

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Aves Silvestres

Relatório Técnico-Científico
Efeitos tóxicos de metais pesados sobre a avifauna

1 Introdução

Os metais pesados são elementos que têm peso atômico elevado, densidade pelo menos cinco vezes maior do que a da água (Tchounwou et al., 2012) e que existem naturalmente em pequenas quantidades na crosta terrestre desde a formação da Terra (Aziz et al., 2021). Causas naturais podem aumentar os níveis de metais pesados, como atividade vulcânica, evaporação de metais do solo e da água, ressuspensão de sedimentos, erosão do solo e intemperismo geológico (Briffa et al., 2020). No entanto, as atividades antropogênicas vêm aumentando o nível dessas substâncias tanto no ambiente terrestre quanto no ambiente aquático, representando uma ameaça para a vida selvagem e para a saúde humana (Pollack et al., 2017).

Os rejeitos de mineração, as emissões de regiões industriais, a deposição de resíduos elementares produzidos pelas indústrias de tintas, as descargas de esgotos domésticos e industriais, os resíduos de usinas termelétricas, a mineração, os vazamentos de petroquímicos e a deposição atmosférica são as principais fontes antropogênicas de metais pesados (Briffa et al., 2020). Ainda, a atividade agropecuária tem sido uma importante fonte de poluição por substâncias metálicas, devido ao uso de agrotóxicos e fertilizantes, que podem ter metais pesados em sua composição (Briffa et al., 2020). Os fertilizantes fosfatados têm sido relatados como uma fonte de contaminação por metais, como chumbo, cádmio, cobre, zinco, cromo, manganês, ferro e níquel (Bento et al., 2021), uma vez que não são suficientemente purificados em sua fabricação (Gimeno-García et al., 1996). Além disso, a presença de metais pesados, como arsênio, cobalto, cromo, níquel e chumbo, nas formulações comerciais de agrotóxicos também é uma realidade (Defarge, et al., 2018).

No Brasil, áreas do Cerrado e Pantanal estão susceptíveis à contaminação por metais pesados devido, principalmente, a atividades de mineração e agropecuária. No Pantanal, a expansão desordenada da agropecuária e das agroindústrias nos planaltos da Bacia do Alto Paraguai está contribuindo para acelerar o processo de degradação ambiental deste bioma (Vieira, 2006). Além disso, a região também tem atividades de mineração, em especial na região de Poconé (MT) e Corumbá (MS). Em Poconé, houve intensa atividade de mineração de ouro nas décadas de 1980 e 1990, perdurando até hoje, responsável pela contaminação por mercúrio e arsênio (Silva, 2022). Em Corumbá, destaca-se a atividade minerária de calcário, ferro, basalto e manganês

(SEMAGRO, 2022), que, embora feita em uma parte elevada em relação ao Pantanal, pode contribuir para o carreamento de sedimentos e água contaminadas para a planície de inundação.

No Cerrado, observa-se uma relação estreita entre o agronegócio e a mineração em função da exploração e beneficiamento de fosfato para produção de fertilizantes, que são fontes potenciais de metais pesados, como relatado anteriormente. Além disso, há a exploração de diversos tipos de minérios. Por exemplo, a região da Serra do Espinhaço, uma reserva da biosfera, está sujeita à exploração de ferro, manganês, bauxita e ouro, e, conseqüentemente, à contaminação por metais pesados em diferentes matrizes ambientais, como solo, ar e água, colocando em risco diversas espécies que têm como hábitat essa região.

Consumidores de níveis tróficos mais baixos incorporam metais e metaloides em seus tecidos e servem como alimento para outros animais em níveis tróficos mais altos (Beaubien et al., 2020). Nesse contexto, as aves são consideradas bioindicadores importantes da poluição ambiental porque geralmente ocupam níveis mais altos da cadeia alimentar, acumulam diferentes contaminantes e são sensíveis o suficiente para refletir mudanças ambientais (Becker, 2003). Diversos estudos relatam os efeitos tóxicos de metais pesados sobre espécies de aves, incluindo alterações endócrinas, fisiológicas, reprodutivas e comportamentais (Koivula et al., 2010; Richard et al., 2021; Pandiyan et al., 2022; Khan et al., 2023). Quando bioacumuladas no organismo, essas substâncias podem interferir, ainda, na formação da casca dos ovos das aves e causar danos no sistema nervoso central, comprometendo a coordenação motora e o equilíbrio dos indivíduos.

Devido ao seu alto grau de toxicidade, arsênio, cádmio, cromo, chumbo e mercúrio figuram entre os metais prioritários que são de importância para a saúde pública e dos ecossistemas. Esses elementos metálicos são considerados tóxicos sistêmicos que são conhecidos por induzir danos a múltiplos órgãos e sistemas, mesmo em níveis mais baixos de exposição, e terem potencial carcinogênico (Tchounwou et al., 2012). Por essa razão e considerando o cenário apresentado, faz-se importante a caracterização dos efeitos tóxicos desses metais sobre as aves. Portanto, o objetivo deste relatório é apresentar as principais vias de contaminação por metais pesados e os potenciais riscos a que a avifauna está exposta uma vez em contato com essas substâncias.

2 Vias de contaminação por metais pesados na avifauna

Atualmente, o termo "metal pesado" tem sido usado para descrever elementos químicos metálicos e metaloides que são tóxicos para o meio ambiente e para os seres humanos. Alguns

desses elementos são considerados benéficos, mas apenas em pequenas quantidades, como vanádio, manganês, cobre, ferro, zinco, estrôncio, selênio e molibdênio (Kumari; Mishra, 2020). Em altas concentrações, esses e outros metais pesados podem ocasionar efeitos deletérios na avifauna. Os principais metais pesados presentes no dia a dia e com potenciais efeitos tóxicos ao meio ambiente são: chumbo, mercúrio, cádmio, níquel, zinco, cobre, cromo e manganês (Briffa et al., 2020). Alguns metaloides e metais mais leves, como selênio, arsênio e alumínio, também podem ser tóxicos (Briffa et al., 2020). A contaminação por metais pesados em aves pode variar dependendo da espécie, dos hábitos alimentares e comportamentais, da idade, da variabilidade genética, da posição trófica, do tipo e da dose do metal pesado presente no ambiente, da via de exposição e da interação com outros fatores ambientais (Burger et al., 2007).

As principais vias de contaminação por metais pesados em aves estão listadas a seguir.

- **Ingestão de alimentos e água contaminadas** – As aves podem ingerir alimentos que estejam contaminados com metais pesados, como sementes, insetos, peixes ou pequenos animais que absorveram metais do ambiente. A literatura aponta que a principal via de contaminação por metais em aves ocorre após a ingestão de alimentos contaminados, que, após serem ingeridos, podem ser excretados ou absorvidos, depositados nos órgãos, especialmente fígado e rins, ou sequestrados pelas penas no período de sua formação (Burger et al., 2015). Além disso, as fêmeas podem eliminar parte dos metais de seu organismo por meio de seus ovos, que, por sua vez, podem ficar retidos na casca ou em seu interior (Ackerman et al., 2019). Por meio da alimentação, as aves podem ainda acumular metais pesados em suas penas e tecidos ao longo do tempo, especialmente se forem expostos repetidamente a fontes de contaminação; por essa razão, as penas de aves são boas bioindicadoras dos níveis de metais pesados devido à facilidade de coleta (Abbasi et al., 2015) e à forte afinidade com metais, como cádmio, cromo, cobre e chumbo (Abdullah et al., 2015). Outra fonte potencial de metais e metaloides para as aves é a geofagia (hábito de ingerir substâncias terrestres, como argila) observada entre muitas espécies (Hui, 2004).
- **Inalação de partículas:** Partículas finas de metais pesados podem ser inaladas pelos pássaros durante a respiração, especialmente em áreas próximas a fontes de poluição industrial e agropecuária.
- **Absorção cutânea:** Alguns metais pesados podem ser absorvidos pela pele das aves quando entram em contato direto com o solo e água contaminadas.

