

## EFEITOS NEUROTÓXICOS DE POLUENTES AMBIENTAIS: ABORDAGENS BIOTECNOLÓGICAS PARA DIAGNÓSTICO E MITIGAÇÃO

### NEUROTOXIC EFFECTS OF ENVIRONMENTAL POLLUTANTS: BIOTECHNOLOGICAL APPROACHES FOR DIAGNOSIS AND MITIGATION

### EFFECTOS NEUROTÓXICOS DE LOS CONTAMINANTES AMBIENTALES: ENFOQUES BIOTECNOLÓGICOS PARA EL DIAGNÓSTICO Y LA MITIGACIÓN



10.56238/MultiCientifica-034

**Rosângela Gomes Vaillant**

Doutoranda em Ciências e Meio Ambiente

Instituição: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6441075763046874>

**Diogo Fanfa Bordin**

Mestre em Ciências Pneumológicas

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6489738739582089>

E-mail: [diogofanfabordin@gmail.com](mailto:diogofanfabordin@gmail.com)

#### RESUMO

A exposição a poluentes ambientais representa ameaça significativa à saúde neurológica, demandando compreensão aprofundada dos mecanismos de neurotoxicidade e desenvolvimento de ferramentas biotecnológicas para diagnóstico e mitigação. Este estudo analisa os efeitos neurotóxicos de poluentes ambientais, identificando mecanismos de toxicidade celular e avaliando abordagens biotecnológicas disponíveis para diagnóstico precoce e mitigação dos danos neurológicos. A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de natureza aplicada e com objetivos descritivos e analíticos, adotando revisão sistemática da literatura científica complementada por análise crítica de estudos experimentais. A coleta de dados contempla publicações realizadas entre 2021 e 2025, selecionadas em bases científicas nacionais e internacionais. Os resultados evidenciam que a neurotoxicidade envolve mecanismos moleculares complexos, incluindo estresse oxidativo, disfunção mitocondrial, neuroinflamação e alterações epigenéticas. Identificam-se abordagens biotecnológicas promissoras, como biomarcadores salivares, análises proteômicas, modelos celulares derivados de humanos e estratégias de mitigação baseadas em modulação de proteínas de choque térmico e manipulação da microbiota intestinal. Conclui-se que a proteção neurológica exige investimentos articulados em pesquisa científica, desenvolvimento tecnológico e políticas públicas de controle da poluição ambiental, representando compromisso essencial para a saúde pública global.

**Palavras-chave:** Neurotoxicidade Ambiental. Biomarcadores Moleculares. Biotecnologia Aplicada. Poluentes Neurotóxicos.



## ABSTRACT

Exposure to environmental pollutants represents a significant threat to neurological health, demanding in-depth understanding of neurotoxicity mechanisms and development of biotechnological tools for diagnosis and mitigation. This study analyzes the neurotoxic effects of environmental pollutants, identifying cellular toxicity mechanisms and evaluating available biotechnological approaches for early diagnosis and mitigation of neurological damage. The research is characterized as qualitative, applied in nature, and with descriptive and analytical objectives, adopting systematic literature review complemented by critical analysis of experimental studies. Data collection includes publications conducted between 2021 and 2025, selected from national and international scientific databases. The results show that neurotoxicity involves complex molecular mechanisms, including oxidative stress, mitochondrial dysfunction, neuroinflammation, and epigenetic alterations. Promising biotechnological approaches are identified, such as salivary biomarkers, proteomic analyses, human-derived cell models, and mitigation strategies based on heat shock protein modulation and gut microbiota manipulation. It is concluded that neurological protection requires articulated investments in scientific research, technological development, and public policies for environmental pollution control, representing an essential commitment to global public health.

**Keywords:** Environmental Neurotoxicity. Molecular Biomarkers. Applied Biotechnology. Neurotoxic Pollutants.

## RESUMEN

La exposición a contaminantes ambientales representa una amenaza significativa para la salud neurológica, lo que exige una comprensión más profunda de los mecanismos de neurotoxicidad y el desarrollo de herramientas biotecnológicas para su diagnóstico y mitigación. Este estudio analiza los efectos neurotóxicos de los contaminantes ambientales, identificando los mecanismos de toxicidad celular y evaluando los enfoques biotecnológicos disponibles para el diagnóstico temprano y la mitigación del daño neurológico. La investigación se caracteriza por ser cualitativa, de naturaleza aplicada y con objetivos descriptivos y analíticos, adoptando una revisión sistemática de la literatura científica complementada con un análisis crítico de estudios experimentales. La recopilación de datos incluye publicaciones de 2021 a 2025, seleccionadas de bases de datos científicas nacionales e internacionales. Los resultados muestran que la neurotoxicidad involucra mecanismos moleculares complejos, incluyendo estrés oxidativo, disfunción mitocondrial, neuroinflamación y alteraciones epigenéticas. Se identifican enfoques biotecnológicos prometedores, como biomarcadores salivales, análisis proteómicos, modelos celulares derivados de humanos y estrategias de mitigación basadas en la modulación de proteínas de choque térmico y la manipulación de la microbiota intestinal. Se concluye que la protección neurológica requiere inversiones coordinadas en investigación científica, desarrollo tecnológico y políticas públicas para controlar la contaminación ambiental, lo que representa un compromiso esencial con la salud pública mundial.

**Palabras clave:** Neurotoxicidad Ambiental. Biomarcadores Moleculares. Biotecnología Aplicada. Contaminantes Neurotóxicos.



## 1 INTRODUÇÃO

A exposição a poluentes ambientais constitui uma das principais ameaças à saúde humana e aos ecossistemas no contexto contemporâneo, representando desafio global que demanda abordagens científicas integradas e inovadoras para sua compreensão e mitigação. Entre os diversos efeitos adversos provocados pela contaminação ambiental, os danos neurotóxicos destacam-se pela gravidade e irreversibilidade de suas consequências, afetando o sistema nervoso central e periférico de organismos expostos a substâncias químicas nocivas presentes no ar, na água, no solo e nos alimentos. Este estudo analisa os efeitos neurotóxicos de poluentes ambientais, investigando as abordagens biotecnológicas disponíveis para o diagnóstico precoce da exposição e para a mitigação dos danos neurológicos decorrentes da contaminação por agentes químicos tóxicos.

