

Tendências da Literatura Científica sobre Biomarcadores de Estresse Oxidativo em Organismos Aquáticos

Luciana de Souza Ondeí, Doutora, Universidade Estadual de Goiás - Campus Central, luciana.ondei@ueg.br
Carlos Filipe Camilo Cotrim, Doutor, Universidade Estadual de Goiás - UnU Porangatu, carlosfcamilo@gmail.com
Emilly Layne Martins do Nascimento, Mestre, Universidade Estadual de Goiás - Campus Central, emillylayne32@gmail.com
Felipe Esteves Pinto, Mestre, Universidade Estadual de Goiás - Campus Central, felipeestevespinto@gmail.com
Filipe Viegas de Arruda, Doutor, Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM), filipeeco@gmail.com
Hugo de Oliveira Barbosa, Doutor, Universidade Estadual de Goiás - Campus Central, hgoabarbosa@gmail.com
Karine Borges Machado, Doutora, Universidade Estadual de Goiás - UnU Porangatu, machadokb@gmail.com
Maisa Carvalho Vieira, Doutora, Instituto Federal Goiano - Campus Ceres, vieiramaisa@hotmail.com
Paulo Vitor Santos Rabelo, Mestre, Universidade Estadual de Goiás - Campus Central, paulobioetologia@gmail.com
Rodrigo Assis de Carvalho, Doutor, Universidade Estadual de Goiás - UnU Palmeiras de Goiás, decarvalho.ra@gmail.com
Victória Sousa, Mestre, Universidade Estadual de Goiás - Campus Central, victoria182@hotmail.com
Vitor Hugo Mendonça do Prado, Doutor, Universidade Estadual de Goiás - Campus Central, vitorbioilce@yahoo.com.br
Fabício Barreto Teresa, Doutor, Universidade Estadual de Goiás - Campus Central - CET, fabricioteresa@yahoo.com.br

Resumo: Os ecossistemas aquáticos são constantemente impactados por substâncias poluentes que podem desencadear estresse oxidativo nos organismos e afetar funções biológicas essenciais para a sobrevivência das espécies. Biomarcadores têm sido amplamente utilizados para monitorar essas alterações, permitindo a detecção precoce de impactos ambientais. Uma análise da literatura revelou um crescimento nas publicações sobre biomarcadores de estresse oxidativo, especialmente após 2002. Os estudos se concentraram majoritariamente em ambientes de água doce (46,14%), seguidos por marinhos (36,57%) e de transição (14,52%). Os impactos por produtos químicos foram os mais investigados (80,33%). Entre os biomarcadores, destacaram-se as enzimas catalase, superóxido dismutase, glutathione S-transferase e glutathione peroxidase. A maioria das pesquisas utilizou uma única classe de organismo como bioindicadora, sendo Actinopterygii e Bivalvia as mais frequentes. Diante dos achados nesse estudo, recomenda-se a ampliação de investigações que combinem diferentes bioindicadores para a formulação de estratégias eficazes no monitoramento e conservação dos ecossistemas aquáticos.

Palavras-chave: bioindicadores; enzimas antioxidantes; monitoramento ambiental; ecotoxicologia.

INTRODUÇÃO

Os ecossistemas aquáticos estão constantemente expostos a diversas fontes de poluição que introduzem metais pesados, pesticidas, hidrocarbonetos e outras substâncias tóxicas no ambiente (Adams, 2001). Essas alterações podem induzir o estresse oxidativo em espécies aquáticas, promovendo um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) e danos a biomoléculas essenciais, como lipídios, proteínas e DNA (Arias *et al.*, 2007).

Por refletirem mudanças no ambiente, os organismos que ali se encontram, como por exemplo os peixes (Ondeí *et al.*, 2020), podem ser usados como bioindicadores dos impactos ambientais e na avaliação da qualidade de diferentes ambientes, como os aquáticos (Parmar; Rawtani; Agrawal, 2016). Os organismos bioindicadores podem ser coletados nas áreas impactadas, no campo, ou podem ser expostos em condições controladas no laboratório (Costa-Silva *et al.*, 2015).