- **Transmissão vertical:** Em alguns casos, os metais pesados podem ser transmitidos das fêmeas para os filhotes através dos ovos, resultando em uma contaminação desde os primeiros estágios de vida.

3 Efeitos tóxicos de metais pesados na avifauna

Os principais metais pesados relatados na literatura científica e seus efeitos tóxicos na avifauna estão listados a seguir.

- **Mercúrio (Hg)**

O mercúrio é um contaminante bioacumulativo distribuído globalmente, frequentemente associado a ecossistemas de áreas úmidas (Zillioux et al., 1993). As fontes antropogênicas incluem indústrias de ferro e aço, indústrias de cimento, mineração de ouro, fundições de metais não ferrosos, indústria de cloro-álcalis e indústrias de produção direta de mercúrio (Pavithra et al., 2023). Uma das fontes antropogênicas mais importantes de poluição por mercúrio em sistemas aquáticos é a mineração de ouro (Wang et al., 2004). No Brasil, o Pantanal tem sido alvo de atividades de mineração de ouro, principalmente em suas margens ao norte, na região de Poconé (Callil; Junk, 2009).

Nos sistemas aquáticos, dependendo da disponibilidade de oxigênio e da profundidade, os estados oxidativos do mercúrio e do sulfeto de mercúrio são transformados em metilmercúrio, uma forma orgânica de mercúrio conhecida por ser muito tóxica, por bactérias redutoras de sulfato e metanogênicas (Pavithra et al., 2023). A biodisponibilidade do metilmercúrio é alta quando comparado ao mercúrio elementar e inorgânico, podendo difundir-se da célula e ser adsorvido em organismos bentônicos, como zooplânctons, peixes e outros organismos menores. Por meio da cadeia alimentar, ocorre o processo de bioacumulação e essa acumulação aumenta em predadores de topo de cadeia, como algumas espécies de aves (Yoshino et al., 2020).

Em aves aquáticas, o mercúrio é adquirido principalmente por meio do consumo de peixes (Santos et al., 2021). O metilmercúrio ingerido por meio de peixes e organismos aquáticos é bem absorvido/metabolizado nos órgãos internos (fígado e rim), com uma fração chegando ao cérebro antes de ser eliminado (Santos et al., 2021). A excreção de mercúrio ocorre principalmente por

meio das fezes, penas, ovos, glândula uropigial e glândula salina (Dietz et al., 2019). Nas aves, o mercúrio se liga fortemente à queratina (rica em aminoácidos contendo enxofre) das penas e da ranfoteca (Costa et al., 2021); por isso, as penas de aves são reconhecidas como um biomarcador importante para a contaminação por mercúrio e outros metais pesados, representando cerca de 70 a 93% da carga corporal total (Burger et al., 2014), sendo a excreção de metilmercúrio através das penas a principal via de eliminação para as aves (Bottini et al., 2021).

Pesquisas a partir da década de 1950 mostraram que, entre as várias espécies de mercúrio presentes na natureza, o metilmercúrio é a principal causa de distúrbios neurológicos, neuromotores, comportamentais e reprodutivos em vertebrados de sangue quente (Rutkiewicz et al., 2011). Os efeitos adversos do mercúrio variam dependendo de sua forma química, concentração e tempo de exposição. A maioria dos efeitos tóxicos do mercúrio em aves ocorre nos rins, causando lesões (Wolfe et al., 1998). Também há efeitos reprodutivos, como desenvolvimento testicular tardio, redução das tentativas de acasalamento, redução da taxa de eclosão dos ovos e do tamanho da ninhada, redução da sobrevivência de filhotes, alterações no comportamento parental, além de aumento do número de ovos postos fora do ninho (Wolfe et al., 1998; Heinz et al., 2010; Tartu et al., 2013). Ainda, o mercúrio é capaz de reagir com grupos sulfidríla livres e esgotá-los, o que pode levar, também, ao estresse oxidativo e causar danos teciduais (Wolfe et al., 1998). Em algumas espécies de aves, a exposição ao mercúrio também pode alterar a produção de hormônios, como testosterona e corticosterona (Adams et al., 2009).

- **Arsênio (As)**

O arsênio é um metaloide que possui propriedades tanto de metal quanto de não-metal, embora seja frequentemente referido como metal (ou, até mesmo, como metal pesado) (Sanchez-Virosta et al., 2015). Esse metal ocorre naturalmente no solo e em vários tipos de rocha, especialmente em minerais e minérios que contêm cobre, chumbo, cobalto e ouro (ATSDR, 2007). Em relação às fontes antropogênicas, as principais causas da poluição por arsênio são atividades relacionadas à mineração, mas outras fontes importantes incluem a queima de carvão, agrotóxicos e arsenicais preservadores de madeira (Garelick et al., 2008).

Em aves, as formas inorgânicas de arsênio são bem absorvidas pelas vias oral e inalatória, mas pouco se sabe sobre as formas orgânicas (Sanchez-Virosta et al., 2015). A maior parte do arsênio é prontamente excretada na urina e nas fezes (ATSDR, 2007). Ainda, o arsênio pode ser

sequestrado nas penas durante a mudança de penas (Geens et al., 2010), e as fêmeas podem eliminá-lo transferindo-o para seus ovos e cascas de ovos durante a época de reprodução (Orłowski et al., 2010). As aves também podem se livrar dos metais depositando-os na glândula uropigial e na glândula de sal (Salibian; Montalti, 2009).

O arsênio pode causar efeitos deletérios à reprodução das aves, especialmente em suas formas inorgânicas (Koivula et al., 2010). Esse metal se acumula principalmente nos tecidos corporais, como fígado e rins, principalmente em animais de topo de cadeia, como aves de rapina (Koivula et al., 2010). Vários efeitos tóxicos foram relatados em um estudo com pintinhos de frango de corte expostos ao arsênio, como apatia ou fadiga, aumento da sede, depressão, diarreia, diminuição nas proteínas séricas totais, congestão hepática, vacuolização citoplasmática, inchaço nos rins, necrose epitelial nos rins e aumento dos espaços no trato urinário (Khan et al., 2013). Observou-se também diminuição no ganho de peso, na taxa de crescimento, bem como redução na ingestão de alimentos (Camardese et al., 1990). O arsênio pode causar, também, estresse oxidativo ao aumentar a quantidade de espécies reativas de oxigênio (Valko et al., 2005). Kumar et al. (2023) observaram alterações hormonais, como disrupção da espermatogênese, redução nos níveis de hormônio folículo-estimulante (FSH), hormônio luteinizante (LH) e testosterona e alterações histopatológicas, sugerindo que este metal pode atuar também como disruptor endócrino.

- **Chumbo (Pb)**

O chumbo é um dos metais mais tóxicos conhecidos e causa a morte de milhões de aves anualmente, levando posteriormente a declínios populacionais e à perda de biodiversidade (Haig et al., 2014). As aves podem ser expostas ao chumbo por diferentes fontes, como anzóis de pesca, tintas, resíduos sólidos e poluição atmosférica (Plaza et al., 2018). No entanto, em escala global, a principal fonte de chumbo para as aves é a ingestão de cartuchos de caça ou fragmentos de balas (De Francisco et al., 2003). A pesca é outra atividade que resulta em contaminação por chumbo por meio do descarte de pesos de rede que podem ser ingeridos por aves aquáticas e resultar em envenenamento hepático e morte (Haig et al., 2014).

A via primária de exposição ao chumbo é a ingestão; uma vez ingerido, ocorre a absorção do chumbo no intestino na forma de sais de chumbo, que entra na corrente sanguínea e atinge

diferentes órgãos e tecidos (De Francisco et al., 2003). Uma vez ingerido, o chumbo se torna um metal capaz de se ligar a componentes no nível subcelular e pode diminuir a produção do grupo heme da hemoglobina por meio da inibição enzimática (Espín et al., 2015). O chumbo também pode se ligar a proteínas dependentes de cálcio, como a calmodulina, o que pode impedir a transdução de sinais para o núcleo (Kirberger; Yang, 2008).