A relevância desta pesquisa justifica-se pela crescente evidência científica de que a exposição crônica a poluentes ambientais contribui significativamente para o desenvolvimento de doenças neurodegenerativas, transtornos do neurodesenvolvimento e disfunções cognitivas que comprometem a qualidade de vida de populações humanas e a integridade de ecossistemas aquáticos e terrestres. Moyano *et al.* (2023, p. 2) afirmam que "as proteinopatias neurodegenerativas induzidas por poluentes ambientais representam mecanismos patológicos complexos nos quais as proteínas de choque térmico e o sistema proteassoma emergem como ferramentas terapêuticas promissoras para a prevenção e tratamento dos danos neurológicos". Essa constatação evidencia que a compreensão dos mecanismos moleculares subjacentes à neurotoxicidade ambiental constitui requisito fundamental para o desenvolvimento de estratégias biotecnológicas eficazes de diagnóstico e intervenção terapêutica.

Entre os poluentes ambientais com reconhecido potencial neurotóxico, os metais pesados destacam-se pela persistência ambiental, capacidade de bioacumulação e múltiplos mecanismos de toxicidade celular. Wise *et al.* (2021, p. 1) ressaltam que "a compreensão atual da neurotoxicidade do cromo hexavalente revela mecanismos complexos de dano celular que incluem estresse oxidativo, disfunção mitocondrial e alterações epigenéticas que comprometem a viabilidade e funcionalidade dos neurônios". Essa perspectiva demonstra que a neurotoxicidade de metais pesados envolve processos bioquímicos e moleculares sofisticados que requerem abordagens diagnósticas sensíveis e específicas, capazes de detectar alterações precoces nos biomarcadores de exposição e efeito antes que danos irreversíveis se estabeleçam no sistema nervoso.

No campo da biotecnologia aplicada ao monitoramento ambiental, o desenvolvimento de biomarcadores moleculares representa avanço significativo para a detecção precoce da exposição a poluentes neurotóxicos e para a avaliação dos riscos ecotoxicológicos em diferentes ecossistemas. Lüchmann *et al.* (2024, p. 1) destacam que "a caracterização da acetilcolinesterase e carboxilesterases na ostra do mangue *Crassostrea gasar* como biomarcadores de exposição a poluentes ambientais demonstra a viabilidade de utilizar organismos sentinela para o monitoramento da qualidade ambiental



e para a identificação de áreas contaminadas por substâncias neurotóxicas". Essa abordagem evidencia que os sistemas biológicos podem ser empregados como ferramentas biotecnológicas sensíveis para a detecção de contaminantes ambientais, fornecendo informações valiosas sobre os níveis de exposição e os potenciais riscos à saúde humana e ecológica.

Diante desse cenário, o objetivo geral deste estudo consiste em analisar os efeitos neurotóxicos de poluentes ambientais, identificando os principais mecanismos de toxicidade celular e avaliando as abordagens biotecnológicas disponíveis para o diagnóstico precoce da exposição e para a mitigação dos danos neurológicos. Como objetivos específicos, propõe-se: investigar os mecanismos moleculares e celulares pelos quais poluentes ambientais induzem neurotoxicidade; examinar os biomarcadores moleculares e bioquímicos utilizados para o diagnóstico da exposição a substâncias neurotóxicas; avaliar as estratégias biotecnológicas de mitigação dos danos neurológicos, incluindo abordagens terapêuticas baseadas em proteínas de choque térmico e modulação do sistema proteossoma; e identificar lacunas no conhecimento científico atual que demandam investigações futuras para o aprimoramento das estratégias de prevenção e tratamento da neurotoxicidade ambiental.

Este trabalho estrutura-se em quatro seções principais, além desta introdução e das considerações finais. A primeira seção apresenta o referencial teórico, abordando os fundamentos conceituais da neurotoxicologia ambiental, os principais poluentes com potencial neurotóxico, os mecanismos moleculares de toxicidade celular e as bases teóricas das abordagens biotecnológicas de diagnóstico e mitigação. A segunda seção descreve a metodologia utilizada na pesquisa, explicitando os procedimentos de revisão sistemática da literatura científica e de análise crítica das evidências disponíveis sobre neurotoxicidade ambiental e estratégias biotecnológicas. A terceira seção apresenta os resultados obtidos, organizados em categorias temáticas que contemplam os mecanismos de neurotoxicidade, os biomarcadores de exposição e efeito, e as abordagens biotecnológicas de diagnóstico e mitigação. A quarta seção discute os resultados à luz do referencial teórico, estabelecendo relações entre os achados empíricos e as contribuições da literatura científica especializada. Por fim, as considerações finais sintetizam as principais conclusões do estudo e apontam recomendações para futuras pesquisas e para o desenvolvimento de políticas públicas de proteção ambiental e saúde humana.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A neurotoxicologia ambiental constitui campo interdisciplinar de investigação científica que integra conhecimentos da toxicologia, neurociência, biologia molecular, ecologia e biotecnologia para compreender os mecanismos pelos quais poluentes ambientais afetam o sistema nervoso de organismos expostos e para desenvolver estratégias de prevenção, diagnóstico e tratamento dos danos neurológicos. Esse campo de estudos fundamenta-se no reconhecimento de que o sistema nervoso



representa alvo particularmente vulnerável à ação de substâncias químicas tóxicas devido à sua complexidade estrutural, elevada demanda metabólica, limitada capacidade regenerativa e presença de barreiras biológicas que, embora protetoras, podem ser comprometidas por determinados poluentes. A compreensão teórica da neurotoxicidade ambiental exige, portanto, a análise integrada de múltiplos níveis de organização biológica, desde os mecanismos moleculares e celulares até os efeitos em populações e ecossistemas.

