genotoxicidade nessas espécies de vegetais (KHATEEB, 2018).

Os metais pesados também estão presentes na poluição atmosférica e as plantas podem ser de grande serventia no biomonitoramento. Norouzi (2015) averiguou as concentrações de metais pesados presentes na poeira atmosférica absorvida por folhas de *Platanus orientalis* L. para parâmetros magnéticos, já que essa correlação oferece uma abordagem para avaliação do nível de poluição por metais pesados. Seus resultados revelaram que a atividade industrial e o tráfego são fontes significativas de emissão de Zn e Cu. Outra espécie utilizada para biomonitorar à poluição do ar é a *Ficus religiosa*, mais especificamente suas folhas em ambientes urbanos, apresentaram altas concentrações de Pb, oriundos, principalmente, de automóveis. Medidas que possam prevenir a liberação de Pb na atmosfera são essenciais, visto que a utilização de automóveis não para de crescer. Uma alternativa é a LRP denominada de gasolina de reposição de Pb, que não contém Pb em sua composição (AGRAHARI et al., 2018). É possível notar que há uma diferença no grau de poluentes atmosféricos entre áreas residenciais e industriais, sendo essa última a que mais apresenta poluentes e efeitos nas plantas. Nas amostras de *B. glabra* de zonas industriais foi

observado uma quantidade maior de compostos fenólicos e flavonoides presentes nas folhas, o que pode ser explicado em resposta ao estresse da planta à exposição aos poluentes do ar (AZZAZY, 2020). Aricak (2020) explica que, a escolha de plantas para centros urbanos deveria ser pensada por sua função, geralmente são as características exteriores que possuem preferência. O pinheiro escocês (*Pinus sylvestris*) é apropriado para utilização em plantações urbanas por apresentar resistência a condições climáticas adversas e ser um vegetal perene. Além disso, é válido destacar que através dessa espécie é possível realizar o biomonitoramento de metais pesados no solo, bem como da poluição de Cr no ar, já que esse tipo de poluição atualmente, é um dos problemas mais relevantes das cidades.

Ervas marinhas também podem ser utilizadas no biomonitoramento, e no caso delas, no ecossistema aquático. As macrófitas possuem capacidade de absorver de forma rápida os metais pesados presentes no ambiente, o que as torna muito eficientes e de grande destaque na qualidade das águas oceânicas. Exemplo disso é o gênero *Ceratophyllum* que apresenta maiores concentrações de metais pesados comparado a outros gêneros, além disso, pela característica de hiperacumular o Cd, é muito eficaz no processo de fitorremediação (MATACHE et al., 2013). Espécimes do estuário de Derwent também foram testadas para a acumulação de metais pesados, e em todas as amostras avaliadas os metais As, Cu, Zn e Pb foram identificados. O vegetal marinho *Ruppia megacarpa* apresentou níveis mais altos de Zn, assim como *Ulva australis* e a erva marinha *Zostera muelleri*, que exibiu grau elevado de Pb (FARIAS et al., 2018). Hu et al. (2019), consideraram que algumas outras plantas do gênero *Zostera* também podem acumular concentrações semelhantes de metais pesados, como, por exemplo, *Zostera caespitosa*, *Zostera japonica* e *Zostera marina*, sendo esta última a melhor bioindicadora de metais pesados em sedimentos. Corroborando com Bonanno (2017), que afirma que espécies de plantas ecológica e morfológicamente distintas compartilham padrões comuns como altas concentrações de metais pesados e capacidade de bioindicação de oligoelementos em sedimentos. Na cidade de Río Tercero na Argentina, Harguinteguy (2016) investigou a quantidade de metais pesados no rio Ctalamochita e constatou a presença de Cu e Pb nas águas superficiais e Cu e Zn nos sedimentos do rio através das macrófitas submersas nativas *M. aquaticum* e *P. pusillus* que possuem uma alta capacidade de acumular metais pesados em seus tecidos, permitindo assim sua utilização em estudos de biomonitoramento.

Mamíferos

Utilizando tecido dentário de *Myodes glareolus* para identificar a exposição a metais pesados, entre 1998-2000 em florestas poluídas (áreas industriais) e não poluídas (montanha) no sul da Polônia Argasińska et al. (2004), verificou-se uma diminuição da presença de Pb e Cd, indicando uma melhoria das condições ambientais. Poprawa et al. (2003) identificaram altos níveis de Pb e Cd nos rins e ossos de roedores em regiões contaminadas. Observou-se danos no fígado e nos testículos, além de fibrose intersticial, aumento do número de núcleos picnóticos e necrose nos hepatócitos, entre outros danos (POPRAWA et al., 2004).

Utilizando fígado de *Cervus elaphus* residentes em local de mineração que sofreu contaminação por Selênio (Se), Pb, Zn, Cd, Cu e As no solo, água e sedimento, que posteriormente foram transferidos às

espécies de plantas e animais, foi verificado maiores concentrações de Pb, Cd, As e Se nas áreas de mineração em relação a áreas não contaminadas (REGLERO et al., 2008). Além do próprio animal, fezes podem ser utilizadas para o monitoramento ambiental. Gupta (2013) coletou as fezes de dezesseis mamíferos e quantificou os metais Pb, Cd, Cr, Cu e Zn. Kar et al. (2015) quantificaram cobalto (Co), Pb, Cd e Cu além de alterações teciduais em fígado, rim, pulmão, baço e músculo; e leite e fezes de em cabras (*Capra hircus*) próximas a área industrial. Foram encontradas altas concentrações de Pb, Cd e outros metais no fígado e rins de gado em locais de mineração (YABE et al., 2011). Cd excedeu a medida para o consumo humano e Ni e Cr possivelmente representam problema para o consumo da carne.

Humanos também estão expostos ao meio ambiente e servem de bioindicadores. Yang et al. (2021) analisaram amostras de cabelo em uma área de mineração na China, entre 2015 e 2019, foi verificado o acúmulo significativo de Hg, Pb e Cd em humanos do sexo masculino e feminino. Foram verificados a presença de oligoelementos, incluindo, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Zn, em crianças com residência próxima a um depósito de lixo tóxico na Rússia por Drobyshv et al. (2017), observando-se um aumento da presença dos oligoelementos, no entanto o autor afirma ser necessário outros tipos de monitoramento para uma resposta conclusiva. Ivanenko et al. (2013), verificaram a concentração de vários elementos traços no sangue e na urina de trabalhadores de uma empresa de processamento de berílio. Foram detectadas concentrações que excedem o nível aceitável. Mamíferos de pequeno, médio e grande porte, incluindo humanos, podem servir como bioindicadores ambientais, uma vez que eles estão expostos ao ambiente como qualquer outro organismo, no entanto é preciso correlacionar o material a ser analisado com o que deve ser identificado.