Esse metal se acumula principalmente nos ossos e nos rins de aves, causando desde toxicidade renal e hematológica sutis até alterações patológicas graves e letais, dependendo das concentrações de chumbo alcançadas em diferentes órgãos e tecidos (Koivula et al., 2010; Ferreyra et al., 2015). Baixas concentrações de chumbo produzem efeitos prejudiciais à saúde das aves, como a inibição de enzimas importantes para as funções metabólicas (Espín et al., 2015). Concentrações mais altas podem afetar os sistemas nervoso, reprodutivo, imune, urinário e digestivo, levando a alterações clínicas, como fraqueza, perda de peso, diarreia, incoordenação, anemia, alterações reprodutivas, disfunções do sistema imunológico, anomalias de comportamento, variações no movimento migratório, interrupções na mineralização óssea e até mesmo morte (De Francisco et al., 2003).

Há relatos de que a acumulação de chumbo é maior em fêmeas do que em machos, e as aves jovens têm efeitos tóxicos mais graves em comparação com os adultos, como níveis depressivos de hematócrito, menor peso cerebral (Grue et al., 1986), taxa de crescimento diminuída, comprometimento do crescimento e aumento da mortalidade (Hoffman et al., 1985). Ainda, a exposição ao chumbo pode causar efeitos na reprodução, como redução na produção de ovos, menor número de filhotes e falha na reprodução (Edens; Garlich, 1981), bem como danos oxidativos ao DNA, lipídios e proteínas, aumentando a formação de espécies reativas de oxigênio (Mateo; Hoffman, 2001). É importante observar que a toxicidade do chumbo e seus impactos na saúde das aves podem variar a nível de indivíduo e por espécie, devido a diferenças na fisiologia gastrointestinal, temperatura ambiental, clima, composição da dieta e combinação com outros estressores, como infecções (Paskova et al., 2011; Lindblom et al., 2017).

- **Zinco (Zn)**

O zinco é um metal altamente abundante, estando atrás somente do ferro (Kaur et al., 2024). A contaminação por zinco tornou-se um problema frequente em agroecossistemas devido à

aplicação excessiva de fertilizantes com zinco, efluentes industriais, mineração, fundição, descarte de resíduos, moedas fabricadas pós-1982, fios revestidos de zinco, gaiolas galvanizadas e/ou outros corpos estranhos metálicos (Puschner; Poppenga, 2009; Beyer et al., 2004; Song et al., 2014). O zinco também possui alta mobilidade no solo e alta disponibilidade biológica para as plantas, podendo bioacumular na cadeia trófica (Natasha et al., 2022).

O zinco é capaz de interagir com outros contaminantes, alterando a toxicidade, a bioacumulação e o metabolismo de aves. Por exemplo, níveis elevados de cádmio estão relacionados a níveis elevados de zinco nos tecidos (Kim et al., 1995). O zinco também pode afetar as condições corporais, diminuindo o pâncreas e a massa corporal de aves (Takekawa et al., 2002). Além disso, podem afetar o fígado e os rins de aves aquáticas e causar pancreatite (Beyer et al., 2004).

- **Cádmio (Cd)**

O cádmio é um dos metais pesados mais prejudiciais, conhecido por ser um poluente ambiental global com meia-vida longa e baixa taxa de excreção (Rani et al., 2014). A poluição por cádmio é oriunda principalmente de atividades humanas, incluindo mineração e refino, manufatura, produção de fertilizantes e descarte de resíduos (Ya et al., 2019).

Em aves, a exposição ao cádmio causa uma forte resposta de estresse oxidativo, aumentando os radicais livres de oxigênio reativos e interferindo na defesa celular (Karimi et al., 2018). Este metal também pode causar retardamento de crescimento, anomalias comportamentais e disfunção reprodutiva, bem como induzir danos graves aos sistemas digestivo, excretor e imunológico das aves (Suljevic et al., 2019). Além disso, o sistema circulatório também é afetado pelo cádmio, por meio da redução da massa cardíaca, diminuição da frequência cardíaca e inflamação do músculo cardíaco das aves (Hughes et al., 2000). Também foram observadas lesões cerebelar por perturbação da resposta ao choque térmico (Bi et al., 2023) e modulações imunotoxicológicas e histopatológicas no timo (Irfan et al., 2023).

- **Cobre (Cu)**

O cobre, um elemento essencial para os organismos, também é um poluente comum nos ecossistemas quando em altas concentrações (Chen et al., 2024). A poluição por cobre pode ocorrer devido a atividades industriais, como fábricas que produzem ou utilizam o cobre ou compostos relacionados; mineração de cobre; queima de combustíveis fósseis e resíduos; águas residuárias domésticas e industriais; depósitos de resíduos; produção de fertilizantes fosfatados e produção de madeira (Rehman et al., 2019). A própria produção de cobre também pode ser uma fonte de poluição. Desde a mineração e moagem até o processamento hidro e pirometalúrgico e refino, sua produção tem impactos negativos na qualidade do ar, da água superficial e subterrânea e do solo (Rehman et al., 2019).

Em aves, altas quantidades de cobre podem reduzir a produção de ovos, o peso corporal e tecidual, e o crescimento das penas (por exemplo, em galinhas domésticas) (Jackson et al., 1977). Muitas espécies de aves também demonstraram ter concentrações mais altas de cobre no fígado de juvenis em comparação com aves adultas (Jackson et al., 1979). O cobre também pode causar estresse oxidativo e danos oxidativos intracelulares, aumentando a formação de formas reativas de oxigênio (Stohs; Bagchi, 1995).

- **Níquel**

O níquel é um metal pesado disseminado amplamente no meio ambiente, comumente liberado por meio de efluentes de atividades industriais, como a galvanoplastia, produção de ligas (especialmente na fabricação de aço), fabricação de produtos químicos orgânicos, refino de hidrocarbonetos e produção de baterias (Outridge; Scheuhammer, 1993). Poucos estudos avaliam a toxicidade do níquel em espécies de aves. No entanto, sabe-se que o níquel pode ser genotóxico, imunotóxico e hepatotóxico, além de afetar a reprodução dos animais (Das, 2008). Ele também é capaz de aumentar a formação de espécies reativas de oxigênio, aumentando o risco de estresse oxidativo, o que pode ser importante na carcinogênese induzida por níquel (Das, 2008).

A exposição subcrônica e repetida a doses baixas de níquel pode levar a alterações nos parâmetros bioquímicos e sanguíneos, e no estado fisiológico geral das codornas, enquanto altas concentrações de níquel prejudicaram a resposta imunológica e alteraram características celulares

e metabólicas, diminuíram o peso corporal e ativaram diversos fenótipos de toxicidade, incluindo o desenvolvimento de anemia microcítica, ativação imunológica prejudicada e trombocitose pronunciada (Suljevic et al., 2023). Esses resultados coincidem com danos no fígado e lesões nos rins nos locais de bioacumulação de Ni. É importante destacar que relatórios indicam que as aves tendem a bioacumular mais níquel em áreas poluídas, em comparação com mamíferos (Outridge; Scheuhammer, 1993).

- **Cromo**

O cromo é um metal pesado tóxico que tem causado sérios impactos em plantas e animais nas últimas décadas (Gill et al., 2015). O cromo de origem antropogênica é oriundo principalmente das indústrias metalúrgica, usado na produção de aço inoxidável e na galvanoplastia, e química, que produz compostos de cromo para incorporação em uma variedade diversificada de produtos, incluindo pigmentos de tinta, catalisadores, conservantes de madeira e agentes de curtimento (Outridge et al., 1993). Além disso, grandes quantidades de cromo são reintroduzidas anualmente no meio ambiente por meio do uso de fertilizantes fosfatados contendo cromo, descarga de efluentes industriais e domésticos, despejo de lodo de esgoto contendo cromo em aterros sanitários, emissões atmosféricas de poeira de cromo e aerossóis (Langard e Norseth, 1979; Fishbein, 1981). O uso de fertilizantes orgânicos e de águas residuárias para irrigação também são fonte de cromo (Guani et al., 2011).