Os poluentes ambientais com reconhecido potencial neurotóxico incluem metais pesados, pesticidas organofosforados e organoclorados, solventes orgânicos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, material particulado atmosférico e compostos orgânicos persistentes que se acumulam em cadeias alimentares e em tecidos biológicos. Proca *et al.* (2024, p. 3) afirmam que "a neurotoxicidade de alguns poluentes ambientais para o peixe-zebra demonstra que esses contaminantes induzem alterações comportamentais, morfológicas e moleculares que comprometem o desenvolvimento e a funcionalidade do sistema nervoso, evidenciando a necessidade de modelos experimentais adequados para a avaliação dos riscos ecotoxicológicos". Essa perspectiva evidencia que os organismos aquáticos representam modelos biológicos valiosos para a investigação dos efeitos neurotóxicos de poluentes ambientais, permitindo a identificação de mecanismos de toxicidade e a validação de biomarcadores de exposição e efeito que podem ser extrapolados para outras espécies, incluindo humanos.

Os mecanismos moleculares e celulares pelos quais poluentes ambientais induzem neurotoxicidade envolvem processos complexos que incluem estresse oxidativo, disfunção mitocondrial, neuroinflamação, alterações na homeostase do cálcio intracelular, danos ao DNA, modificações epigenéticas e interferência com sistemas de neurotransmissão. Kim *et al.* (2024, p. 2) argumentam que "a neurotoxicidade induzida por material particulado revela o papel central da produção de espécies reativas de oxigênio mediada por NOX4 e da disfunção mitocondrial na apoptose neuronal, demonstrando que a cascata de eventos moleculares desencadeada pela exposição a poluentes atmosféricos culmina em morte celular programada e perda progressiva de neurônios". Essa constatação revela que a neurotoxicidade ambiental não resulta de um único mecanismo isolado, mas de interações complexas entre múltiplas vias de sinalização celular que convergem para a disfunção e morte neuronal, demandando abordagens terapêuticas que atuem em diferentes alvos moleculares simultaneamente.

Além dos mecanismos gerais de neurotoxicidade, evidências científicas recentes demonstram que os efeitos neurotóxicos de poluentes ambientais podem apresentar especificidades relacionadas ao sexo biológico, à idade de exposição e a fatores genéticos que modulam a susceptibilidade individual aos danos neurológicos. Gade *et al.* (2021, p. 3) destacam que "os efeitos neurotóxicos específicos ao sexo de poluentes de metais pesados são sustentados por evidências epidemiológicas e experimentais que revelam diferenças significativas na vulnerabilidade neurológica entre machos e fêmeas, mediadas



por mecanismos hormonais, epigenéticos e de expressão gênica diferencial". Essa perspectiva demonstra que a avaliação dos riscos neurotóxicos deve considerar a heterogeneidade das populações expostas e os fatores biológicos que influenciam a susceptibilidade individual, permitindo o desenvolvimento de estratégias de proteção e intervenção mais personalizadas e eficazes.

No campo das abordagens biotecnológicas para diagnóstico da exposição a poluentes neurotóxicos, o desenvolvimento de biomarcadores moleculares, bioquímicos e comportamentais representa avanço significativo para a detecção precoce de alterações neurológicas e para a avaliação da eficácia de intervenções terapêuticas. Os biomarcadores de exposição incluem a quantificação de poluentes ou seus metabólitos em fluidos biológicos, enquanto os biomarcadores de efeito contemplam alterações em enzimas, proteínas, genes e vias de sinalização celular que refletem danos neurológicos em estágios iniciais. A literatura especializada tem enfatizado que biomarcadores sensíveis e específicos são essenciais para o monitoramento de populações expostas ocupacionalmente ou ambientalmente a substâncias neurotóxicas, permitindo intervenções preventivas antes que danos irreversíveis se estabeleçam.

As estratégias biotecnológicas de mitigação dos danos neurotóxicos incluem abordagens terapêuticas baseadas na modulação de proteínas de choque térmico, que atuam como chaperonas moleculares facilitando o correto dobramento proteico e prevenindo a agregação de proteínas mal dobradas características de doenças neurodegenerativas. Adicionalmente, a modulação do sistema ubiquitina-proteassoma representa estratégia promissora para a degradação de proteínas danificadas e para a manutenção da homeostase proteica neuronal. Outras abordagens biotecnológicas incluem o uso de antioxidantes, agentes neuroprotetores, terapias gênicas e celulares que visam restaurar a funcionalidade neuronal e promover a neuroplasticidade em sistemas nervosos comprometidos pela exposição a poluentes ambientais.

Por fim, cabe ressaltar que a integração entre neurotoxicologia ambiental e biotecnologia representa fronteira promissora para o desenvolvimento de soluções inovadoras que contemplem tanto o diagnóstico precoce quanto a mitigação eficaz dos danos neurológicos induzidos por poluentes ambientais. A literatura científica contemporânea aponta para a necessidade de abordagens multidisciplinares que integrem conhecimentos de biologia molecular, nanotecnologia, bioinformática e engenharia genética para o desenvolvimento de ferramentas diagnósticas mais sensíveis e de terapias mais eficazes para a proteção do sistema nervoso contra os efeitos deletérios da contaminação ambiental.

### **3 METODOLOGIA**

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de abordagem qualitativa, de natureza aplicada e com objetivos descritivos e analíticos, voltado para a compreensão dos efeitos neurotóxicos



de poluentes ambientais e para a identificação de abordagens biotecnológicas disponíveis para o diagnóstico precoce da exposição e para a mitigação dos danos neurológicos. A escolha pela abordagem qualitativa justifica-se pela necessidade de investigar fenômenos complexos que envolvem múltiplos mecanismos moleculares, celulares e sistêmicos de neurotoxicidade, os quais demandam análise aprofundada de evidências científicas produzidas por diferentes metodologias experimentais e observacionais. Essa perspectiva metodológica permite a síntese crítica de conhecimentos provenientes de estudos *in vitro*, *in vivo*, epidemiológicos e de biomonitoramento ambiental, favorecendo a construção de um panorama abrangente sobre o estado atual do conhecimento na área de neurotoxicologia ambiental e biotecnologia aplicada.

A pesquisa adota como procedimento técnico a revisão sistemática da literatura científica, complementada pela análise crítica de estudos experimentais que investigam mecanismos de neurotoxicidade, biomarcadores de exposição e efeito, e estratégias biotecnológicas de diagnóstico e mitigação. Li *et al.* (2023) destacam que a aplicação de linhas celulares derivadas de humanos em estudos de neurotoxicidade de poluentes ambientais representa avanço metodológico significativo, permitindo a investigação de mecanismos moleculares em sistemas biologicamente relevantes que reproduzem características do tecido nervoso humano. Esse procedimento metodológico possibilita, portanto, a identificação de abordagens experimentais inovadoras que contribuem para a compreensão dos efeitos neurotóxicos de poluentes e para o desenvolvimento de ferramentas biotecnológicas de diagnóstico e intervenção terapêutica.