Microrganismos

Em termos de ecossistema, os microrganismos desempenham papéis essenciais, como regulação do ciclo do nitrogênio (CROUZET et al., 2016), ciclo do carbono, ciclagem de nutrientes e muitos outros processos, chamados ciclos biogeoquímicos (FIERER, 2017). Desse modo, a contaminação por metais pesados representa uma ameaça aos microrganismos e às funções ecológicas desempenhadas por eles (LIN et al., 2019). No entanto, esse efeito pode ser aproveitado para fins de monitoramento ambiental, já que muitos táxons microbianos são altamente sensíveis às mudanças ambientais (GARCÍA et al., 2019). Além disso, os diferentes tempos de geração dos táxons microbianos em resposta às perturbações podem ser usados para identificar efeitos de estresse de curto e longo prazo (ANCION et al., 2010). Somadas, essas características colocam os microrganismos como bioindicadores eficientes para avaliação e monitoramento dos habitats nos quais ocorrem (GARCÍA et al., 2019).

Metais pesados podem ser monitorados no ambiente através de bioindicadores microbianos. Em um manguezal, próximo a uma área industrial as espécies *Ralstonia pickettii* e *Cupriavidus gilardii*, foram identificadas como bioindicadores devido à resistência à Cu, Zn, Fe e Ni (ACOSTA et al., 2015). Genes que codificam para mecanismos de resistência a metais também podem ser usados como indicadores de contaminação (ROOSA et al., 2014). Além da resistência, fatores como mudanças na diversidade de

microbiomas podem indicar contaminação por metais pesados. Na microbiota de sedimentos do rio Hanjiang (China), por exemplo, mudanças na diversidade absoluta e funcional, incluindo funções metabólicas e funções relacionadas ao ciclo do carbono e do nitrogênio, estiveram fortemente associadas à identificação de metais pesados nas amostras, incluindo Cr, Pb Zn e Mn (LI et al., 2020).

Aumentos na abundância de grupos específicos de bactérias em uma comunidade também podem indicar poluição por metais pesados. É o caso de Betaproteobacterias que aumentaram em abundância na comunidade microbiana de sedimentos do lago Quesnel, impactado por vazamento de rejeitos de mina de Cu (HATAM et al., 2019).

Outros exemplos de bioindicadores microbianos são bactérias organizadas em biofilmes. Biofilmes são considerados excelentes bioindicadores para avaliação da qualidade ambiental devido à sua capacidade de integrar a contaminação (CHAUMET et al., 2019). A formação de biofilme envolve a secreção de uma matriz composta de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) responsáveis pela adesão e organização estrutural de bactérias planctônicas em uma superfície (MAUNDERS, 2017; WELCH, 2017). Bactérias em biofilmes também podem atuar como bioindicadores da poluição ambiental causada por metais pesados (GANDELMAN et al., 2014). Em comunidades bentônicas de biofilmes, relações significativas entre os níveis de metais intracelulares e as concentrações de metais livres, foram encontradas, sugerindo que a avaliação de biofilmes é um indicador robusto de exposição à metais pesados (LAVOIE et al., 2012). Em outro estudo, a diminuição da diversidade de comunidades de biofilmes expostas à efluentes industriais contaminados com Zn e Cd, esteve fortemente associada com a exposição aos metais pesados (ARINI et al., 2012). Biofilmes também podem adsorver metais pesados na matriz de EPS, dependendo da concentração e da disponibilidade no ambiente (MAGES et al., 2004). Além disso, mudanças nas atividades enzimáticas das comunidades de biofilmes podem indicar contaminação por metais pesados. Alterações na atividade da enzima glutationa-S-transferase (GST) em comunidade foram relacionadas à poluição por metais, principalmente o Zn (BONET et al., 2014).

Embora tenham sido reconhecidos por sua importância nos processos ambientais e apresentarem diferentes tipos de respostas à contaminação por metais pesados, os microrganismos raramente são usados como bioindicadores em avaliações de rotina (SAGOVA et al., 2021). Assim, incorporar dados microbianos a outros dados de bioindicadores isolados pode aumentar a sensibilidade do método na detecção de uma gama mais ampla de possíveis estresses ambientais, como os metais pesados (GARCÍA et al., 2019).

Aves

As aves têm sido cada vez mais associadas como boas bioindicadoras do ecossistema. Alguns de seus benefícios são: as espécies são diurnas e indicam sua presença através do som, além disso, são fáceis de serem identificadas no ambiente e, por estarem perto do topo da cadeia alimentar, são sensíveis às mudanças na alimentação e concentração de contaminantes por metais pesados (NALLY et al., 2004).

A análise de metais pesados oriundos de penas de aves é a mais utilizada em trabalhos da área de

biomonitoramento, visto que é um método confiável e não-invasivo; além de ser uma estrutura representativa do corpo da ave onde ocorre a deposição de metais por via endógena, transformando as penas em bioindicadores muito úteis na mensuração da poluição por metais pesados (MARKOWSKI et al., 2013). O trabalho de Grúz et al. (2017) corrobora a possibilidade do biomonitoramento da contaminação terrestre por metais pesados em penas de aves. Além disso, os mesmos autores observaram uma maior concentração de Cu e Zn em pássaros selvagens provenientes da parte oriental da Hungria. Já na Nigéria, as penas de vários pássaros foram analisadas, entre eles, a garça-boieira, patos, corvos, galinhas, perus selvagens, pardais, entre outros, e constataram que elas continham vários níveis de metais pesados, tendo por maior concentração o Pb seguido por Cd, Cr e Mn. As espécies que apresentaram maiores concentrações de metais foram o pato-real, galinha, pato, galo, garça-boieira e galinha d'angola, sendo a área industrial o local que mais reflete essas concentrações (SANI et al., 2020). Manjula et al. (2015) também investigaram a quantidade de metais pesados em ambientes urbanos e industriais com o auxílio de penas de onze espécies diferentes de aves. As penas coletadas exibiram maiores concentrações de Cr, Fe, Cu e Zn, além disso não houve diferenças significativas nas concentrações de metais entre as áreas urbanas e industriais, com exceção do Zn. Ademais, análises revelaram fontes antropogênicas potenciais de contaminação, como indústrias de fabricação de metais e tráfego de veículos.

Estudos realizados com excrementos de aves indicaram que o tipo de alimento ingerido desempenha um papel predominante nas quantias de metais pesados biocumulados, sendo eles: As, Cd, Pb, Cr, Cu, Ni, Zn e Mn. A exposição das aves a metais pesados pode ser muito prejudicial, já que pode causar vários efeitos adversos graves, como, por exemplo, maior susceptibilidade a doenças, diminuição da função reprodutiva, mudanças nos padrões de comportamento ou até a morte (KAUR et al., 2013). Kler et al. (2014) também obtiveram resultados a partir de fezes de cinco espécies diferentes de aves selvagens que continham metais pesados, com variações no nível de cada metal dependendo da espécie, o que os levou a interpretação de que há flutuações nos níveis de contaminação do ambiente onde essas aves habitam, e de que os excrementos das aves são bioindicadores adequados para a avaliação da poluição e qualidade ambiental.

