



XVII Fórum Ambiental

Alta Paulista

27 a 29 de outubro de 2021

Trabalho Inscrito na Categoria de Artigo Completo

ISBN - 978-65-86753-38-7

EIXO TEMÁTICO:

- () Ambiente e Saúde pública
- (x) Bacias Hidrográficas, Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos
- () Biodiversidade e Unidades de Conservação
- () Campo, Agronegócio e as Práticas Sustentáveis
- () Cidades Sustentáveis
- () Conforto Ambiental no Ambiente Construído
- () Desastres, Riscos Ambientais e a Resiliência Urbana
- () Direito Ambiental
- () Educação Ambiental e Práticas Ambientais
- () Geotecnologias Aplicadas à Análise Ambiental
- () Patrimônio Histórico, Turismo e o Desenvolvimento Local
- () Saneamento e Ambiente
- () Segurança e Saúde do Trabalhador

Agrotóxicos, recursos hídricos e organismos bioindicadores

Pesticides, water resources and bioindicators organisms

Plaguicidas, recursos hídricos y organismos bioindicadores

Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro

Professora Doutora, UNESP, Brasil.
juliana.heloisa@unesp.br

Letícia Sales Mercado

Engenheira Sanitarista e Ambiental, Brasil.
leticia.smercado@hotmail.com

RESUMO

Os agrotóxicos são utilizados constantemente no controle de pragas agrícolas e urbanas. No entanto, podem contaminar os cursos d'água e intoxicar os organismos aquáticos. Os efeitos ecotoxicológicos desses contaminantes podem ser observados em estudos com organismos bioindicadores. O objetivo deste artigo foi realizar uma revisão bibliográfica sobre os principais aspectos ambientais associados aos agrotóxicos e sua toxicidade para organismos aquáticos bioindicadores. A busca de publicações científicas foi realizada nas plataformas Science Direct, Scielo, Biblioteca Virtual de Universidades e Google Acadêmico. As informações encontradas foram complementadas com aspectos relacionados à legislação sobre agrotóxicos consultados em plataformas do Governo. A ocorrência de agrotóxicos em recursos hídricos foi registrada em vários países do mundo o que evidencia o uso constante e inadequado dessas substâncias. Essa problemática apresenta grandes desafios que envolvem a busca de medidas preventivas e/ou de recuperação dos possíveis impactos ao ambiente, aos organismos não alvos e aos seres humanos que estão expostos à contaminação por agrotóxicos. A utilização de bioindicadores de contaminação por agrotóxicos é essencial para identificar os efeitos dessas substâncias no ambiente e a sensibilidade entre as espécies e os diferentes níveis tróficos aquáticos. Os peixes constituem um excelente grupo de bioindicadores, entre eles, o *Danio rerio* (paulistinha) é o que se destaca nos estudos ecotoxicológicos. Os efeitos ecotoxicológicos observados com maior frequência em peixes incluem letalidade, neurotoxicidade, alterações enzimáticas, bioquímicas, hematológicas e histológicas. Esses efeitos podem comprometer a sobrevivência e a saúde desses vertebrados interferindo no equilíbrio dos ambientes aquáticos e possível impacto na saúde humana.

PALAVRAS- CHAVE: Ecotoxicologia. Peixe. Toxicidade.

ABSTRACT

*Pesticides are constantly used to control agricultural and urban pests. However, they can contaminate watercourses and intoxicate aquatic organisms. The ecotoxicological effects of these contaminants can be observed in studies with bioindicator organisms. The aim of this article was to carry out a literature review on the main environmental aspects associated with pesticides and their toxicity to aquatic bioindicators. The search for scientific publications was carried out on the platforms Science Direct, Scielo, Virtual University Library and Academic Google. The information found was complemented with aspects related to legislation on pesticides consulted on Government platforms. The occurrence of pesticides in water resources has been recorded in several countries around the world, which shows the constant and inadequate use of these substances. This issue presents major challenges that involve the search for preventive measures and/or recovery from possible impacts on the environment, non-target organisms and human beings who are exposed to contamination by pesticides. The use of pesticide contamination bioindicators is essential to identify the effects of these substances on the environment and the sensitivity between species and different aquatic trophic levels. Fish constitute an excellent group of bioindicators, among them the *Danio rerio* (paulistinha) is the one that stands out in ecotoxicological studies. The most frequently observed ecotoxicological effects in fish include lethality, neurotoxicity, enzymatic, biochemical, hematological and histological changes. These effects can compromise the survival and health of these vertebrates, interfering with the balance of aquatic environments and possibly impacting human health.*

KEYWORDS: Ecotoxicology. Fish. Toxicity.