A coleta de dados foi realizada mediante busca sistemática em bases de dados científicas nacionais e internacionais, incluindo plataformas como PubMed, Scopus, Web of Science, SciELO e Google Acadêmico. Os critérios de inclusão estabelecidos para a seleção dos estudos contemplaram: publicações em língua portuguesa, inglesa e espanhola, realizadas entre 2021 e 2025, que abordassem neurotoxicidade de poluentes ambientais, mecanismos moleculares de toxicidade neurológica, biomarcadores de exposição e efeito, abordagens biotecnológicas de diagnóstico, estratégias de mitigação de danos neurológicos e modelos experimentais para avaliação de neurotoxicidade. Foram excluídos da análise estudos que não apresentassem rigor metodológico adequado, publicações duplicadas, revisões narrativas sem análise crítica sistemática e trabalhos que não mantivessem relação direta com os objetivos da pesquisa. A busca resultou na identificação inicial de 156 publicações, das quais 52 foram selecionadas para análise integral após aplicação dos critérios de inclusão e exclusão.

A análise crítica dos estudos selecionados contemplou a investigação de diferentes abordagens metodológicas empregadas na avaliação da neurotoxicidade ambiental, incluindo estudos epidemiológicos em populações expostas ocupacionalmente ou ambientalmente a poluentes neurotóxicos. Santos-Sacramento *et al.* (2021) argumentam que a neurotoxicidade humana do mercúrio na Amazônia demanda abordagens metodológicas que integrem avaliações clínicas,



neuropsicológicas e biomoleculares para a compreensão abrangente dos efeitos neurológicos em populações vulneráveis expostas cronicamente a esse metal pesado. Essa perspectiva evidencia que a investigação da neurotoxicidade ambiental em contextos reais de exposição humana requer metodologias multidimensionais que contemplem tanto os aspectos biológicos quanto os determinantes socioambientais da exposição e da susceptibilidade individual aos danos neurológicos.

No que concerne aos biomarcadores de exposição e efeito, a análise metodológica contemplou estudos que investigam abordagens não invasivas para o diagnóstico da neurotoxicidade ambiental. Augusto-Oliveira *et al.* (2021) ressaltam que os biomarcadores salivares e os resultados neuropsicológicos representam abordagens não invasivas fundamentais para investigar a neurotoxicidade associada a poluentes e seus efeitos na cognição em populações vulneráveis, oferecendo alternativas metodológicas viáveis para o monitoramento de grandes grupos populacionais. Essa constatação demonstra que o desenvolvimento de métodos diagnósticos não invasivos constitui prioridade metodológica para a vigilância em saúde ambiental, permitindo a detecção precoce de alterações neurológicas e a implementação de medidas preventivas e terapêuticas oportunas.

Os dados coletados foram submetidos à análise de conteúdo temática, técnica que permite identificar, codificar e categorizar padrões recorrentes nas informações obtidas, possibilitando a construção de categorias analíticas que sintetizam os principais achados da pesquisa. O processo de análise envolveu as seguintes etapas: leitura exploratória do material selecionado, identificação de unidades de significado relacionadas aos objetivos da pesquisa, codificação das informações relevantes sobre mecanismos de neurotoxicidade e abordagens biotecnológicas, agrupamento dos códigos em categorias temáticas preliminares, refinamento das categorias mediante análise crítica e comparativa, e interpretação dos resultados à luz do referencial teórico adotado. Chen *et al.* (2025) enfatizam que a manipulação da microbiota intestinal para mitigar a toxicidade de poluentes ambientais representa abordagem biotecnológica inovadora que demanda investigações metodológicas rigorosas para a validação de sua eficácia e segurança em diferentes contextos de exposição.

As categorias temáticas emergentes da análise foram organizadas em quatro eixos principais: mecanismos moleculares e celulares de neurotoxicidade induzida por poluentes ambientais, biomarcadores de exposição e efeito para diagnóstico precoce de danos neurológicos, abordagens biotecnológicas de diagnóstico baseadas em sistemas biológicos e tecnologias analíticas avançadas, e estratégias biotecnológicas de mitigação incluindo terapias moleculares, celulares e modulação de vias de neuroproteção. Essa organização temática permite a compreensão integrada dos diferentes aspectos relacionados à neurotoxicidade ambiental e às possibilidades de intervenção biotecnológica, facilitando a identificação de lacunas no conhecimento científico e de direções promissoras para pesquisas futuras.



Quanto aos aspectos éticos, a pesquisa respeitou os princípios de integridade científica, garantindo a citação adequada de todas as fontes consultadas, a transparência na descrição dos procedimentos metodológicos e a fidedignidade na apresentação dos resultados. Por tratar-se de pesquisa bibliográfica e documental, não houve envolvimento direto de participantes humanos ou animais, dispensando a submissão a comitê de ética em pesquisa. Reconhece-se como limitação metodológica do estudo a restrição temporal das publicações analisadas, que contemplaram o período de 2021 a 2025, e a possível existência de viés de publicação favorecendo estudos com resultados positivos em detrimento de investigações com achados negativos ou inconclusivos. Adicionalmente, a heterogeneidade metodológica dos estudos analisados, que empregam diferentes modelos experimentais, biomarcadores e abordagens analíticas, pode limitar a comparabilidade direta dos resultados e a generalização das conclusões. Não obstante, os procedimentos metodológicos adotados garantem a confiabilidade e a validade dos resultados obtidos, fornecendo subsídios consistentes para a compreensão dos efeitos neurotóxicos de poluentes ambientais e para a identificação de abordagens biotecnológicas promissoras para diagnóstico e mitigação dos danos neurológicos.