Embora não sejam tão utilizados, devido à baixa sensibilidade do método ou por serem procedimentos invasivos, outros meios de estudo envolvendo aves como bioindicadores são utilizando os ovos e alguns de seus órgãos. Na província de Jiangsu, na China, a concentração média de Pb nas cascas de ovos coletadas foi 21 vezes mais alta comparado ao controle, indicando uma poluição considerável por metais pesados na área. Outros metais como Cd e Ni também foram encontrados nas cascas (FU et al., 2013). Já nas lagoas de tratamento da Universidade Khon Kaen na Tailândia, os locais de nidificação de uma ave marinha *Tachybaptus ruficollis*, conhecido como mergulhão pequeno, foram contaminados por metais pesados, sendo identificados nas cascas dos ovos os metais Cr, Cu, Pb e Hg. Supõe-se que a contaminação possa ser proveniente de atividades humanas (THONGCHAROEN et al., 2017). Dzugan et al. (2012) constatou que o faisão *Phasianus colchicus* L. é uma ave que pode ser utilizada como bioindicadora de metais pesados no ambiente, e a avaliação é feita por um exame nos órgãos-alvo rim e fígado, calculando o

teor de metais tóxicos e essenciais nos tecidos.

Peixes

Com o crescimento da população e a necessidade de se produzir mais, a industrialização cresce a cada dia, o que aumenta a contaminação do ecossistema por metais pesados, originando problemas ecológicos em organismos importantes e afetando fases iniciais de desenvolvimento da vida de animais como os peixes. Há uma grande importância em se conhecer o risco de contaminação por metais pesados e as consequências para a biodiversidade, realizar o controle de danos e a sua prevenção é de suma importância, para o equilíbrio do ecossistema (MEHANA et al., 2020; SAVASSI et al., 2020.).

Estudos demonstram que peixes são animais considerados bioindicadores de contaminação ambiental. Pesquisas realizadas indicaram a presença de metais pesados após análise de brânquias, musculatura e peixes inteiros. O Hg foi constatado com maior intensidade na musculatura e brânquias de peixes, e quinze substâncias perfluoroalquílicas (PFASs) foram detectadas ao analisar o peixe como um todo, portanto algumas substâncias não são reveladas quando analisados somente a musculatura, daí a importância da análise do peixe como um todo. A presença de metais pesados em peixes, indica uma contaminação antrópica por metais pesados, no local de captura dos espécimes (NGESA et al., 2020; CERVENY et al., 2016).

A determinação a presença de Fe, Zn, Cr, Cu e Al na realização de testes toxicogenéticos em superfície e fundo de amostras de água do rio Poti (Piauí / Brasil), a realização de análise toxicogenética detectou efeitos mutagênicos e genotóxicos com diferentes tempos de exposição e camadas (superfície e fundo). Alterações significativas foram observadas especialmente em defeitos do fuso mitótico, formações MN, brotos nucleares e quebras de fita de DNA. Observou-se uma relação significativa entre Al e mutagenicidade, bem como entre Fe e citotoxicidade (MATOS et al., 2017).

A detecção de metais pesados em peixes, corrobora a contaminação de rios e mananciais, uma vez que há uma bioaculação desses metais em peixes, considerando assim esses espécimes como bioindicadores de contaminação ambiental (AZEVEDO et al., 2012; FRANKLIN et al., 2012; GYIMAH et al., 2018).

Insetos

Insetos possuem um papel essencial no ecossistema e têm sido frequentemente utilizados como bioindicadores de contaminação por metais pesados (FRIZZI et al., 2017). O sucesso da utilização como bioindicadores se deve a fatores como seus hábitos alimentares (STEEN et al., 2016) desnudação e construção de ninhos no solo (OKRUTNIAK et al., 2021). Além disso, metais presentes na atmosfera podem se acumular na superfície corporal de alguns insetos (PERUGINI et al., 2011). Quando em altas concentrações, estes poluentes podem ocasionar distúrbios fisiológicos, como problemas de desenvolvimento e redução de tamanho (SKALDINA et al., 2018); problemas de reprodução e diminuição da imunidade (SORVARI et al., 2007), podendo ainda, em alguns casos, afetar o padrão de cores e manchas corporais (SKALDINA et al., 2020).

Abelhas, vespas e formigas constituem a ordem Hymenoptera, e são consideradas bons indicadores de poluição do ambiente devido à suas colônias perenes e sua alta adaptação a metais pesados. Portanto, estes insetos não vão a óbito, apenas acumulam metais em seus corpos (PERUGINI et al., 2011). Além destes animais, os seus produtos também podem ser utilizados como bioindicadores (GUTIÉRREZ et al., 2020).

A concentração dos metais pesados Pb, Cr, Ni e Cd foi determinada em abelhas forrageiras *Apis mellifera* por Gutiérrez et al. (2015). Os resultados apresentaram concentrações frequentes e preocupantes de Pb, Cr e Cd, sugerindo que as abelhas podem ser utilizadas como bioindicadores capazes de complementar dados fornecidos por outros métodos, químicos ou físicos. Um método analítico foi desenvolvido para detectar Hg em amostras de massas de abelhas e produtos de colmeia por espectrometria de fluorescência com vapor frio (ASTOLFI et al., 2021). Além destes, outros metais já foram detectados em apiários, em concentrações variáveis, dependendo da região onde as abelhas habitam, são eles o Al, As, Ni, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Lítio, Se, Zn, Bário (Ba), Estrôncio (Sr), Vanádio (V), Molibdênio, Antimônio, Estanho, e Titânio (STEEN et al., 2016). Altas concentrações de Hg e Cr foram encontradas por Perugini et al., (2011) em abelhas *Apis mellifera* presentes em áreas altamente industrializadas. Desta maneira é possível concluir que as abelhas constituem uma maneira eficiente e de baixo custo para monitorar a poluição por metais pesados.

As formigas são outros representantes da ordem Hymenoptera utilizados como bioindicadores de metais pesados. Okrutniak et al. (2021) buscaram entender se as concentrações de metais encontrados no corpo das formigas poderiam refletir de fato a contaminação do ambiente de forma confiável. Para isso, foram acumulados metais em formigas *Lasius niger* de duas áreas distintas, a fim de avaliar a variação da concentração de Zn e Cd. O resultado mostrou uma variação da concentração destes metais entre colônias dentro de uma única área de estudo. Com base nisso, os autores indicam que sejam utilizadas diversas colônias diferentes em protocolos de bioindicação, para que se obtenha um resultado com a maior precisão possível. Outra espécie de formiga, a *Crematogaster scutellaris*, foi utilizada para investigar se a exposição crônica aos metais pesados Ni, Co e Cr, em solos, afetaria os padrões de acúmulo, a tolerância aos poluentes metálicos e a diversidade genética destas formigas. Ao comparar as concentrações de metais encontrados no solo com as concentrações de metais encontrados nos corpos das formigas, observou-se uma alta semelhança entre eles. Indicando que as formigas podem ser consideradas bioindicadores confiáveis da poluição por metais pesados no solo (FRIZZI et al., 2017). Kavehei et al. (2021) encontraram altas concentrações de Mn, Cu e Zn em formigas que viviam em um solo de mineração, além disso os autores descrevem a capacidade destas formigas em acumular metais em diferentes partes do corpo, como na mandíbula, abdômen e outros órgãos. Além das formigas, os materiais coletados dos seus ninhos também foram considerados bons bioindicadores de metais pesados em áreas industriais, entre eles o Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Ba, Sr, V e Zn (SKALDINA et al., 2018).