Outra ferramenta de monitoramento e avaliação ambiental mais eficaz que os bioindicadores são os biomarcadores os quais apresentam vantagens por avaliarem alterações biológicas em nível bioquímico, molecular, celular ou fisiológico, quantificadas em células, fluídos corpóreos,

tecidos ou órgãos que expressam a exposição e os efeitos tóxicos causados pelos poluentes (Lam; Gray, 2003). Os biomarcadores de estresse oxidativo incluem enzimas como a superóxido dismutase (*SOD*), catalase (*CAT*), glutathione peroxidase (*GPx*) e glutathione S-transferase (*GST*); marcadores de peroxidação lipídica como o malondialdeído (*MDA*); dentre outros (Girotti, 2002; Van Der Oost; Beyer; Vermeulen, 2003).

Diante das lacunas do conhecimento e a importância dos bioindicadores e dos biomarcadores de estresse oxidativo na avaliação da qualidade ambiental e impacto de poluentes, torna-se relevante a avaliação da tendência da literatura científica sobre o assunto, bem como o levantamento dos principais organismos bioindicadores; dos biomarcadores e dos impactos avaliados.

MATERIAIS E MÉTODOS

A literatura para o estudo foi pesquisada na coleção da base de dados da Web of Science, usando a busca avançada. O seguinte conjunto de palavras-chave, operadores booleanos e códigos de campo foram usados no processo de busca: Web of Science = TS=((bioindicator* OR biomarker* OR marker*) AND ("oxidative stress" OR antioxidant*) AND (biomonit* OR monitoring OR "environmental quality" OR pollution) AND (aquatic* OR lake* OR pond* OR river* OR stream* OR puddle* OR headwater* OR "flood plain*" OR freshwater* OR estuar* OR sea* OR marine* OR "coastal zone*" OR ocean*)) AND PY=1991-2022 AND LA=English AND DT=Article. Os códigos de campo realizaram um filtro inicial, no qual foram pesquisadas palavras-chave apenas sobre o tema (título, resumo e palavras-chave) de artigos publicados em inglês entre 1991 e 2022.

Dos 2.186 artigos recuperados, foram excluídos 366 artigos: 14 de revisão; 259 que não se utilizavam organismos aquáticos; 70 que não avaliavam ambiente aquático; 18 que não se enquadravam no assunto e cinco que estavam fora do período considerado no estudo. Ao final dessa primeira exclusão, restaram 1.820 artigos. Estes trabalhos foram baixados para leitura completa e extração das informações. Nessa próxima etapa, com a análise mais detalhada, foram excluídos mais 263 artigos, dos quais 60 eram de revisão; 14 não utilizavam organismos aquáticos; 169 não avaliavam estresse oxidativo e 21 artigos estavam indisponíveis. No final, a lista de estudos elegíveis incluiu 1.556 artigos.

As seções de material/métodos, resultados e discussão foram analisadas para obtenção das seguintes informações: (i) ano de publicação; (ii) revista na qual o trabalho foi publicado; (iii) qualidade das publicações avaliadas pelo fator de impacto; (iv) local do estudo com base na descrição da metodologia; (v) organismos aquáticos usados como bioindicadores; (vi) biomarcadores de estresse oxidativo utilizados; (vii) se foi um experimento de campo ou experimento de laboratório; (viii) qual o ambiente mais estudado: água doce; marinho ou de transição; (ix) os tipos de impacto avaliados no estudo. O fator de Impacto (FI) das revistas foi obtido a partir do Journal of Citation Reports (JCR), publicado em 2023.

As análises dos dados obtidos foram realizadas utilizando-se análises de frequência simples. A tendência temporal do número de publicações obtidas em cada ano e o efeito do fator de impacto da revista no número de publicações foram testadas utilizando-se a regressão.

RESULTADOS

Os dados analisados mostraram uma tendência crescente no número de publicações ao longo dos anos, com aumento significativo ($r^2 = 0,89$; $p < 0,01$). Os artigos encontrados estavam distribuídos em 266 revistas científicas diferentes, no entanto, 54,89% delas continham apenas um artigo, enquanto 9,40% das revistas apresentaram número igual ou superior a 10 artigos publicados, concentrando 1.096 artigos, o que corresponde a 70,44% do total. Dentre as revistas com pelo menos 10 trabalhos, a que apresentou o maior fator de impacto foi a Journal of

Hazardous Materials (FI = 12,2). Não foi verificada relação entre o fator de impacto e o número de publicações ($r^2 = 0,02$; $p=0,56$).