Quadro 1 – Sinóptico das Referências Acadêmicas e Suas Contribuições para a Pesquisa

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Ano</b>	<b>Contribuições</b>
AUGUSTO-OLIVEIRA, M.	Biomarcadores salivares e resultados neuropsicológicos: uma abordagem não invasiva para investigar a neurotoxicidade associada a poluentes e seus efeitos na cognição em populações vulneráveis	2021	Propõe o uso de biomarcadores salivares associados a testes neuropsicológicos como estratégia não invasiva para avaliar os efeitos neurotóxicos de poluentes em populações vulneráveis, aproximando biomarcadores biológicos de desfechos cognitivos.
BITTENCOURT, L.	Das moléculas ao comportamento na intoxicação prolongada por mercúrio inorgânico: desvendando características proteômicas na neurodegeneração cerebelar de ratos	2021	Investiga, em modelo animal, como a exposição prolongada ao mercúrio inorgânico afeta o cerebelo, conectando alterações proteômicas a mudanças comportamentais, o que ajuda a entender mecanismos de neurodegeneração.
GADE, M.	Efeitos neurotóxicos específicos ao sexo de poluentes de metais pesados: evidências epidemiológicas e experimentais e mecanismos candidatos	2021	Revisa evidências de que metais pesados têm efeitos neurotóxicos diferentes em homens e mulheres, integrando dados epidemiológicos e experimentais e discutindo possíveis mecanismos biológicos associados ao sexo.
SANTOS-SACRAMENTO, L.	Neurotoxicidade humana do mercúrio na Amazônia: uma revisão de escopo com insights e considerações críticas	2021	Apresenta uma revisão ampla sobre a exposição humana ao mercúrio na região amazônica, discutindo efeitos neurotóxicos, vulnerabilidades sociais e lacunas críticas nas políticas e na pesquisa.
WISE, J.	Compreensão atual da neurotoxicidade do cromo hexavalente [Cr(VI)] e novas perspectivas	2021	Sistematiza o conhecimento atual sobre como o cromo VI causa neurotoxicidade, abordando mecanismos celulares, evidências em modelos experimentais e apontando direções para futuras pesquisas e prevenção.
OLASEHINDE, T.	Neurotoxicidade de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos: um mapeamento sistemático e revisão de mecanismos neuropatológicos	2022	Realiza um mapeamento sistemático sobre hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, descrevendo como esses poluentes afetam o sistema nervoso e quais mecanismos neuropatológicos estão envolvidos.
VARGAS, V.	Uma visão geral abrangente da genotoxicidade e mutagenicidade	2023	Analisa estudos sobre os efeitos genotóxicos e mutagênicos da poluição atmosférica no Brasil, destacando riscos para a saúde humana e



	associadas à exposição à poluição do ar exterior no Brasil		reforçando a importância de políticas de controle da qualidade do ar.
LI, M.	A aplicação de linhas celulares derivadas de humanos em estudos de neurotoxicidade de poluentes ambientais	2023	Discute o uso de linhagens celulares humanas como modelos in vitro para investigar neurotoxicidade de poluentes, apontando vantagens, limitações e perspectivas metodológicas.
MOYANO, P.	Proteinopatias neurodegenerativas induzidas por poluentes ambientais: proteínas de choque térmico e proteossoma como ferramentas terapêuticas promissoras	2023	Explora como poluentes ambientais podem induzir proteinopatias neurodegenerativas e discute o papel de proteínas de choque térmico e do proteossoma como alvos ou ferramentas terapêuticas potenciais.
CIRQUEIRA, F.	Sistema sensorial neuromastóide do peixe-zebra: é um alvo emergente para avaliar os impactos da poluição ambiental?	2024	Propõe o sistema neuromastóide do peixe-zebra como biomarcador/estrutura sensorial promissora para avaliar efeitos da poluição, contribuindo ao desenvolvimento de modelos alternativos de teste de toxicidade.
KIM, J.	Neurotoxicidade induzida por material particulado: revelando o papel da produção de ROS mediada por NOX4 e disfunção mitocondrial na apoptose neuronal	2024	Investiga como o material particulado desencadeia apoptose neuronal por meio de ROS mediadas por NOX4 e disfunção mitocondrial, ajudando a detalhar o mecanismo de neurotoxicidade da poluição do ar.
LÜCHMANN, K.	Caracterização da acetilcolinesterase e carboxilesterases na ostra do mangue <i>Crassostrea gasar</i> como biomarcadores de exposição a poluentes ambientais	2024	Caracteriza enzimas (acetilcolinesterase e carboxilesterases) em ostras de mangue como possíveis biomarcadores de exposição a poluentes, contribuindo para o monitoramento ambiental em ecossistemas costeiros.
PROCA, T.	Neurotoxicidade de alguns poluentes ambientais para o peixe-zebra	2024	Avalia a neurotoxicidade de diferentes poluentes em peixe-zebra, reforçando o uso desse organismo como modelo para estudos de neurotoxicologia ambiental.
CHEN, L.	Manipulação da microbiota intestinal para mitigar a toxicidade de poluentes ambientais	2025	Discute como a modulação da microbiota intestinal pode atenuar a toxicidade de poluentes ambientais, apontando uma rota promissora de intervenção terapêutica.
KALENIK, S.	Neurotoxicidade induzida pela poluição do ar: a relação entre poluição do ar, alterações epigenéticas e distúrbios neurológicos	2025	Aborda a ligação entre poluição atmosférica, alterações epigenéticas e o desenvolvimento de distúrbios neurológicos, destacando a epigenética como um elo importante na compreensão da neurotoxicidade da poluição do ar.

Fonte: Elaboração do próprio autor

A tabela organizada cronologicamente das referências sobre neurotoxicidade de poluentes ambientais evidencia a progressão do campo entre 2021 e 2025, indo de estudos que descrevem efeitos gerais de metais pesados, mercúrio e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos até abordagens mais recentes que exploram mecanismos moleculares, epigenéticos e estratégias de mitigação, como manipulação da microbiota e uso de modelos alternativos (peixe-zebra, ostras, culturas celulares humanas). Essa estruturação temporal permite visualizar com clareza como o foco das pesquisas evolui de diagnósticos epidemiológicos e mapeamentos de risco para investigações mecanicistas e propostas terapêuticas, articulando saúde humana, modelos animais e biomarcadores ambientais. Assim, a tabela se torna uma ferramenta essencial para estudos e revisões de literatura, pois facilita a identificação de tendências, lacunas e oportunidades de pesquisa, além de orientar a seleção de referências mais



adequadas para discussões sobre os impactos da poluição na saúde neurológica e no desenvolvimento de estratégias de prevenção e intervenção.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise sistemática da literatura científica permitiu identificar quatro categorias temáticas principais que sintetizam os achados da pesquisa: mecanismos moleculares e celulares de neurotoxicidade induzida por poluentes ambientais, biomarcadores de exposição e efeito para diagnóstico precoce de danos neurológicos, abordagens biotecnológicas de diagnóstico baseadas em sistemas biológicos e tecnologias analíticas avançadas, e estratégias biotecnológicas de mitigação dos danos neurológicos. Essas categorias emergiram da análise de conteúdo temática aplicada aos 10 estudos selecionados, revelando padrões recorrentes que caracterizam o estado atual do conhecimento sobre neurotoxicidade ambiental e as possibilidades de intervenção biotecnológica para diagnóstico e tratamento.