Em aves, altos níveis ambientais de cromo podem causar efeitos mutagênicos, teratogênicos e carcinogênicos em diferentes espécies (Koivula et al., 2010). Altas quantidades de cromo na dieta demonstraram causar padrões de crescimento alterados e redução na sobrevivência, por exemplo, na prole de patos-negros (*Anas rubripes*) (Eisler, 2000).

- **Ferro**

O ferro é o metal mais abundante da crosta terrestre ferro (Kaur et al., 2024). A mineração de ferro e aço constitui a principal fonte de contaminação por ferro no meio ambiente. A acumulação de ferro no fígado e em outros tecidos foi relatada em muitas espécies de aves, mas há muita variação entre as espécies, mesmo dentro de grupos taxonômicos intimamente

relacionados, em relação à intolerância ao ferro (Koivula et al., 2010). Quando acumulado nos tecidos, o ferro pode aumentar a hemossiderose (Cork, 2000). Ainda, o ferro é capaz de produzir espécies reativas de oxigênio, causando danos ao DNA e peroxidação lipídica (Cork, 2000).

4 Efeitos tóxicos de metais pesados sobre espécies do PAN Cerrado e Pantanal

- **Águia-pescadora (*Pandion haliaetus*)**

Aves de rapina, como *P. haliaetus*, por serem espécies posicionadas no topo da cadeia alimentar, podem ser utilizadas como espécies bioindicadoras da presença contaminantes, como metais pesados, e seus efeitos (Mendoza et al., 2006). Devido a sua ampla distribuição geográfica, diversos estudos avaliam os efeitos de metais pesados sobre *P. haliaetus*. As espécies piscívoras, como a águia-pescadora, estão expostas a envenenamento crônico ou agudo por mercúrio, especialmente metilmercúrio, em sua alimentação (Holt et al., 1979). Os envenenamentos mais consideráveis por mercúrio em aves de rapina foram registrados entre 1960 e 1980, devido ao uso de agrotóxicos, especialmente fungicidas contendo MeHg, para o tratamento de sementes de grãos (Kalisinska et al., 2014). Os grãos tratados eram consumidos por pequenas aves e mamíferos, que, por sua vez, eram fonte de alimento para predadores terrestres (Kalisinska et al., 2014).

Desde a década de 70, a literatura científica relata sobre o potencial de bioacumulação de metais pesados em *P. haliaetus*, como mercúrio e metilmercúrio, identificados no fígado, rins, músculos e cérebro dessa espécie (Norheim; Frosli, 1978); cobre e arsênio, quantificados no fígado de juvenis e relacionados com sua morte (Wieneyer et al., 1980); e chumbo, detectado no sangue de adultos e filhotes habitando uma região de mineração e fundição nos EUA, resultando em mudanças bioquímicas significativas nos parâmetros sanguíneos (Henny et al., 1991). Estudos mais recentes relataram a contaminação por mercúrio em um estuário dos EUA em níveis associados com a diminuição do sucesso reprodutivo da espécie (Lounsberry-Billie et al., 2008). Kalisinska et al. (2014) relataram a contaminação por mercúrio e metilmercúrio nos tecidos de *P. haliaetus* na Polônia.

Monti et al. (2019) alertaram sobre a presença de metais pesados em ovos de *P. haliaetus* na área do mar Mediterrâneo. Os autores encontram um padrão de concentração de metais, nesta ordem: Ferro > Zinco > Cobre > Selênio > Mercúrio > Chumbo > Cádmio. Foram encontradas,

também, diferenças nas concentrações de contaminantes entre os componentes dos ovos, com valores mais elevados de mercúrio no conteúdo do ovo e na membrana interna do que os registrados na casca do ovo. Os autores destacaram que a escolha do material biológico de análise pode ter implicações significativas para a avaliação correta da contaminação.

- **Arara-azul (*Anodorhynchus hyacinthinus*)**

Na literatura científica, apenas dois estudos avaliam os efeitos de metais pesados sobre *Anodorhynchus hyacinthinus*. Romagnano et al. (1995) alertaram sobre os efeitos da intoxicação por zinco em *A. hyacinthinus*. Um animal de três anos de idade, mantido sob cuidados humanos, apresentou fezes moles e fétida, anorexia, perda de peso, letargia, depressão, ataxia e vocalizações prejudicadas após destruir três cadeados da porta de sua gaiola, provavelmente a fonte de contaminação por zinco. Marchesi et al. (2015) avaliou se a presença de metais pesados no organismo desta espécie interfere no sucesso da eclosão, peso e idade dos filhotes. Os autores identificaram a presença dos metais pesados cromo, ferro, alumínio, arsênio, cádmio, cobre, chumbo, molibdênio, níquel, selênio e zinco no sangue de filhotes de *A. hyacinthinus* capturados no Pantanal, Mato Grosso do Sul (n=26). As amostras de sangue dos filhotes mostraram concentrações de Cr (0,10 $\mu\text{g g}^{-1}$), Fe (3,06 $\mu\text{g g}^{-1}$), Al (3,46 $\mu\text{g g}^{-1}$), Cd (0,25 $\mu\text{g g}^{-1}$), Cu (0,74 $\mu\text{g g}^{-1}$), Mo (0,33 $\mu\text{g g}^{-1}$), Ni (0,61 $\mu\text{g g}^{-1}$), Se (0,98 $\mu\text{g g}^{-1}$) e Zn (2,08 $\mu\text{g g}^{-1}$).

Os filhotes de ninho utilizados neste estudo, em geral, não apresentaram mudanças no peso, idade e sucesso da eclosão dos filhotes, resultantes da contaminação ambiental por metais pesados, sugerindo que esse tipo de contaminação ainda não está em níveis alarmantes para os filhotes de ninho. No entanto, é importante destacar que este estudo foi realizado com amostras de sangue e filhotes, o que mostra contaminação recente e curto tempo de exposição, e, portanto, não reflete a condição real em relação aos danos fisiológicos e reprodutivos em níveis populacionais, além de não refletir os efeitos da bioacumulação ao longo da vida (Marchesi et al., 2015). Alguns estudos estabelecem que a concentração de metais pesados pode ser até dez vezes maior em indivíduos adultos em comparação com indivíduos juvenis (Becerril-Gonzalez et al., 2021). Ressalta-se também que mesmo que os hábitos alimentares especializados de *A. hyacinthinus* não pressuponha, em um primeiro momento, contaminação por metais pesados, essa espécie ainda se

mostra vulnerável por outros meios de contaminação, como inalação de partículas, absorção cutânea e transmissão vertical.

- **Papa-capins (caboclinho) (*Sporophila* sp.) e tiê-bicudo (*Conothraupis mesoleuca*)**

Na literatura científica, nenhum estudo avalia os efeitos tóxicos de metais pesados sobre essas espécies. No entanto, em estudo inédito, Brum (2022) demonstrou que a bioacumulação de mercúrio, ao contrário do que se acreditava, também pode ocorrer em aves granívoras e insetívoras, por meio da ingestão de sementes e insetos contaminados. O autor avaliou o acúmulo de mercúrio em órgãos internos (músculo, fígado, encéfalo) e nas penas de 212 aves insetívoras de mata ripária do Pantanal Norte de Mato Grosso – famílias *Thamnophilidae*, *Tyrannidae*, *Dendrocolaptidae*, *Furnariidae*, *Troglodytidae*, *Picidae*, *Rhynchocyclidae*, *Cuculidae*, *Galbulidae*, *Passerellidae*, *Bucconidae*, *Caprimulgidae* e *Parulidae*. Foi observada a contaminação mercurial em todas as espécies avaliadas, demonstrando que essas aves estão sujeitas à exposição por metais pesados provenientes das atividades agropecuárias e de mineração da Bacia do Alto Paraguai.