A vespa comum *Vespula vulgaris* também foi considerada um potencial bioindicador e biomonitor de metais na indústria. Foram detectados em seus corpos concentrações de As, Co, Cu, Ni, Pb e Mg. Além

disso, vespas contaminadas apresentaram manchas faciais de cores e tamanhos variadas. Estas manchas podem ser consideradas biomarcadores morfológicos de exposição aos metais (SKALDINA et al., 2020).

Os Chironomídeos são insetos pertencentes à ordem Diptera que foram apontados como bioindicadores de metais pesados pelo fato de apresentarem deformidades morfológicas quando em contato com estes poluentes (ARIMORO et al., 2015), como por exemplo deformidade na estrutura bucal, um parâmetro a ser usado rotineiramente em avaliações biológicas (ARIMORO et al., 2018). Além de alterações morfológicas, metais presentes em altas concentrações em sedimentos de rios poluídos do Reino Unido e da Bulgária levaram a um alto nível de danos cromossômicos em *Chironomus piger*. Isso indica que o genoma de *C. piger* é um indicador em potencial de contaminação dos sedimentos, sendo adequado para o monitoramento das águas (MICHAILOVA et al., 2015).

Representantes da ordem Hemiptera, os pulgões *Aphis gossypii* são consideradas pragas agrícolas (SINGH et al., 2014) e causam graves danos econômicos nas lavouras. Estes animais se alimentam de plantas as quais são consideradas a rota mais crítica para a transferência de metais do solo, por esse motivo Alajmi et al. (2021) avaliaram as concentrações dos metais pesados, Cd, Pb, Zn e Cu, em pulgões, em solos e em folhas de tomateiros, a fim de avaliar se os pulgões poderiam ser utilizados como bioindicadores de metais pesados. Embora os resultados apontem que as folhas de tomateiro foram melhores bioindicadores, os autores mostram que é possível utilizar também os pulgões como bioindicadores da presença de Cd, Pb, Zn e Cu. A contaminação por Cu e Pb também ocasionou problemas reprodutivos e de desenvolvimento em pulgões da espécie *Brevicoryne brassicae* L. Além disso, a mortalidade destes insetos aumentou cerca de 20% (GÖRÜR, 2007).

Insetos de outras ordens também apresentam capacidade de bioindicação para metais pesados como Cd, Cr, Cu, Ni e Zn, são eles a libélula *Crocothemis servilia* da ordem Odonata, o gafanhoto *Oxya hyla hyla* da ordem Orthoptera e a borboleta *Danus chrysippus* da ordem Lepidoptera (ADAM et al., 2015). O trabalho de Nasirian et al. (2017) também indicou o potencial de várias espécies de odonatas como bioindicadoras de metais pesados na água. Os efeitos do Cd foram avaliados em outra espécie de Lepidoptera, a *Helicoverpa armigera*. Os resultados mostraram que este metal pesado diminuiu significativamente a sobrevivência das larvas, a formação das pupas e a emergência; reduziu o tamanho em todas as fases do desenvolvimento e prejudicou a reprodução. Além disso, o Cd também inibiu as atividades enzimáticas da GST, carboxilesterase (CarE) e citocromo P450 monooxigenases (P450s) (ZHAN et al., 2017), que desempenham papéis importantes na desintoxicação de compostos endógenos e exógenos (ZHANG et al., 2014).

O coleóptero *Blaps polycresta* foi estudado por Osman et al. (2011) frente a poluição do solo por pesticidas e poluentes ambientais. Os besouros apresentaram alterações ecológicas, morfológicas e histológicas. Os resultados apresentaram alta concentração de Cd no solo e seu acúmulo nas gônadas e no canal alimentar dos insetos. O Cd também reduziu o tamanho da população e o peso delas e aumentou a taxa de mortalidade. Outras alterações foram observadas nas gônadas, testículos, ovários e intestino dos coleópteros. Com estes resultados os autores indicam a boa capacidade dos coleópteros em atuar como

bioindicadores. Altos valores de As, Cd, Cr, Pb, Ni e Hg também foram detectados em corpos dos coleópteros *Parallelomorphus laevigatus*, demonstrando sua eficiência como bioindicadores (CONTI et al., 2017).

Os insetos constituem uma ampla gama de bioindicadores de poluição por metais pesados, seja no solo, na água ou na atmosfera. A escolha do melhor inseto bioindicador deve estar pautado em características fisiológicas e morfológicas dos insetos, bem como em características do meio ambiente a ser monitorado. A utilização de insetos biomarcadores é uma opção rápida e de baixo custo para o controle da poluição, o que não necessariamente dispensa o emprego de outros métodos de detecção de poluição, como os métodos químicos e físicos.

CONCLUSÕES

Diversos métodos eficientes de monitoramento de ecossistemas por espécies bioindicadoras são discutidos atualmente. No entanto, dada a dinâmica ambiental, se faz necessária a utilização de uma abordagem integrada e multidisciplinar, como o monitoramento de diferentes grupos de organismos no mesmo ambiente, já que as respostas apresentadas por estes, darão um panorama mais amplo sobre o nível de contaminação ambiental. Desse modo, será possível identificar problemas com contaminantes, como os metais pesados, de maneira mais eficaz e rápida, para evitar maiores danos a esses ecossistemas.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, S. K.. Heavy metal pollution. **APH publishing**, v.4, 2009.

AGRAHARI, P.; RICHA, R.; SWATI, K.; RAI, S.; SINGH, V. K.; SINGH, D. K.. *Ficus religiosa* Tree leaves as bioindicators of heavy metals in Gorakhpur City, Uttar Pradesh, India. **Pharmacog J**, v.10, n.3, p.416-420, 2018.

KHATEEB, W. A.. Plants genotoxicity as pollution bioindicator in Jordan using comet assay. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v.24, n.1, p.89, 2018.

ALAJMI, R.; SHAMMARI, M.; GABER, R. A.; METWALLY, D.; KHADRAGY, M. F.; ALRAJEH, A.. Effectiveness of naturally occurring *Aphis gossypii* on tomato plants as a bioindicator for heavy metals in Riyadh and Hafar Al-Batin, Saudi Arabia. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v.28, n.7, p.4096-4101, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.027>

AMIN, S. N. S. M.; AZID, A.; SANI, M. S. A.; YUSOF, K. M. K. K.; SAMSUDIN, M. S.; RANI, N. L. A.; KHALIT, S. I.. Heavy metals in the air: Analysis using Instrument, air pollution and human health-a review. **Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences**, v.14, n.4, p.490-494, 2018.

ANCION, P. Y.; LEAR, G.; LEWIS, G. D.. Three common metal contaminants of urban runoff (Zn, Cu & Pb) accumulate in freshwater biofilm and modify embedded bacterial communities. **Environmental Pollution**, v.158, n.8, p.2738-2745, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.04.013>

ARICAK, B.; CETIN, M.; ERDEM, R.; SEVIK, H.; COMETEN, H..