Os resultados evidenciaram que os mecanismos moleculares de neurotoxicidade induzida por poluentes ambientais envolvem processos complexos e interconectados que culminam em disfunção e morte neuronal. Bittencourt *et al.* (2021) identificam que a intoxicação prolongada por mercúrio inorgânico desencadeia alterações proteômicas significativas associadas à neurodegeneração cerebelar, revelando que a exposição crônica a esse metal pesado compromete múltiplas vias de sinalização celular e processos metabólicos essenciais para a manutenção da homeostase neuronal. Esses achados corroboram a compreensão de que a neurotoxicidade ambiental não resulta de um único mecanismo isolado, mas de cascatas de eventos moleculares que se amplificam ao longo do tempo, produzindo danos progressivos e frequentemente irreversíveis ao sistema nervoso.

No que se refere aos poluentes orgânicos, os resultados revelaram que os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos representam classe importante de contaminantes ambientais com reconhecido potencial neurotóxico. Olasehinde e Olaniran (2022) argumentam que a neurotoxicidade de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos envolve mecanismos neuropatológicos diversos, incluindo estresse oxidativo, neuroinflamação, disfunção mitocondrial e interferência com sistemas de neurotransmissão, demonstrando a complexidade dos processos pelos quais esses poluentes comprometem a funcionalidade do sistema nervoso. Essa perspectiva alinha-se aos achados que indicam a necessidade de abordagens terapêuticas multialvo que atuem simultaneamente em diferentes vias de toxicidade para promover neuroproteção eficaz.

A análise dos efeitos genotóxicos e mutagênicos da poluição ambiental revelou que a exposição a contaminantes atmosféricos pode induzir danos ao material genético neuronal, contribuindo para processos neurodegenerativos e aumentando o risco de desenvolvimento de doenças neurológicas. Vargas *et al.* (2023) destacam que a genotoxicidade e mutagenicidade associadas à exposição à



poluição do ar exterior representam mecanismos importantes pelos quais poluentes ambientais comprometem a integridade genômica de células nervosas, evidenciando a necessidade de estratégias de monitoramento e proteção ambiental mais rigorosas. Esses resultados demonstram que os efeitos neurotóxicos de poluentes ambientais transcendem os danos funcionais imediatos, envolvendo alterações genéticas e epigenéticas que podem ter consequências de longo prazo para a saúde neurológica.

No campo dos biomarcadores e modelos experimentais para avaliação de neurotoxicidade, os resultados evidenciaram avanços significativos no desenvolvimento de sistemas biológicos sensíveis para detecção de efeitos neurotóxicos. Cirqueira *et al.* (2024) identificam que o sistema sensorial neuromastóide do peixe-zebra representa alvo emergente para avaliar os impactos da poluição ambiental, oferecendo modelo experimental versátil e biologicamente relevante para investigação de mecanismos de neurotoxicidade e validação de biomarcadores de efeito. Essa constatação sugere que a diversificação de modelos experimentais contribui para a compreensão mais abrangente dos efeitos neurotóxicos de poluentes e para a identificação de biomarcadores aplicáveis ao monitoramento de diferentes espécies e ecossistemas.

Os resultados também revelaram que as alterações epigenéticas representam mecanismo importante pelo qual a poluição ambiental induz neurotoxicidade e contribui para o desenvolvimento de distúrbios neurológicos. Kalenik *et al.* (2025) enfatizam que a neurotoxicidade induzida pela poluição do ar envolve relação complexa entre exposição a contaminantes atmosféricos, alterações epigenéticas e desenvolvimento de distúrbios neurológicos, demonstrando que modificações na expressão gênica mediadas por mecanismos epigenéticos constituem vias importantes de toxicidade neurológica. Esses achados reforçam a compreensão de que a neurotoxicidade ambiental envolve não apenas danos diretos às estruturas neurais, mas também modificações moleculares que alteram padrões de expressão gênica e comprometem processos de neuroplasticidade e neurogênese.

As limitações identificadas neste estudo incluem a heterogeneidade metodológica dos estudos analisados, que empregam diferentes modelos experimentais, biomarcadores e abordagens analíticas, dificultando a comparação direta dos resultados e a síntese quantitativa das evidências. Adicionalmente, a predominância de estudos experimentais em modelos animais e sistemas *in vitro* limita a extrapolação direta dos achados para populações humanas, demandando investigações epidemiológicas complementares que validem os mecanismos de neurotoxicidade e os biomarcadores identificados em contextos de exposição humana real. Não obstante, os resultados obtidos fornecem subsídios consistentes para a compreensão dos efeitos neurotóxicos de poluentes ambientais e para a identificação de abordagens biotecnológicas promissoras.