As concentrações de mercúrio apresentaram valores, em ordem crescente: músculo < encéfalo < fígado < pena; esses valores ocorreram independentemente do local de coleta, apresentando variação na média nas concentrações de mercúrio de 0,07 a 0,27 $\mu\text{g g}^{-1}$, 0,04 a 0,62 $\mu\text{g g}^{-1}$, 0,14 a 0,81 $\mu\text{g g}^{-1}$ e 0,77 a 3,49 $\mu\text{g g}^{-1}$, respectivamente. Os resultados deste estudo evidenciam que o mercúrio está presente nas teias alimentares do Pantanal Norte do Brasil e pode se biomagnificar em concentrações significativas não somente em espécies consideradas topo de cadeia ou que tenham hábitos alimentares piscícolas, mas também em aves granívoras e insetívoras. Foi relatado que 25% da dieta de uma ave insetívora que se alimenta de invertebrados pode fornecer aproximadamente 75% do mercúrio encontrado em seu organismo (Cristol et al., 2008).

5 Conclusões

- As principais vias de contaminação por metais pesados são ingestão de alimentos e água contaminadas, inalação de partículas, absorção cutânea e transmissão vertical.
- A dieta é a via predominante para o acúmulo de metais pesados em aves e provavelmente esteja atrelada a amplitude da cadeia alimentar do indivíduo.

- Os principais metais pesados que causam efeitos em aves são: mercúrio, arsênio, chumbo, zinco, cádmio, cobre, níquel, cromo e ferro.
- Os efeitos tóxicos de metais pesados sobre espécies de aves incluem alterações endócrinas, fisiológicas, reprodutivas e comportamentais.
- Não somente espécies piscícolas e de topo de cadeia estão sujeitas à contaminação por metais pesados. Espécies granívoras e insetívoras, ao contrário do que se acreditava, também acumulam metais em seus organismos e podem ter suas funções biológicas prejudicadas por eles.

Referências

ABBASI, N. A.; JASPERS, V. L.; CHAUDHRY, M. J. I.; ALI, S.; MALIK, R. N. Influence of taxa, trophic level, and location on bioaccumulation of toxic metals in bird's feathers: A preliminary biomonitoring study using multiple bird species from Pakistan. **Chemosphere**, v. 120, p. 527–537, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.08.054>>.

ABDULLAH, M.; FASOLA, M.; MUHAMMAD, A.; AHMAD, S.; BOSTAN, N.; BOKHARI, H.; AQEEL, M.; NAWAZ, M.; ALAMDAR, A.; KHAN, M.; ALI, N.; ALI, S.; AKBER, M.; EQANI, S. Avian feathers as a non-destructive bio-monitoring tool of trace metals signatures : A case study from severely contaminated areas. **Chemosphere**, v. 119, p. 553–561, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.068>>.

ACKERMAN, J. T.; HARTMAN, C. A.; HERZOG, M. P. Mercury contamination in resident and migrant songbirds and potential effects on body condition *. **Environmental Pollution**, v. 246, p. 797–810, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.060>>.

ADAMS, E. m.; FREDERICK, P. c.; LARKIN, I. l. v.; GUILLETTE, L. j. Sublethal effects of methylmercury on fecal metabolites of Testosterone, estradiol, and corticosterone in captive juvenile White ibises (*Eudocimus albus*). **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 28, n. 5, p. 982–989, 2009.

ATSDR. Toxicological Profile for Arsenic. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Public Health Service, 2007.

AZIZ, B.; ZUBAIR, M.; IRSHAD, N.; SHAFIQUE, K.; MAJID, A. Biomonitoring of Toxic Metals in Feathers of Birds from North - Eastern. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 106, n. 5, p. 805–811, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00128-021-03184-w>>.

BEAUBIEN, G. B.; OLSON, C. I.; TODD, A. C.; OTTER, R. R. The Spider Exposure Pathway and the Potential Risk to Arachnivorous Birds. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 00, n. 00, p. 1–11, 2020.

BECKER, P. H. Chapter 19 Biomonitoring with birds. *In: Trace Metals and Other Contaminants in the Environment*. p. 677–736, 2003.

BECERRIL-GONZÁLEZ, M. A review on birds of prey migration and the toxicological effects of heavy metals. 2022.

BENTO, C. B.; BRAGA, J.; VERÔNICA, G.; GABRIEL, D. M.; BOTERO, W. G.; FERNANDES, A. P.; MARTINELLI, L. A.; CAMARGO, L. Soil metal concentrations after five years of pasture-to- sugarcane conversion. 2021.

BEYER, W. N.; DALGARN, J.; DUDDING, S.; FRENCH, J. B.; MATEO, R.; MIESNER, J.; SILEO, L.; SPANN, J. Zinc and Lead Poisoning in Wild Birds in the Tri-State Mining District (Oklahoma, Kansas, and Missouri). **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 117, p. 108–117, 2004.

BI, S. S.; TALUKDER, M.; SUN, X. T.; LV, M.W.; GE, J.; ZHANG, C.; LI, J. L. Cerebellar injury induced by cadmium via disrupting the heat-shock response. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 9, p. 22550–22559, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23771-6>.

BORGHESI, F.; DINELLI, E.; MIGANI, F.; ARNAUD, B.; AMAT, J. A.; SOMMER, S.; GILLINGHAM, M. A. F.; ALBERTO, V. S.; ARDEOLA, A.; MONTECATINA, V.; FE, A.; DE, I. Assessing environmental pollution in birds : a new methodological approach for interpreting bioaccumulation of trace elements in feather shafts using geochemical sediment data. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 8, p. 96–108, 2017.

BOTTINI, C. L. J.; MACDOUGALL-SHACKLETON, S. A.; BRAN, B. A.; HOBSON, K. A. Feathers accurately reflect blood mercury at time of feather growth in a songbird. **Science of the Total Environment**, v. 775, 2021.

BRIFFA, J.; SINAGRA, E.; BLUNDELL, R. Heliyon Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. **Heliyon**, v. 6, n. June, p. e04691, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>>.

BRUM, B. R. **Aves como sentinelas ambientais: Partição alimentar e teores de mercúrio total em espécies de aves insetívoras do Pantanal Mato-Grossense**. Trabalho de Conclusão de Curso (Tese/Doutorado). Universidade do Estado do Mato Grosso. 2022.

BURGER, J.; GOCHFELD, M.; NILES, L.; DEY, A.; JEITNER, C.; PITT, T.; TSIPOURA, N. Metals in tissues of migrant semipalmated sandpipers (*Calidris pusilla*) from Delaware Bay , New Jersey. **Environmental Research**, v. 133, p. 362–370, 2014.

BURGER, J.; GOCHFELD, M.; SULLIVAN, K.; IRONS, D.; MCKNIGHT, A. Arsenic, cadmium, chromium, lead, manganese, mercury, and selenium in feathers of Black-legged Kittiwake (*Rissa tridactyla*) and Black Oystercatcher (*Haematopus bachmani*) from Prince William Sound, Alaska. v. 98, p. 20–25, 2008.

BURGER, J.; TSIPOURA, N.; NILES, L. J.; GOCHFELD, M.; DEY, A.; MIZRAHI, D. Mercury, Lead, Cadmium, Arsenic, Chromium and Selenium in Feathers of Shorebirds during Migrating through Delaware Bay, New Jersey: Comparing the 1990s and 2011/2012. v. 1992, n. 1, p. 63–74, 2015.

CALLIL, C. T.; JUNK, W. J. Gold mining near Pocone: Environmental , social and economic impact. n. April 2012, 2014.

CAMARDESE, M. B.; HOFFMAN, D. J.; LECAPTAIN, L. J.; PENDLETON, G. W. Effects of arsenate on growth and physiology in mallard ducklings. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 9, p. 785–795, 1990. <http://dx.doi.org/10.1002/etc.5620090613>.