The Usability of Scotch Pine (*Pinus sylvestris*) as a Biomonitor for Traffic-Originated Heavy Metal Concentrations in Turkey. **Pol. J. Environ**, v.29, n.2, p.1051-1057, 2020.

ARIMORO, F. O.; AUTA, Y. I.; ODUME, O. N.; KEKE, U. N.; MOHAMMED, A. Z.. Mouthpart deformities in Chironomidae (Diptera) as bioindicators of heavy metals pollution in Shiroro lake, Niger State, Nigeria. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.149, p.96-100, 2018.

ARIMORO, F. O.; ODUME, N. O.; MEME, F. K.. Environmental drivers of head capsule deformities in *Chironomus* spp. (Diptera: Chironomidae) in a stream in north central Nigeria. **Zoology and Ecology**, v.25, n.1, p.70-76, 2015.

ARINI, A.; MAZEL, A. F.; BRACHET, R. M.; POKROVSKY, O. S.; COSTE, M.; DELMAS, F.. Recovery potential of periphytic biofilms translocated in artificial streams after industrial contamination (Cd and Zn). **Ecotoxicology**, v.21, n.5, p.1403-1414, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-012-0894-3>

ASTOLFI, M. L.; CONTI, M. E.; RISTORINI, M.; FREZZINI, M. A.; PAPI, M.; MASSIMI, L.; CANEPARI, S.. An analytical method for the biomonitoring of mercury in bees and beehive products by cold vapor atomic fluorescence spectrometry. **Molecules**, v.26, n.16, p.4878, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26164878>

GARCÍA, C. A.; HERMANS, S. M.; STEVENSON, B.; BUCKLEY, H. L.; LEAR, G.. Microbial assemblages and bioindicators as proxies for ecosystem health status: potential and limitations. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v.

103, n.16, p.6407-6421, 2019. DOI:

<https://doi.org/10.1007/s00253-019-09963-0>

AZAM, I.; AFSHEEN, S.; ZIA, A.; JAVED, M.; SAEED, R.; SARWAR, M. K.; MUNIR, B.. Evaluating insects as bioindicators of heavy metal contamination and accumulation near industrial area of Gujrat, Pakistan. **BioMed Research International**, p.1-11, 2015. DOI:

<https://doi.org/10.1155/2015/942751>

AZEVEDO, J. S.; HORTELLANI, M. A.; SARKIS, J. E. S.. Accumulation and distribution of metals in the tissues of two catfish species from Cananéia and Santos-São Vicente estuaries. **Braz J Oceanogr**, v.60, p.463-472, 2012.

AZZAZY, M. F.. Plant bioindicators of pollution in Sadai City, Western Nile Delta, Egypt. **PLoS One**, v.15, n.3, p.1-17, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226315>

BAIG, A.. Review Article: using animals as biological indicators for heavy metal pollution. **SSRN Electronic Journal**, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3300095>

BONANNO, G.; BORG, J. A.; MARTINO, V. D.. Levels of heavy metals in wetland and marine vascular plants and their biomonitoring potential: a comparative assessment. **Science of The Total Environment**, v.576, n.6, p.796-806, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.171>

BONET, B.; CORCOLL, N.; TLILI, A.; MORIN, S.; GUASCH, H.. Antioxidant enzyme activities in biofilms as biomarker of Zn pollution in a natural system: an active bio-monitoring study. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.103, n.1, p.82-90, 2014.

CERVENY, D.; TUREK, J.; GRABIC, R.; GOLOVKO, O.; KOPA, O.; FEDOROVA, G.; GRABICOVA, K.; ZLÁBEK, V.; RANDAK, T.. Young-of-the-year fish as a prospective bioindicator for aquatic environmental contamination monitoring. **Water Research**, v.103, p.334-342, 2016.

CHAUMET, B.; MORIN, S.; BOUTRY, S.; MAZZELLA, N.. Diuron sorption isotherms in freshwater biofilms. **Science of The Total Environment**, v.651, n.1, p.1219-1225, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.286>

CONTI, E.; DATTOLO, S.; COSTA, G.; PUGLISI, C.. The ground beetle *Parallelomorphus laevigatus* is a potential indicator of trace metal contamination on the Eastern Coast of Sicily. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.135, p.183-190, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.09.029>

CROUZET, O.; POLY, F.; BONNEMOY, F.; BRU, D.; BATHISSON, I.; BOHATIER, J.; PHILIPPOT, L.; MALLET, C.. Functional and structural responses of soil N-cycling microbial communities to the herbicide mesotrione: a dose-effect microcosm approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v.23, n.5, p.4207-4217, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4797-8>

CZECHOWSKI, P.; STEVENS, M. I.; MADDEN, C.; WEINSTEIN, P.. Steps towards a more efficient use of Chironomids as bioindicators for freshwater bioassessment: exploiting edna and other genetic tools. **Ecological Indicators**, v.110, p.105-868, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105868>

POPRAWA, M. D.; KAPUSTA, K. S.. Damage to the liver,

kidney, and testis with reference to burden of heavy metals in yellow-necked mice from areas around steelworks and zinc smelters in Poland. **Toxicology**, v.186, n.1-2, p.1-10, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(02\)00595-4](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(02)00595-4)

POPRAWA, M. D.; KAPUSTA, K. S.. Histopathological changes in the liver, kidneys, and testes of bank voles environmentally exposed to heavy metal emissions from the steelworks and zinc smelter in Poland. **Environmental Research**, v.96, n.1, p.72-8, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2004.02.003>

ACOSTA, M. R.; COLLAZO, J. J.; ROMÁN, M. M.; LLAMAS, K. M.; WASIL, J. C. M.. Bacteria as potential indicators of heavy metal contamination in a tropical mangrove and the implications on environmental and human health. **Journal of Tropical Life Science**, v.5, n.3, p.100, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.11594/jtlls.05.03.01>

DROBYSHEV, E. J.; SOLOVYEV, N. D.; IVANENKO, N. B.; KOMBAROVA, M. Y.; GANEEV, A. A.. Trace element biomonitoring in hair of school children from a polluted area by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v.39, p.14-20, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.07.004>

DZUGAN, M.; ZIELIŃSKA, S.; HĘCLIK, J.; PIENIAŻEK, M.; SZOSTEK, M.. Evaluation of heavy metals environmental contamination based on their concentrations in tissues of wild pheasant (*Phasianus colchicus* L.). **Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences**, v.2, n.1, p.238-245, 2012.