Foram utilizadas 71 classes de organismos como bioindicadoras. Em 38,95% dos trabalhos foi utilizada a classe Actinopterygii, seguida da Bivalvia (31,11%), correspondendo juntas a 70% dos registros. A maioria dos trabalhos (93,57%) utilizou uma única classe de organismo bioindicadora.

Os biomarcadores mais mencionados e, conseqüentemente, mais utilizados nos estudos foram CAT (968 menções), SOD (777 menções), GST (758 menções), GPx (482 menções), MDA (472 menções) e TBARS (148 menções). Também foram utilizados biomarcadores associados ao metabolismo da glutathione, como glutathione redutase (GR) (322 menções), glutathione reduzida (GSH) (237 menções) e glutathione oxidada (GSSG) (53 menções).

A maioria dos estudos desenvolvidos foi realizada em campo (50,39%). Os trabalhos realizados em laboratório representaram 46,92%. Apenas 2,12% deles combinaram experimentos de campo e laboratório.

As pesquisas foram realizadas majoritariamente em ambientes de água doce (46,14%), seguidos pelos ambientes marinhos (36,57%). Os ambientes de transição também foram explorados, embora em menor proporção (14,52%). Apenas uma fração parcial dos estudos combinaram diferentes ambientes, como transição e marinho (1,35%), água doce e transição (0,45%), água doce e marinho (0,32%) ou múltiplas ambientes simultaneamente (0,06%).

A maior parte dos artigos (80,33%) avaliou o impacto de poluentes químicos como metais pesados, pesticidas, hidrocarbonetos, resíduos industriais e urbanos; 12,08% dos trabalhos avaliaram poluentes biológicos como parasitas, bactérias patogênicas e algas tóxicas; 0,90% investigaram poluição física como sedimentos e variações térmicas e 6,68% não detalharam o tipo de impacto.

DISCUSSÃO

O crescente interesse na avaliação de biomarcadores de estresse oxidativo em ambientes aquáticos reflete uma preocupação global com os impactos da poluição sobre os ecossistemas e a biota aquática (Valavanidis *et al.*, 2006). Embora a pesquisa na área esteja em expansão, ainda há uma dispersão dos estudos entre diferentes periódicos. Por outro lado, observa-se uma concentração significativa dos artigos em um grupo de periódicos que são referências na área. A ausência da relação entre o fator de impacto das revistas e o número de publicações sugere que a escolha do periódico pode não estar diretamente associada à sua influência no meio acadêmico, mas sim a outros fatores, como o escopo editorial.

A predominância da classe Actinopterygii pode refletir a ampla distribuição geográfica desses organismos, sua relevância ecológica, capacidade de acumular poluentes em seus tecidos e estão localizados no final da cadeia alimentar aquática (Authman *et al.*, 2015). Além disso, observou-se que a maioria dos estudos empregou uma única classe de organismo. Essa abordagem unidimensional pode limitar a compreensão integral da qualidade ambiental, uma vez que diferentes grupos taxonômicos podem responder de forma diferenciada aos estressores ambientais (Lomartire; Marques; Gonçalves, 2021).

A alta frequência do uso das enzimas antioxidantes reforça a importância desses biomarcadores na avaliação de organismos expostos a poluentes ambientais (Pandey *et al.*, 2003). Também se destaca a peroxidação lipídica e os biomarcadores associados ao metabolismo da glutathione que são essenciais na manutenção do equilíbrio redox celular e na defesa contra estressores ambientais (Valavanidis *et al.*, 2006). No entanto, a diversidade de biomarcadores indica a necessidade de se avaliar qual é o mais adequado na avaliação do estado ambiental (Lomartire; Marques; Gonçalves, 2021).

Os resultados demonstram equilíbrio entre estudos de campo e de laboratório. As pesquisas de campo desempenham papel fundamental na avaliação dos efeitos reais dos contaminantes, pois permitem avaliar a condição de saúde dos organismos em seu próprio ambiente. No entanto, os organismos podem se deslocar e evitar pontos críticos de contaminação. Por outro lado, os estudos de laboratório oferecem um controle rigoroso das variáveis experimentais, possibilitando a elucidação de mecanismos toxicológicos específicos. Porém, enfrentam dificuldades como manter animais nativos em cativeiro e reproduzir ambientes complexos (Dalzochio *et al.*, 2016). A baixa frequência de abordagens integradas evidencia uma lacuna na combinação das vantagens desses dois métodos.