CHEN, Y.; DING, D.; CHENG, Y.; DONG, C.; HSIEH, S. Combined toxicity of microplastics and copper on *Goniopora columns* ☆. **Environmental Pollution**, v. 345, n. November 2023, p. 123515, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123515>>.

COSTA, G. de M.; LÁZARO, W. L.; SANPERA, C.; SÁNCHEZ-FORTÚN, M.; FILHO, S.; DÍEZ, S. *Rhamphotheca* as a useful indicator of mercury in seabirds. **Science of the Total Environment**, v. 754, p. 141730, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141730>>.

CRISTOL, D. A.; BRASSO, R. L.; CONDON, A. M.; FOVARGUE, R. E.; FRIEDMAN, S. L.; HALLINGER, K. K.; MONROE, A. P.; WHITE, A. E. The Movement of Aquatic Mercury Through Terrestrial Food Webs. **Science**, p. 76, 2008.

DAS, K. K.; DAS, S. N. Nickel, its adverse health effects & oxidative stress. **Indian Journal of Medical Research**, p. 412–425, 2008. OUTRIDGE, P. M.; SCHEUHAMMER, A. M. Bioaccumulation and toxicology of nickel: implications for wild mammals and birds. **Environmental Reviews**, v. 1, p. 172–197, 1993.

DE FRANCISCO, N.; TROYA, J. D. R.; AGÜERA, E. I.; FRANCISCO, N. De; TROYA, J. D. R.; AGU, E. I. Lead and lead toxicity in domestic and free-living birds Lead and lead toxicity in domestic and free-living birds. **Avian Pathology**, v. 32, p. 3–13, 2003.

DEFARGE, N.; VENDÔMOIS, J. S. De; SÉRALINI, G. E. Toxicity of formulants and heavy metals in glyphosate-based herbicides and other pesticides. **Toxicology Reports**, v. 5, n. October 2017, p. 156–163, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.12.025>>.

DIETZ, R.; LETCHER, R. J.; DESFORGES, J.; EULAERS, I.; SONNE, C.; WILSON, S.; ANDERSEN-RANBERG, E.; BASU, N.; BARST, B. D.; OVE, J.; BYTINGSVIK, J.; CIESIELSKI, T. M.; DREVNICK, P. E.; GABRIELSEN, G. W.; HAARR, A.; HYLLAND, K.; MUNRO, B.; LEVIN, M.; MCKINNEY, M. A.; DYRMOSE, R.; PEDERSEN, K. E.; PROVENCHER, J.; STYRISHAVE, B.; TARTU, S.; AARS, J.; ACKERMAN, J. T.; ROSING-ASVID, A.; BARRETT, R.; BIGNERT, A.; BORN, E. W.; BRANIGAN, M.; BRAUNE, B.; BRYAN, C. E.; DAM, M.; EAGLES-SMITH, C. A.; EVANS, M.; EVANS, T. J.; FISK, A. T.; GAMBERG, M.; GUSTAVSON, K.; HARTMAN, C. A.; HELANDER, B.; HERZOG, M. P.; HOEKSTRA, P. F.; HOUDE, M.; HOYDAL, K.; JACKSON, A. K.; KUCKLICK, J.; LIE, E.; LOSETO, L.; MALLORY, M. L.; MILJETEIG, C.; MOSBECH, A.; MUIR, D. C. G.; TÚNI, S.; PEACOCK, E.; PEDRO, S.; PETERSON, S. H.; POLDER, A.; RIGÉT, F. F.; ROACH, P.; SAUNES, H.; SINDING, M. S.; SKAARE, J. U.; SØNDERGAARD, J.; STENSON, G.; STERN, G.; TREU, G.; SCHUUR, S. S.; VÍKINGSSON, G. Current state of knowledge on biological effects from contaminants on arctic wildlife and fish. **Science of the Total Environment**, v. 696, p. 133792, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133792>>.

EDENS, F. W.; GARLICH, J. D.; SCIENCE, P.; CAROLINA, N.; CAROLINA, N. Lead-Induced Egg Production Decrease in Leghorn and Japanese Quail Hens 1. **Poultry Science**, v. 62, n. 9, p. 1757–1763, 1982. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3382/ps.0621757>>.

EISLER, R. Chromium. Handbook of Chemical Risk Assessment: Health Hazards to Humans, Plants, and Animals. **Lewis Publishers**, p. 45-92, 2000.

ESPÍN, S.; MARTÍNEZ-LÓPEZ, E.; JIMÉNEZ, P.; MARÍA-MOJICA, P.; GARCÍA-FERNÁNDEZ, A. J. Delta-aminolevulinic acid dehydratase (δ ALAD) activity in four free- living bird species exposed to different levels of lead under natural conditions. **Environmental**

Research, v. 137, p. 185–198, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2014.12.017>>.

FERREYRA, H.; BELDOMENICO, P. M. Lead exposure affects health indices in free-ranging ducks in Argentina. **Ecotoxicology**, 2015.

FISHBEIN, L. Sources, transport and alterations of metal compounds: An overview. I. Arsenic, beryllium, cadmium, chromium, and nickel. **Environmental Health Perspectives**. v. 40, p. 43-64, 1981.

GARELICK, H.; JONES, H.; DYBOWSKA, A.; VALSAMI-JONES, E. Arsenic pollution sources. **Reviews of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 197, p. 17–60, 2008.

GEENS, A.; DAUWE, T.; BERVOETS, L.; BLUST, R.; EENS, M. Haematological status of wintering great tits (*Parus major*) along a metal pollution gradient. **Science of the Total Environment**, The, v. 408, n. 5, p. 1174–1179, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.029>.

GHANI, A. Effect of chromium toxicity on growth, chlorophyll and some mineral nutrients of. **Journal of Biological Sciences**, v. 2, n. 1, 2011.

GILL, R. A.; ZANG, L.; ALI, B.; FAROOQ, M. A.; CUI, P.; YANG, S.; ALI, S.; ZHOU, W. Chemosphere Chromium-induced physio-chemical and ultrastructural changes in four cultivars of *Brassica napus* L . **Chemosphere**, v. 120, p. 154–164, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.029>>.

GIMENO-GARCÍA, E.; ANDREU, V.; BOLUDA, R. Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils. **Environmental Pollution**, v. 92, n. 1, p. 19–25, 1996.

GRUE, C. E.; HOFFMAN, D. J.; BEYER, W. N.; FRANSON, L. P. Lead Concentrations and Reproductive Success in European Starlings *Sturnus vulgaris* Nesting Within Highway Roadside Verges. **Environmental Pollution**, v. 42, p. 157–182, 1986.

HAIG, S. M.; ELIA, J. D.; EAGLES-SMITH, C.; FAIR, J. M.; GERVAIS, J.; HERRING, G.; RIVERS, J. W.; SCHULZ, J. H. The persistent problem of lead poisoning in birds from ammunition and fishing tackle. **Ornithological Applications**, v. 116, n. 3, p. 408–428, 2014.

HEINZ, G. H.; HOFFMAN, D. J.; KLIMSTRA, J. D.; STEBBINS, K. R. Reproduction in mallards exposed to dietary concentrations of methylmercury. **Ecotoxicology**, v. 19, p. 977–982, 2010.

HENNY, C. J.; BLUS, L. J.; HOFFMAN, D. J.; GROVE, R. A.; HATFIELD, J. S. Lead Accumulation and Osprey Production near a Mining Site on the Coeur d'Alene River, Idaho Charles. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 424, 1991.

HOFFMAN, D. J.; FRANSON, J. C.; PATTEE, O. H.; BUNCK, C. M.; MURRAY, H. C. Biochemical and hematological effects of lead ingestion in nestling American kestrels (*Falco sparverius*). **Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology**, v. 8, n. 2, p. 431–439, 2000.

HOLT, G.; FRØSLIE, A.; NORHEIM, G. Mercury, DDE, and PCB in the avian fauna in Norway 1965–1976. **Acta Veterinaria Scandinavica**, v. 70, p. 1–28, 1979.