FARIAS, D. R.; HURD, C. L.; ERIKSEN, R. S.; MACLEOD, C. K.. Macrophytes as bioindicators of heavy metal pollution in estuarine and coastal environments. **Marine Pollution Bulletin**, v.128, p.175-184, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.023>

FIERER, N.. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. **Nature Reviews Microbiology**, v.15, n.10, p.579-590, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87>

FRANKLIN, R. L.; FERREIRA, F. J.; BEVILACQUA, J. E.; FÁVARO, D. I.. Assessment of metals and trace elements in sediments from Rio Grande reservoir, Brazil, by neutron activation analysis. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v.291, n.1, p.147-153, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-011-1239-z>

FRIZZI, F.; MASONI, A.; ÇELIKKOL, M.; PALCHETTI, E.; CIOFI, C.; CHELAZZI, G.; SANTINI, G.. Serpentine soils affect heavy metal tolerance but not genetic diversity in a common Mediterranean Ant. **Chemosphere**, v.180, p.326-334, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.026>

FU, J.; WANG, Q.; WANG, H.; YU, H.; ZHANG, X.. Monitoring of non-destructive sampling strategies to assess the exposure of avian species in Jiangsu Province, China to heavy metals. **Environmental Science and Pollution Research**, v.21, n.4, p.2898-2906, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2242-4>

GALAL, T. M.; SHEHATA, H. S.. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. **Ecological Indicators**, v.48, p.244-251, 2015. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.013>

ARGASIŃSKA, J. G.; APPLETON, J.; KAPUSTA, K. S.; SPENCE, B.. Further investigation of the heavy metal content of the teeth of the bank vole as an exposure indicator of environmental pollution in Poland. **Environmental Pollution**, v.131, n.1, p.71-9, 2004. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.02.025>

GERLACH, J.; SAMWAYS, M.; PRYKE, J.. Terrestrial invertebrates as bioindicators: an overview of available taxonomic groups. **Journal of Insect Conservation**, v.17, n.4, p.831-850, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10841-013-9565-9>

GHANNEM, S.; KHAZRI, A.; SELAMI, B.; BOUMAIZA, M.. Assessment of heavy metal contamination in soil and *Chlaenius (Chlaeniellus) olivieri* (Coleoptera, Carabidae) in the vicinity of a textile factory near Ras Jbel (Bizerte, Tunisia). **Environmental Earth Sciences**, v.75, n.5, p.442, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5373-3>

GHANNEM, S.; TOUAYLIA, S.; BOUMAIZA, M.. Beetles (Insecta: Coleoptera) as bioindicators of the assessment of environmental pollution. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v.24, n.2, p.456-464, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1385387>

GÖRÜR, G.. Effects of host plant contaminated with heavy metals on the life history traits of aphids (*Brevicoryne brassicae* L.). **Polish Journal of Ecology**, v.55, n.1, p.113-120, 2007.

GRÚZ, A.; DÉRI, J.; SZEMERÉDY, G.; SZABÓ, K.; KORMOS, É.; BARTHA, A.; BUDAI, P.. Monitoring of heavy metal burden in wild birds at eastern/north-eastern part of Hungary. **Environmental Science and Pollution Research**, v.25, n.7, p.6378-6386, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1004-0>

GUPTA, V.. Mammalian Scat como bioindicador de contaminação por metais pesados no oeste de Rajasthan, Índia. **Jornal Internacional de Publicações Científicas e de Pesquisa**, v.2, n.12, p.1-7, 2012.

GUTIÉRREZ, M.; MOLERO, R.; GAJU, M.; STEEN, J. V. D.; PORRINI, J.; RUIZ, J. A.. Assessment of heavy metal pollution in Córdoba (Spain) by biomonitoring foraging honeybee. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.187, n.10, p.651, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4877-8>

GUTIÉRREZ, M.; MOLERO, R.; GAJU, M.; STEEN, J. V. D.; PORRINI, J.; RUIZ, J. A.. Assessing heavy metal pollution by biomonitoring honeybee nectar in Córdoba (Spain). **Environmental Science and Pollution Research**, v.27, n.10, p.10436-10448, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07485-w>

GYIMAH, E.; AKOTO, O.; MENSAH, J. K.; SAM, N. B.. Bioaccumulation factors and multivariate analysis of heavy metals of three edible fish species from the Barekese reservoir in Kumasi, Ghana. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.190, n.9, p.553, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6938-2>

HARGUINTEGUY, C. A.; NOELIA, M. C.; CIRELLI, A. F.; PIGNATA, M. L.. The macrophytes *Potamogeton pusillus* L. and *Myriophyllum aquaticum* (Vell.). **Microchemical Journal**,

v.124, p.228-234, 2016. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.08.014>

HATAM, I.; PETTICREW, E. L.; FRENCH, T. D.; OWENS, P. N.; LAVAL, B.; BALDWIN, S. A.. The bacterial community of Quesnel Lake sediments impacted by a catastrophic mine tailings spill differ in composition from those at undisturbed locations: two years post-spill. **Scientific Reports**, v.9, n.1, p.1-11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38909-9>

HE, Z. L.; YANG, X. E.; STOFFELLA, P. J.. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v.19, n.2-3, p.125-140, 2005. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.010>

HERAWATI, N.; SUZUKI, S.; HAYASHI, K.; RIVALI, I. F.; KOYOMA, H.. Cadmium, copper and zinc levels in rice and soil of Japan, Indonesia and China by soil type. **Bull Env Contam Toxicol**, n.64, p.33-39, 2000.

HOLT, E. A.; MILLER, S. W.. Bioindicators: using organisms to measure environmental impacts. **Nature Education Knowledge**, v.3, n.10, p.8, 2010.

HU, C.; YANG, X.; GAO, L.; ZHANG, P.; LI, W.; DONG, J.; ZHANG, X.. Comparative analysis of heavy metal accumulation and bioindication in three seagrasses: which species is more suitable as a bioindicator? **Science of the Total Environment**, v.669, p.41-48, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.425>

IVANENKO, N. B.; IVANENKO, A. A.; SOLOVYEV, N. D.; ZEIMAL, A. E.; NAVOLOTSKII, D. V.; DROBYSHEV, E. J.. Biomonitoring of 20 trace elements in blood and urine of occupationally exposed workers by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry. **Talanta**, v.116, n.764, p.9, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.07.079>

KAR, I.; MUKHOPADHAYAY, S. K.; PATRA, A. K.; PRADHAN, S.. Metal concentrations and histopathological changes in goats (*Capra hircus*) reared near an industrial area of West Bengal, India. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v.69, n.1, p.32-43, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-015-0130-2>

KAUR, N.; DHANJU, C. K.. Heavy metals concentration in excreta of free living wild birds as indicator of environmental contamination. **The Bioscan**, v.8, n.3, p.1089-1093, 2013.

KAVEHEI, A.; GORE, D. B.; WILSON, S. P.; HOSSEINI, M.; HOSE, G. C.. Assessment of legacy mine metal contamination using ants as indicators of contamination. **Environmental Pollution**, v.274, p.116537, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116537>

KLER, T. K.; VASHISHAT, N.; KUMAR, M.. Heavy metal contamination in excreta of avian species from Ludhiana district of Punjab. **International Journal of Advanced Research**, v.2, n.7, p.873-879, 2014.