A predominância de estudos realizados em ambientes de água doce, seguidos pelos ambientes marinhos, refletem a importância desses ecossistemas (Zolkefli *et al.*, 2020). A baixa representatividade de pesquisas em ambientes de transição indica uma lacuna no conhecimento sobre esses ecossistemas dinâmicos, influenciados por sistemas de água doce e marinhos.

O grande número de trabalhos que avaliaram o impacto de poluentes químicos destaca a preocupação com substâncias que podem se bioacumular nos organismos e desencadear processos oxidativos (Samanta *et al.*, 2018). A baixa representatividade de pesquisas sobre poluentes biológicos indica uma possível lacuna na investigação de seus efeitos na homeostase dos ecossistemas.

CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo evidenciam o crescente interesse e a relevância dos biomarcadores de estresse oxidativo como ferramentas de monitoramento ambiental em ecossistemas aquáticos. A predominância de estudos focados em ambientes de água doce e a concentração das publicações em poucos periódicos especializados demonstram a consolidação do tema dentro da ecotoxicologia. No entanto, a baixa representatividade de pesquisas em ambientes de transição e a utilização limitada de abordagens integradas com múltiplas classes de bioindicadores indicam a necessidade de expandir os estudos para uma compreensão mais ampla dos impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, S. M. Biomarker/bioindicator Response Profiles of Organisms Can Help Differentiate Between Sources of Anthropogenic Stressors in Aquatic Ecosystems. *Biomarkers*, v. 6, n. 1, p. 33–44, 2001.
- ARIAS, A. R. L. *et al.* Utilização de bioindicadores na avaliação de impacto e no monitoramento da contaminação de rios e córregos por agrotóxicos. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 12, n. 1, p. 61–72, 2007.
- AUTHMAN, M. M. *et al.* Use of fish as bioindicator of the effects of heavy metals pollution. *Journal of aquaculture research & development*, v. 6, n. 4, p. 1-13, 2015.
- COSTA-SILVA, D. G. *et al.* Oxidative stress markers in fish (*Astyanax* sp. and *Danio rerio*) exposed to urban and agricultural effluents in the Brazilian Pampa biome. *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 22, n. 20, p. 15526-15535, 2015.
- DALZUCHIO, T. *et al.* The use of biomarkers to assess the health of aquatic ecosystems in Brazil: a review. *International Aquatic Research*, v. 8, p. 283-298, 2016.
- GIROTTI, A. W. Serial Review: Regulatory and Cytoprotective Aspects of Lipid Hydroperoxide Metabolism. *Free Radical Biology Medicine*, v. 33, n. 2, p. 154-172, 2002.
- LAM, P. K.; GRAY, J. S. The use of biomarkers in environmental monitoring programmes. *Marine Pollution Bulletin*, v. 46, n. 2, p. 182-186, 2003.
- LOMARTIRE, S.; MARQUES, J. C.; GONÇALVES, A. M. M. Biomarkers based tools to assess environmental and chemical stressors in aquatic systems. *Ecological Indicators*, v. 122, p. 107207, 2021.

ONDEI, L. S. *et al.* Fish biomarker responses to perturbation by drought in streams. *Neotropical Ichthyology*. v. 18, n. 2, p. 1-15, 2020.

PANDEY, S. *et al.* Biomarkers of oxidative stress: a comparative study of river Yamuna fish *Wallago attu* (Bl. & Schn.). *Science of the total environment*, v. 309, n. 1-3, p. 105-115, 2003.

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

SAMANTA, P. *et al.* Ecological risk assessment of a contaminated stream using multi-level integrated biomarker response in *Carassius auratus*. *Environmental Pollution*, v. 233, p. 429-438, 2018.

SCHULTE, P. M. What Is Environmental Stress? Insights From Fish Living in a Variable Environment. *The Journal of Experimental Biology*, v. 217, p. 23-34, 2014.

VALAVANIDIS, A. *et al.* Molecular biomarkers of oxidative stress in aquatic organisms in relation to toxic environmental pollutants. *Ecotoxicology and environmental safety*, v. 64, n. 2, p. 178-189, 2006.

VAN DER OOST, R.; BEYER, J.; VERMEULEN, N. P. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, v. 13, n. 2, p. 57-149, 2003.

ZOLKEFLI, N. *et al.* A Review of Current and Emerging Approaches for Water Pollution Monitoring. *Water*, v. 12, n. 12, p. 3417, 2020.