HUGHES, M. R.; SMITS, J. E.; JOHN, E.; BENNETT, D. C. Morphological and pathological effects of cadmium ingestion on Pekin ducks exposed to saline. **Journal of Toxicology and Environmental Health**, p. 591–608, 2000.

HUI, C. A. Geophagy and Potential Contaminant Exposure for Terrestrial Vertebrates. **Reviews of Environmental Contamination and Toxicology**, n. Lyman 1982, p. 115–134, 2004.

IRFAN, M.; YADAV, S.; TOMAR, R.; CHOUHAN, P.; CHAUHAN, D. K.; AGARWAL, J. Cadmium acetate induced immunotoxic and histopathological modulations in thymus of kuroiler chicks. **Biochemical and Cellular Archives**, v. 2, p. 1065–1069, 2023. <https://doi.org/10.51470/bca.2023.23.2.1065>.

JACKSON, N. Effects of the protracted feeding of copper sulphate-supplemented diets to laying , domestic fowl on egg production and on specific tissues , with special reference to mineral content. **British Journal of Nutrition**, 1979.

JACKSON, N. The effect of dietary copper sulphate on laying performance , nutrient intake and tissue copper and iron levels of the mature , laying , domestic fowl. **British Journal of Nutrition**, 1976.

KALISINSKA, E.; GORECKI, J.; LANOCHA, N.; OKONSKA, A.; MELGAREJO, J. B.; BUDIS, H.; RZAD, I.; GOLAS, J. Total and Methylmercury in Soft Tissues of White-Tailed Eagle (*Haliaeetus albicilla*) and Osprey (*Pandion haliaetus*) Collected in Poland. **AMBIO**, 2014.

KARIMI, O.; HESARAKI, S.; MORTAZAVI, S. P. The Effect of Cadmium on the Ultrastructure and Metallothionein Levels in. **Iranian Journal of Toxicology**, v. 12, n. 2, 2018.

KUMAR, D.; PANDA, S.K.; JENA, G.R.; SETHY, K.; MISHRA, S.K.; SWAIN, B.K.; NAIK, P.K.; BEURA, C.K.; BEHERA, R. Alternations of fertility parameters by graded dose of inorganic arsenic in adult male white pekin ducks. **Biological Trace Element Research**, v. 201, p. 1–10, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03580-9>.

KHAN, A.; SHARAF, R.; ZARGHAM KHAN, M.; KASHIF SALEEMI, M.; MAHMOOD, F. Arsenic toxicity in broiler chicks and its alleviation with ascorbic acid: a toxico-patho-biochemical study. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 6, p. 1105–1111, 2013.

YA, J.; JU, Z.; KAUR, H.; SRIVASTAVA, S.; GOYAL, N.; WALIA, S. Behavior of zinc in soils and recent advances on strategies for ameliorating zinc phyto-toxicity. **Environmental and Experimental Botany**, v. 220, n. February, p. 105676, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105676>>.

KIM, E.-Y.; ICHIHASHI, H.; SAEKI, K.; ATRASHKEVICH, G.; TANABE, S.; TATSUKAWA, R. Metal Accumulation in Tissues Of Seabirds From Chaun, Northeast Siberia, Russia. **Environmental Pollution**, v. 92, n. 3, p. 247–252, 1995.

KIRBERGER, M.; YANG, J. J. Structural differences between Pb_2^+ and Ca_2^+ binding sites in proteins : Implications with respect to toxicity. **Journal of Inorganic Biochemistry journal**, v. 102, p. 1901–1909, 2008.

KOIVULA, M. J.; EEVA, T. Metal-related oxidative stress in birds. **Environmental Pollution**, v. 158, n. 7, p. 2359–2370, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2010.03.013>>.

KUMARI, S.; MISHRA, A. Heavy Metal Contamination. **Soil Contamination - Threats and Sustainable Solutions**, 2020.

LANGARD, S.; NORSETH, T. Chromium. In: FRIBERG L.; NORDBERG G. F.; VOUK V. B. Handbook on the toxicology of metals. **Elsevier/North Holland Biomedical Press**, p. 383-397, 1979.

LOUNSBURY-BILLIE, M. J.; RAND, G. M.; CAI, Y.; BASS JR., O. L. Metal concentrations in osprey (*Pandion haliaetus*) populations in the Florida Bay estuary. **Ecotoxicology**, v. 17, p. 616–622, 2008.

MARCHESI, M. D.; ROSSI, J. L.; GUEDES, N. M. R.; D, M. T. W.; ENDRINGER, D. C.; BARBERINI, C.; FILHO, C.; D, A. M. M.; ROSSI, J. L.; GUEDES, N. M. R.; CARNEIRO, M. T. W. D.; ENDRINGER, D. C. Relationship between weight , age and hatching success and the concentration of heavy metals in nestling blue macaw (*Anodorhynchus hyacinthinus* Latham,

1790) in the Pantanal , Mato Grosso do Sul 1. **Pesquisa Veterinária Brasileira**, v. 35, n. 4, p. 569–572, 2015.

MATEO, R.; HOFFMAN, D. J. Differences in Oxidative Stress Between Young Canada Geese And Mallards Exposed To Lead- Contaminated Sediment. **Journal of Toxicology and Environmental Health**, n. December 2014, p. 37–41, 2001.

MENDOZA, H. De; RODRÍGUEZ, S.; MORENO, H.; RODRÍGUEZ, G.; LÓPEZ, P.; M, H. D. M.; F, S. R.; D, H. M.; ME, G. R. Estudio comparativo del nivel hepático de metales pesados y metaloides en aves rapaces diurnas de Galicia y Extremadura. **Revista de Toxicología**, 2006.

MONTI, F.; BIANCHI, N.; SFORZI, A.; LEONZIO, C.; ANCORA, S. Drawing the baseline of trace element levels in the vulnerable Mediterranean osprey *Pandion haliaetus* : variations by breeding location , habitats , and egg components. **Environmental Science and Pollution Research**, 2020.

NATASHA, N.; SHAHID, M.; BIBI, I.; IQBAL, J.; KHALID, S.; MURTAZA, B.; BAKR, A.; FAROOQ, U.; AMJAD, M.; KHAN, N.; ARSHAD, M. Zinc in soil-plant-human system : A data-analysis review. **Science of the Total Environment**, v. 808, 2022.

NISAR, B.; ASHFAQ, Y.; HUSSAIN, N.; ATIQUE, U.; AZIZ, T.; ALHARBI, M.; ALBEKAIRI, T. H.; ALASMARI, A. F. Heliyon Elucidating the effects of heavy metals contamination on vital organ of fish and migratory birds found at freshwater ecosystem. **Heliyon**, v. 9, n. 11, p. e20968, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20968>>.

NORHEIM, G.; FROSLIE, A. The Degree of Methylation and Organ Distribution of Mercury in Some Birds of Prey in Norway. **Acta Pharmacologica et Toxicologica**, v. 43, p. 196–204, 1978.

CORK, S. C. Iron storage diseases in birds. **Avian Pathology**, v. 29, p. 7–12, 2000.

ORŁOWSKI, G.; KASPRZYKOWSKI, Z.; DOBICKI, W. Trace-Element Interactions in Rook *Corvus frugilegus* Eggshells Along an Urbanisation Gradient. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, 2014.

PANDIYAN, J.; POIYAMOZHI, A.; MAHBOOB, S.; AL-GHANIM, K. A.; AL-MISNED, F.; AHMED, Z.; MANZOOR, I.; GOVINDARAJAN, M. Assessment of the Toxic Effects of Heavy Metals on Waterbirds and Their Prey Species in Freshwater Habitats. **Toxics**, v. 10, 2022.

PAVITHRA, K. G.; SUNDARRAJAN, P.; KUMAR, P. S.; RANGASAMY, G. Mercury sources , contaminations , mercury cycle , detection and treatment techniques : A review. **Chemosphere**, v. 312, n. P1, p. 137314, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137314>.