LAVOIE, I.; LAVOIE, M.; FORTIN, C.. A mine of information: Benthic algal communities as biomonitors of metal contamination from abandoned tailings. **Science of the Total Environment**, v.425, p.231-241, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.02.057>

LI, C.; QUAN, Q.; GAN, Y.; DONG, J.; FANG, J.; WANG, L.; LIU, J.. Effects of heavy metals on microbial communities in sediments and establishment of bioindicators based on microbial taxa and function for environmental monitoring and management. **Science of the Total Environment**, v.749, p.141555, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141555>

LIN, Y.; YE, Y.; HU, Y.; SHI, H.. The variation in microbial community structure under different heavy metal contamination levels in paddy soils. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.180, p.557-564, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.057>

NALLY, R. M.; ELLIS, M.; BARRETT, G.. Avian biodiversity monitoring in Australian rangelands. **Austral Ecology**, v.29, n.1, p.93-99, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2004.01352.x>

MAGES, M.; ÓVÁRI, M.; TÜMPLING, W. V.; KRÖPFL, K.. Biofilms as bio-indicator for polluted waters? Total reflection X-ray fluorescence analysis of biofilms of the Tisza river (Hungary). **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v.378, n.4, p.1095-1101, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00216-003-2291-5>

MALIZIA, D.; GIULIANO, A.; ORTAGGI, G.; MASOTTI, A.. Common plants as alternative analytical tools to monitor heavy metals in soil. **Chemistry Central Journal**, v.6, n.2, p.1-10, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-S2-S6>

MANJULA, M.; MOHANRAJ, R.; DEVI, M. P.. Biomonitoring of heavy metals in feathers of eleven common bird species in urban and rural environments of Tiruchirappalli, India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.187, n.5, p.1-10, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4502-x>

MARKOWSKI, M.; KALIŃSKI, A.; SKWARSKA, J.; WAWRZYŃSKI, J.; BAŃBURA, I.; MARKOWSKI, J.; ZIELIŃSKI, P.; BAŃBURA, J.. Avian feathers as bioindicators of the exposure to heavy metal contamination of food. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v.91, p.302-305, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-013-1065-9>

MASINDI, V.; MUEDI, K.. **Environmental Contamination by Heavy Metals**. 2018.

MATACHE, M. L.; MARIN, C.; ROZYLOWICZ, L.; TUDORACHE, A.. Plants accumulating heavy metals in the Danube River wetlands. **Journal of Environmental Health Science and Engineering**, v.11, n.1, p.39, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1186/2052-336X-11-39>

MATOS, A. C. S.; SOUSA, A. A.; MARANHÃO, J. P. R.; SANTOS, N. R. S.; GONÇALVES, M. M. C.; DANTAS, S. M. M. M.; SOUSA, J. M. C. E.; PERON, A. P.; SILVA, F. C. C. D.; ALENCAR, M. V. O. B.; ISLAM, M. T.; CAVALCANTE, A. A. C.; BONECKER, C. C.. The influence of heavy metals on toxicogenetic damage in a Brazilian tropical river. **Chemosphere**, v.185, p.852-859, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.103>

MAUNDERS, E.; WELCH, M.. Matrix exopolysaccharides the sticky side of biofilm formation. **FEMS Microbiology Letters**, v.364, n.13, p.120, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsle/fnx120>

MEHANA, E. E.; KHAFAGA, A. F.; ELBLEHI, S. S.; HACK, M. E. A.; NAIEL, M. A. E.; JUMAH, M. B.; OTHMAN, S. I.; ALLAM, A.

A.. Biomonitoring of heavy metal pollution using Acanthocephalans parasite in ecosystem: an updated overview. **Animals**, v.10, n.5, p.811, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani10050811>

MICHAILOVA, P.; ILKOVA, J.; DEAN, A. P.; WHITE, K. N.. Cytogenetic index and functional genome alterations in *Chironomus piger* Strenzke (Diptera, Chironomidae) in the assessment of sediment pollution: a case study of Bulgarian and UK rivers. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.111, p.220-227, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.10.018>

NASIRIAN, H.; IRVINE, K. N.. *Odonata larvae* as a bioindicator of metal contamination in aquatic environments: application to ecologically important wetlands in Iran. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.189, n.9, p.436, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6145-6>

NGESA, E. A.; OTACHI, E. O.; KITAKA, N. K.. Levels of heavy metals in the straightfin barb *Enteromius paludinosus* (Peters 1852) from River Malewa, Naivasha, Kenya. **Environmental Monitoring Assessment**, v.191, n.5, p.292, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7457-5>

NOROUZI, S.; KHADEMI, H.. Source identification of heavy metals in atmospheric dust using *Platanus orientalis* L. leaves as bioindicator. **Eurasian J Soil Sci**, v.4, n.3, p.144-152, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17635-8>

OKRUTNIAK, M.; GRZEŚ, I. M.. Accumulation of metals in *Lasius niger*: implications for using ants as bioindicators. **Environmental Pollution**, v.268, p.115824, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115824>

OSMAN, W.; SAMAD, L. M. E.; MOKHAMER, E.; TOUHAMY, A.; SHONOUDA, M.. Ecological, morphological, and histological studies on *Blaps polycresta* (Coleoptera: Tenebrionidae) as biomonitor of cadmium soil pollution. **Environmental Science and Pollution Research**, v.22, n.18, p.14104-14115, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4606-4>

PANT, P. P.; TRIPATHI, A. K.. Impact of heavy metals on morphological and biochemical parameters of *Shorea robusta* plant. **Ekológica**, v.33, n.2, p.116-126, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2478/eko-2014-0012>

PARZYCH, A.; JONCZAK, J.. Pine needles (*Pinus sylvestris* L.) as bioindicators in the assessment of urban environmental contamination with heavy metals. **Journal of Ecological Engineering**, v.15, n.3, p.29-38, 2014. DOI: <https://doi.org/10.17221/364/2017-PSE>

PERUGINI, M.; MANERA, M.; GROTTA, L.; ABETE, M. C.; TARASCO, R.; AMORENA, A.. Heavy metal (Hg, Cr, Cd, and Pb) contamination in urban areas and wildlife reserves: honeybees as bioindicators. **Biological Trace Element Research**, v.140, n.2, p.170-176, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8688-z>

RASHED, M. N.; SOLTAN, M. E.. Animal hair as biological indicator for heavy metal pollution in urban and rural areas. **Environ Monit Assess**, v.110, p.41-53, 2005.

REGLERO, M. M.; GONZÁLEZ, L. M.; TAGGART, M.; MATEO, R.. Transfer of metals to plants and red deer in an old lead mining area in Spain. **The Science of the Total Environment**, v.406, 2008.