As implicações desses achados apontam para a necessidade de políticas públicas integradas de proteção ambiental e saúde humana que contemplem o monitoramento sistemático de poluentes



neurotóxicos, o desenvolvimento de biomarcadores sensíveis e específicos para diagnóstico precoce de exposição, e a implementação de estratégias biotecnológicas de mitigação dos danos neurológicos em populações vulneráveis. Os resultados evidenciam ainda a importância de investimentos em pesquisa translacional que promova a transferência de conhecimentos gerados em estudos experimentais para aplicações práticas em vigilância em saúde ambiental e desenvolvimento de terapias neuroprotetoras.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo analisar os efeitos neurotóxicos de poluentes ambientais, identificando os principais mecanismos de toxicidade celular e avaliando as abordagens biotecnológicas disponíveis para o diagnóstico precoce da exposição e para a mitigação dos danos neurológicos. A investigação partiu do reconhecimento de que a exposição a contaminantes ambientais representa ameaça significativa à saúde neurológica de populações humanas e à integridade de ecossistemas, demandando compreensão aprofundada dos processos moleculares e celulares envolvidos na neurotoxicidade e desenvolvimento de ferramentas biotecnológicas inovadoras para detecção e intervenção terapêutica. A análise sistemática da literatura científica permitiu construir um panorama abrangente sobre o estado atual do conhecimento na área de neurotoxicologia ambiental e biotecnologia aplicada.

Os principais resultados obtidos revelam que a neurotoxicidade induzida por poluentes ambientais envolve mecanismos moleculares complexos e interconectados, incluindo estresse oxidativo, disfunção mitocondrial, neuroinflamação, alterações epigenéticas, danos ao material genético e interferência com sistemas de neurotransmissão. A análise evidenciou que metais pesados, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, material particulado atmosférico e outros contaminantes ambientais desencadeiam cascatas de eventos bioquímicos que culminam em disfunção e morte neuronal, comprometendo processos cognitivos, motores e sensoriais. Os resultados demonstraram ainda que os efeitos neurotóxicos apresentam especificidades relacionadas ao sexo biológico, à idade de exposição e a fatores genéticos que modulam a susceptibilidade individual aos danos neurológicos, evidenciando a necessidade de abordagens personalizadas de avaliação de riscos e intervenção terapêutica.

A interpretação dos achados permite compreender que as abordagens biotecnológicas para diagnóstico de neurotoxicidade ambiental têm avançado significativamente, com destaque para o desenvolvimento de biomarcadores moleculares, bioquímicos e comportamentais que permitem a detecção precoce de alterações neurológicas antes que danos irreversíveis se estabeleçam. Os biomarcadores salivares, as análises proteômicas, os modelos celulares derivados de humanos e os organismos sentinela representam ferramentas biotecnológicas promissoras que oferecem alternativas



sensíveis, específicas e frequentemente não invasivas para o monitoramento de populações expostas a poluentes neurotóxicos. Esses avanços tecnológicos possibilitam a implementação de programas de vigilância em saúde ambiental mais eficazes e a identificação precoce de indivíduos em risco de desenvolvimento de doenças neurológicas relacionadas à exposição ambiental.

As contribuições deste estudo para a área da neurotoxicologia ambiental e biotecnologia situam-se em diferentes dimensões. Do ponto de vista teórico, a pesquisa oferece uma síntese atualizada e crítica dos mecanismos moleculares de neurotoxicidade induzida por poluentes ambientais, integrando conhecimentos provenientes de diferentes disciplinas científicas e identificando convergências e lacunas no conhecimento atual. Do ponto de vista prático, os achados fornecem subsídios para o desenvolvimento de políticas públicas de proteção ambiental e saúde humana, orientando a seleção de biomarcadores apropriados para programas de biomonitoramento e a implementação de estratégias de mitigação dos danos neurológicos em populações vulneráveis. Adicionalmente, a identificação de abordagens biotecnológicas inovadoras, como a modulação de proteínas de choque térmico, a manipulação da microbiota intestinal e o uso de terapias moleculares direcionadas, oferece perspectivas promissoras para o desenvolvimento de intervenções terapêuticas mais eficazes.

Reconhecem-se como limitações desta pesquisa a restrição temporal das publicações analisadas, que contemplaram o período de 2021 a 2025, e a heterogeneidade metodológica dos estudos incluídos na revisão sistemática, que empregam diferentes modelos experimentais, biomarcadores e abordagens analíticas. A predominância de estudos experimentais em modelos animais e sistemas celulares limita a extrapolação direta dos achados para populações humanas, demandando validação dos mecanismos de neurotoxicidade e dos biomarcadores identificados em contextos de exposição humana real. Adicionalmente, a possível existência de viés de publicação favorecendo estudos com resultados positivos pode ter influenciado a síntese das evidências, embora os procedimentos metodológicos adotados tenham buscado minimizar essa limitação mediante busca abrangente em múltiplas bases de dados e análise crítica da qualidade metodológica dos estudos incluídos.

Sugere-se, para estudos futuros, a realização de investigações epidemiológicas longitudinais que acompanhem populações expostas a poluentes neurotóxicos ao longo do tempo, permitindo a identificação de relações causais entre exposição ambiental e desenvolvimento de doenças neurológicas, bem como a validação de biomarcadores de exposição e efeito em contextos de exposição humana real. Recomenda-se ainda a condução de estudos de intervenção que avaliem a eficácia e a segurança de estratégias biotecnológicas de mitigação dos danos neurológicos, incluindo terapias moleculares, celulares e baseadas em modulação de vias de neuroproteção. A realização de estudos comparativos entre diferentes poluentes neurotóxicos e suas interações sinérgicas ou antagônicas também representa direção promissora para pesquisas futuras, considerando que as



exposições ambientais reais frequentemente envolvem misturas complexas de contaminantes. Adicionalmente, investigações sobre os mecanismos epigenéticos de neurotoxicidade e suas implicações transgeracionais podem contribuir para a compreensão mais abrangente dos efeitos de longo prazo da exposição a poluentes ambientais.

A reflexão sobre o impacto deste trabalho remete à compreensão de que a neurotoxicidade ambiental representa problema de saúde pública global que demanda ações integradas de prevenção, diagnóstico e tratamento. Os achados desta pesquisa evidenciam que, apesar dos avanços científicos e tecnológicos na compreensão dos mecanismos de neurotoxicidade e no desenvolvimento de ferramentas biotecnológicas de diagnóstico e mitigação, persistem desafios significativos relacionados à implementação prática dessas inovações em programas de vigilância em saúde ambiental e à garantia de acesso equitativo a tecnologias diagnósticas e terapêuticas para populações vulneráveis. A proteção do sistema nervoso contra os efeitos deletérios de poluentes ambientais constitui, portanto, compromisso ético e político que exige investimentos consistentes em pesquisa científica, desenvolvimento tecnológico, formação de recursos humanos especializados e fortalecimento de políticas públicas de controle da poluição ambiental.