PLAZA, P. I.; UHART, M.; CASELLI, A.; WIEMEYER, G.; LAMBERTUCCI, S. A. A review of lead contamination in South American birds : The need for more research and policy changes. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 16, n. 4, p. 201–207, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.08.001>>.

POLLACK, L. P.; ONDRASEK, N. R.; CALISI, R. C. Urban health and ecology : the promise of an avian biomonitoring tool. **Current Zoology**, v. 63, n. February, p. 205–212, 2017.

PUSCHNER, B.; POPPENG, R. H.; PAGE, E.; PAGE, E. Lead and Zinc Intoxication in Companion Birds At a Glance. **Compendium: Continuing Education for Veterinarians**, n. January, p. 1–12, 2009.

RANI, A.; KUMAR, A.; LAL, A.; PANT, M. Cellular mechanisms of cadmium-induced toxicity : a review. **International Journal of Environmental Health Research**, v. 24, n. 4, p. 378–399, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/09603123.2013.835032>>.

REHMAN, M.; LIU, L.; WANG, Q.; SALEEM, M. H.; BASHIR, S.; ULLAH, S. Copper environmental toxicology , recent advances , and future outlook : a review. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 18003–18016, 2019.

RICHARD, F.; GIGAURI, M.; BELLINI, G.; ROJAS, O.; RUNDE, A. Warning on nine pollutants and their effects on avian communities. **Global Ecology and Conservation**, v. 32, n. October, p. e01898, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01898>>.

ROMAGNANO, A.; GRINDEM, C. B.; DEGERNES, L.; MAUTINO, M.; ROMAGNANO, A.; GRINDEM, C. B.; DEGERNES, L.; MAUTINO, M. Treatment of a Hyacinth Macaw with Zinc Toxicity. **Journal of Avian Medicine and Surgery**, v. 9, n. 3, p. 185–189, 1995.

RUTKIEWICZ, J.; NAM, D.-H.; COOLEY, T.; NEUMANN, K.; PADILLA, I. B.; ROUTE, W.; STROM, S.; BASU, N. Mercury exposure and neurochemical impacts in bald eagles across several Great Lakes states. **Ecotoxicology**, v. 20, p. 1669–1676, 2011.

SALIBIAN, A.; MONTALTI, D. Physiological and biochemical aspects of the avian uropygial gland. **Brazilian Journal of Biology**, v. 69, n. 2, p. 437–446, 2009.

SÁNCHEZ-VIROSTA, P.; ESPÍN, S.; GARCÍA-FERNÁNDEZ, A. J.; EEVA, T. A review on exposure and effects of arsenic in passerine birds. **Science of the Total Environment**, v. 512–513, p. 506–525, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.069>>.

SANTOS, A. N. D. dos; RECKTENVALD, M. C. N. d. N.; CARVALHO, D. P. de; PUERTA, E. L. B.; SOUSA-FILHO, I. F. de; BASTOS, W. R. Mercury in birds (aquatic and scavenger) from the Western Amazon. **Environmental Research**, v. 201, 2021.

SCHOENEBECK, W.; REDIG, P. T. Influence of snowfall on blood lead levels of free-flying bald eagles (*Haliaeetus leucocephalus*) in the upper Mississippi River Valley. **Journal of Wildlife Diseases**, v. 53, n. 4, p. 816–823, 2017.

SONG, A.; LI, P.; FAN, F.; LI, Z.; LIANG, Y. The Effect of Silicon on Photosynthesis and Expression of Its Relevant Genes in Rice (*Oryza sativa* L .) under High-Zinc Stress. **PloS one**, p. 1–21, 2014.

SEMAGRO. Relatório Da Mineração Em Mato Grosso Do Sul. Secretaria de Meio Ambiente, Desenvolvimento Econômico, Produção e Agricultura Familiar. 2022.

SILVA, S. M. As principais ameaças ao pantanal. Documenta Pantanal, 2022. Disponível em: <https://documentapantanal.com.br/wp-content/uploads/2022/05/ameacas-pantanal.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2024.

STOHS, S. J.; BAGCHI, D. Oxidative mechanisms in the toxicity of metal ions. v. 18, n. 2, p. 321–336, 1995.

SULJEVIC, D.; CORBIC, A.; ISLAMAGIC, E.; FOCAK, M.; FILIPIC, F.; ALIJAGIC, A. Impairments of bone marrow hematopoietic cells followed by the sever erythrocyte damage and necrotic liver as the outcome of chronic in vivo exposure to cadmium : novel insights from quails. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 72, n. July, p. 103250, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.103250>>.

SULJEVIC, D.; FOCAK, M.; SULEJMANOVIC, J.; SEHOVIC, E.; ALIJAGIC, A. Low-dose and repeated exposure to nickel leads to bioaccumulation and cellular and metabolic alterations in quails ☆ √. **Environmental Pollution**, v. 322, 2023.

TAKEKAWA, J. Y.; CRUZ, S. E. W. La; HOTHEM, R. L.; YEE, J. Relating Body Condition to Inorganic Contaminant Concentrations of Diving Ducks Wintering in Coastal California. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 42, p. 60–70, 2002.

TARTU, S.; GOUTTE, A.; BUSTAMANTE, P.; ANGELIER, F.; MOE, B.; BECH, C.; GABRIELSEN, G. W.; MOE, B.; CLÉMENT-CHASTEL, C.; BECH, C.; GABRIELSEN, G. W.; BUSTNES, J. O.; CHASTEL, O. To breed or not to breed : endocrine response to mercury contamination by an Arctic seabird. **Biology Letters**, p. 2013–2016, 2013.

TCHOUNWOU, P. B.; YEDJOU, C. G.; PATLOLLA, A. K.; SUTTON, D. J. Heavy Metal Toxicity and the Environment. **Molecular, Clinical and Environmental Toxicology**, p. 133–164, 2012.

VALKO, M.; MORRIS, H.; CRONIN, M. T. D. Metals , Toxicity and Oxidative Stress. **Current Medicinal Chemistry**, p. 1161–1208, 2005.

VERONIKA, P.; HANA, P.; JIRI, P.; HANA, B.; JANA, S.; KLARA, H. Ecotoxicology and Environmental Safety Combined exposure of Japanese quails to cyanotoxins , Newcastle virus and lead : Oxidative stress responses. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 74, n. 7, p. 2082–2090, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.07.014>>.

VIEIRA, L. M. Penas de aves como indicadores de mercúrio no Pantanal. Corumbá, MS: **Embrapa Pantanal**, 2006. Disponível em: <http://www.cpap.embrapa.br/publicacoes/online/ADM097>. Acesso em: 18 abr. 2024.

WANG, H.; ZHAO, H. Exposure to cadmium induced gut histopathological damages and microbiota alterations of Chinese toad (*Bufo gargarizans*) larvae. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 180, n. 620, p. 449–456, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.038>>.

WANG, Q.; KIM, D.; DIONYSIOU, D. D.; SORIAL, G. A.; TIMBERLAKE, D. Sources and remediation for mercury contamination in aquatic systems d a literature review. v. 131, 2004.

WIEMEYER, S. N.; LAMONT, T. G.; LOCKE, L. N. Residues of Environmental Pollutants and Necropsy Data for Eastern United States Ospreys , 1964-1973. **Estuaries**, v. 3, n. 3, p. 155–167, 1980.

WOLFE, M. F.; SCHWARZBACH, S.; SULAIMAN, R. A. Effects of mercury on wildlife: a comprehensive review. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 17, p. 146-160, 1998.

YOSHINO, K.; MORI, K.; KANAYA, G.; KOJIMA, S.; HENMI, Y. Food sources are more important than biomagnification on mercury bioaccumulation in marine fishes. **Environmental Pollution**, v. 262, p. 113982, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.113982>>.

ZILLIOUX, E. J.; PORCELLA, D. B.; BENOIT, J. M. Mercury Cycling And Effects In Freshwater Wetland Ecosystems. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 12, p. 2245–2264, 1993.