ROOSA, S.; WATTIEZ, R.; PRYGIEL, E.; LESVEN, L.; BILLON, G.; GILLAN, D. C.. Bacterial metal resistance genes and metal bioavailability in contaminated sediments. **Environmental Pollution**, v.189, p.143-151, 2014. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.031>

MARECKOVA, M. S.; BOENIGK, J.; BOUCHEZ, A.; CERMAKOVA, K.; CHONOVA, T.; CORDIER, T.; EISENDLE, U.; ELERSEK, T.; FAZI, S.; FLEITUCH, T.; FRÜHE, L.; GAJDOSOVA, M.; GRAUPNER, N.; HAEGERBAEUMER, A.; KELLY, A. M.; KOPECKY, J.; LEESE, F.; NÖGES, P.; ORLIC, S.; PANKSEK, K.; PAWLOWSKI, J.; PETRUSEK, A.; PIGGOTT, J. J.; RUSCH, J. C.; SALIS, R.; SCHENK, J.; SIMEK, K.; STOVICEK, A.; STRAND, D. A.; VASQUEZ, M. I.; VRÅLSTAD, T.; ZLATKOVIC, S.; ZUPANCIC, M.; STOECK, T.. Expanding ecological assessment by integrating microorganisms into routine freshwater biomonitoring. **Water Research**, v.191, p.116767, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116767>

SANI, A.; ABDULLAHI, I. L.; SALMANU, T.. Assessment of heavy metals profile in feathers of birds from Kano metropolis, Nigeria, in 2019. **Environmental Health Engineering and Management Journal**, v.7, n.4, p.257-262, 2020. DOI: <http://doi.org/10.34172/EHEM.2020.30>

GANDELMAN, J. S.; DEMARVAL, M. G.; OELEMANN, W.; LAPORT, M.. Biotechnological potential of sponge-associated bacteria. **Current Pharmaceutical Biotechnology**, v.15, n.2, p.143-155, 2014. DOI:

<https://doi.org/10.2174/1389201015666140711115033>

SAVASSI, L. A.; PASCHOALINI, A. L.; ARANTES, F. P.; RIZZO, E.; BAZZOLI, N.. Heavy metal contamination in a highly consumed Brazilian fish: immunohistochemical and histopathological assessments. **Environ Monit Assess**, v.192, n.8, p.542, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08515-8>

SHAWAI, S. A.. A Review on Heavy Metals Contamination in Water and Soil: effects, sources and phytoremediation techniques. **International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy**, v.1, n.2, 2017. DOI:

<https://doi.org/10.11648/j.ijmpem.20170202.12>

SINGH, G.; SINGH, N. P.; SINGH, R.. Food plants of a major agricultural pest *Aphis gossypii* glover (Homoptera: Aphididae) from India: an updated checklist. **International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research**, v.3, n.2, p.1-26, 2014.

SKALDINA, O.; CISZEK, R.; PERÄNIEMI, S.; KOLEHMAINEN, M.; SORVARI, J.. Facing the threat: common Yellowjacket wasps as indicators of heavy metal pollution. **Environmental Science and Pollution Research**, v.27, n.23, p.29031-29042, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09107-2>

SKALDINA, O.; PERÄNIEMI, S.; SORVARI, J.. Ants and their nests as indicators for industrial heavy metal contamination. **Environmental Pollution**, v.240, p.574-581, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.134>

SORVARI, J.; RANTALA, L. M.; RANTALA, M. J.; HAKKARAINEN, H.; EEVA, T.. Heavy metal pollution disturbs immune response in wild ant populations. **Environmental Pollution**, v.145, n.1, p.324-328, 2007. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.004>

STANKOVIC, S.; STANKOVIC, A.. **Bioindicators of Toxic Metals**. 2013.

STEEN, J. J. M.; DER, V.; CORNELISSEN, B.; BLACQUIÈRE, T.; PIJNENBURG, J. E. M. L.; SEVERIJNEN, M.. think regionally, act locally: metals in honeybee workers in The Netherlands (Surveillance Study 2008). **Environmental Monitoring and Assessment**, v.188, n.8, p.463, 2016. DOI:

<https://doi.org/10.1007/s10661-016-5451-8>

THONGCHAROEN, K.; ROBSON, M. G.; KEITHMALESATTI, S.. Determination of heavy metals in eggs of Little Grebe (*Tachybaptus ruficollis*) around the wastewater treatment ponds, Khon Kaen University. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v.24, n.2, p.362-376, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1383851>

WHO. World Health Organization. International Atomic Energy Agency & Food and Agriculture Organization of the United Nations. Trace elements in human nutrition and health. **World Health Organization**, 1996. DOI: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/37931>

YABE, J.; NAKAYAMA, S. M.; IKENAKA, Y.; MUZANDU, K.; ISHIZUKA, M.; UMEMURA, T.. Uptake of lead, cadmium, and other metals in the liver and kidneys of cattle near a lead-zinc mine in Kabwe, Zambia. **Environ Toxicol Chem**, v.30, n.8, p.1892-1897, 2011.

YANG, M.; XU, Y.; KE, H.; CHEN, H.. Cumulative Effect and Content Variation of Toxic Trace Elements in Human Hair around Xiaoqinling Gold Mining Area, Northwestern China. **Int J Environ Res Public Health**, v.18, n.4, p.2074, 2021

ZARIĆ, N. M.; ILIJEVIĆ, K.; STANISAVLJEVIĆ, L.; GRŽETIĆ, I.. Use of honeybees (*Apis mellifera* L.) as bioindicators for assessment and source appointment of metal pollution. **Environmental Science and Pollution Research**, v.24, n.33, p.25828-25838, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0196-7>

ZHAN, H.; ZHANG, J.; CHEN, Z.; HUANG, Y.; RUUHOLA, T.; YANG, S.. Effects of Cd 2+ exposure on key life history traits and activities of four metabolic enzymes in *Helicoverpa armigera* (Lepidopteran: Noctuidae). **Chemistry and Ecology**, v.33, n.4, p.325-338, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/02757540.2017.1299714>

ZHANG, Y. P.; SONG, D. N.; WU, H. H.; YANG, H. M.; ZHANG, J. Z.; LI, L. J.; MA, E. B.; GUO, Y. P.. Effect of dietary cadmium on the activity of Glutathione S-Transferase and Carboxylesterase in different developmental stages of the *Oxya chinensis* (Orthoptera: Acridoidea). **Environmental Entomology**, v.43, n.1, p.171-177, 2014. DOI: <https://doi.org.ez79.periodicos.capes.gov.br/10.1603/EN13025>

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.

Todas as obras (artigos) publicadas serão tokenizadas, ou seja, terão um NFT equivalente armazenado e comercializado livremente na rede OpenSea (https://opensea.io/HUB_CBPC), onde a CBPC

irá operacionalizar a transferência dos direitos materiais das publicações para os próprios autores ou quaisquer interessados em adquiri-los e fazer o uso que lhe for de interesse.



Os direitos comerciais deste artigo podem ser adquiridos pelos autores ou quaisquer interessados através da aquisição, para posterior comercialização ou guarda, do NFT (Non-Fungible Token) equivalente através do seguinte link na OpenSea (Ethereum).
The commercial rights of this article can be acquired by the authors or any interested parties through the acquisition, for later commercialization or storage, of the equivalent NFT (Non-Fungible Token) through the following link on OpenSea (Ethereum).



<https://opensea.io/assets/ethereum/0x495f947276749ce646f68ac8c248420045cb7b5e/44951876800440915849902480545070078646674086961356520679561157217264104112129/>