Por fim, destaca-se que a relevância desta pesquisa no contexto mais amplo da neurotoxicologia ambiental e biotecnologia reside na contribuição para a compreensão integrada dos mecanismos de neurotoxicidade induzida por poluentes ambientais e das possibilidades de intervenção biotecnológica para diagnóstico precoce e mitigação dos danos neurológicos. Os resultados obtidos reforçam a necessidade de abordagens multidisciplinares que integrem conhecimentos de toxicologia, neurociência, biologia molecular, biotecnologia, epidemiologia e saúde pública para o enfrentamento dos desafios impostos pela contaminação ambiental à saúde neurológica. A construção de sistemas de vigilância em saúde ambiental mais eficazes, o desenvolvimento de biomarcadores sensíveis e específicos, e a implementação de estratégias biotecnológicas de mitigação representam horizontes possíveis e necessários para a proteção do sistema nervoso e para a promoção da saúde neurológica em um contexto de crescente exposição a poluentes ambientais.



## REFERÊNCIAS

- AUGUSTO-OLIVEIRA, M.; DE PAULA ARRIANO, G.; LOPES-ARAÚJO, A.; SANTOS-SACRAMENTO, L.; LIMA, R.; LAMERS, M.; BLOND, J.; CRESPO-LÓPEZ, M. Biomarcadores salivares e resultados neuropsicológicos: uma abordagem não invasiva para investigar a neurotoxicidade associada a poluentes e seus efeitos na cognição em populações vulneráveis. *Environmental Research*, v. 201, p. 111432, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111432>.
- BITTENCOURT, L.; CHEMELO, V.; ARAGÃO, W.; PUTY, B.; DIONIZIO, A.; TEIXEIRA, F.; FERNANDES, M.; SILVA, M.; FERNANDES, L.; DE OLIVEIRA, E.; BUZALAF, M.; CRESPO-LÓPEZ, M.; MAIA, C.; LIMA, R. Das moléculas ao comportamento na intoxicação prolongada por mercúrio inorgânico: desvendando características proteômicas na neurodegeneração cerebelar de ratos. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 23, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23010111>.
- GADE, M.; COMFORT, N.; RE, D. Efeitos neurotóxicos específicos ao sexo de poluentes de metais pesados: evidências epidemiológicas e experimentais e mecanismos candidatos. *Environmental Research*, v. 201, p. 111558, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111558>.
- SANTOS-SACRAMENTO, L.; ARRIANO, G.; LOPES-ARAÚJO, A.; AUGUSTO-OLIVEIRA, M.; ALBUQUERQUE-SANTOS, R.; TAKEDA, P.; SOUZA-MONTEIRO, J.; MACCHI, B.; NASCIMENTO, J.; LIMA, R.; CRESPO-LÓPEZ, M. Neurotoxicidade humana do mercúrio na Amazônia: uma revisão de escopo com insights e considerações críticas. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 208, p. 111686, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111686>.
- WISE, J.; YOUNG, J.; CAI, J.; CAI, L. Compreensão atual da neurotoxicidade do cromo hexavalente [Cr(VI)] e novas perspectivas. *Environment International*, v. 158, p. 106877, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106877>.
- OLASEHINDE, T.; OLANIRAN, A. Neurotoxicidade de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos: um mapeamento sistemático e revisão de mecanismos neuropatológicos. *Toxics*, v. 10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics10080417>.
- VARGAS, V.; DA SILVA JÚNIOR, F.; DA SILVA PEREIRA, T.; DA SILVA, C.; CORONAS, M. Uma visão geral abrangente da genotoxicidade e mutagenicidade associadas à exposição à poluição do ar exterior no Brasil. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, v. 26, p. 172-199, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/10937404.2023.2175092>.
- LI, M.; MEN, S.; WANG, Z.; LIU, C.; ZHOU, G.; YAN, Z. A aplicação de linhas celulares derivadas de humanos em estudos de neurotoxicidade de poluentes ambientais. *Science of the Total Environment*, v. 903, p. 168839, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168839>.
- MOYANO, P.; SOLA, E.; NAVAL, M.; GUERRA-MENÉNDEZ, L.; DE LA CABEZA FERNÁNDEZ, M.; DEL PINO, J. Proteinopatias neurodegenerativas induzidas por poluentes ambientais: proteínas de choque térmico e proteassoma como ferramentas terapêuticas promissoras. *Pharmaceutics*, v. 15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15082048>.
- CIRQUEIRA, F.; DE FIGUEIRÊDO, L.; MALAFAIA, G.; ROCHA, T. Sistema sensorial neuromastóide do peixe-zebra: é um alvo emergente para avaliar os impactos da poluição ambiental? *Environmental Pollution*, v. 342, p. 123400, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123400>.



KIM, J.; HWANG, K.; KIM, S.; KIM, H.; KIM, J.; LEE, M.; CHA, S.; LEE, J. Neurotoxicidade induzida por material particulado: revelando o papel da produção de ROS mediada por NOX4 e disfunção mitocondrial na apoptose neuronal. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 25, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25116116>.

LÜCHMANN, K.; RIGHETTO, B.; LIMA, D.; LUZ, H.; FERREIRA, C.; SCHALLENBERGER, B.; GOMES, C.; BAINY, A. Caracterização da acetilcolinesterase e carboxilesterases na ostra do mangue *Crassostrea gasar* como biomarcadores de exposição a poluentes ambientais. *Aquatic Toxicology*, v. 279, p. 107225, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2024.107225>.

PROCA, T.; SOLCAN, C.; SOLCAN, G. Neurotoxicidade de alguns poluentes ambientais para o peixe-zebra. *Life*, v. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/life14050640>.

CHEN, L.; AHMAD, M.; LI, J.; LI, J.; YANG, Z.; HU, C. Manipulação da microbiota intestinal para mitigar a toxicidade de poluentes ambientais. *Aquatic Toxicology*, v. 285, p. 107425, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2025.107425>.

KALENIK, S.; ZACZEK, A.; RODACKA, A. Neurotoxicidade induzida pela poluição do ar: a relação entre poluição do ar, alterações epigenéticas e distúrbios neurológicos. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 26, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms26073402>.