RESUMEN

*Los pesticidas se utilizan constantemente para controlar plagas agrícolas y urbanas. Sin embargo, pueden contaminar cursos de agua e intoxicar organismos acuáticos. Los efectos ecotoxicológicos de estos contaminantes se pueden observar en estudios con organismos bioindicadores. El objetivo de este artículo fue realizar una revisión de la literatura sobre los principales aspectos ambientales asociados a los plaguicidas y su toxicidad para los bioindicadores acuáticos. La búsqueda de publicaciones científicas se realizó en las plataformas Science Direct, Scielo, Virtual University Library y Google Scholar. La información encontrada se complementó con aspectos relacionados con la legislación sobre plaguicidas consultados en plataformas gubernamentales. La presencia de plaguicidas en los recursos hídricos se ha registrado en varios países del mundo, lo que demuestra el uso constante e inadecuado de estas sustancias. Este tema presenta grandes desafíos que involucran la búsqueda de medidas preventivas y / o recuperación de posibles impactos sobre el medio ambiente, organismos no objetivo y seres humanos expuestos a la contaminación por plaguicidas. El uso de bioindicadores de contaminación por plaguicidas es fundamental para identificar los efectos de estas sustancias sobre el medio ambiente y la sensibilidad entre especies y diferentes niveles tróficos acuáticos. Los peces constituyen un excelente grupo de bioindicadores, entre ellos el *Danio rerio* (paulistinha) es el que se destaca en los estudios ecotoxicológicos. Los efectos ecotoxicológicos observados con mayor frecuencia en los peces incluyen letalidad, neurotoxicidad, cambios enzimáticos, bioquímicos, hematológicos e histológicos. Estos efectos pueden comprometer la supervivencia y la salud de estos vertebrados, interfiriendo con el equilibrio de los ambientes acuáticos y posiblemente afectando la salud humana.*

PALABRAS-CLAVE: Ecotoxicología. Pez. Toxicidad.

1 INTRODUÇÃO

Agrotóxicos, defensivos agrícolas ou pesticidas são denominações para um grupo de substâncias químicas utilizadas no controle de pragas agrícolas e urbanas (PERES; MOREIRA 2003). A utilização destes produtos químicos tem se tornado essencial para o sucesso das cadeias produtivas agrícolas visando aumentar a sua produtividade (AMÉRICO et al., 2015).

O uso desses produtos na agricultura é descrito há muito tempo, mas foi somente com o inseticida diclorodifeniltricloroetano (DDT) em 1931 que houve a comprovação da eficiência do seu controle químico, marcando o início do uso dessas substâncias na produção agrícola (NUNES; RIBEIRO, 1999).

Com a Revolução Verde na década de 1950, o uso intensivo de agrotóxicos e fertilizantes na agricultura intensificou-se em conjunto com o surgimento de novas tecnologias que permitiram alcançar maiores produtividades no campo. Nesse período, observaram-se mudanças no processo do manejo tradicional da agricultura bem como nos impactos causados ao ambiente e a saúde humana (MOREIRA et al., 2002).

De acordo com o último Relatório de Comercialização de Agrotóxicos do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA), no ano de 2019, foi registrada a venda 620.537,98 toneladas de ingredientes ativos de produtos formulados (químicos e bioquímicos) o que representa um aumento de 12,97% nas vendas internas em relação a 2018 (IBAMA, 2021a).

O aumento do consumo e utilização de agrotóxicos pode provocar alterações e impactos negativos no ambiente pela contaminação da comunidade de seres vivos e por meio de sua acumulação nos segmentos bióticos e abióticos dos ecossistemas (RIBAS; MATSUMURA, 2009). Um dos principais compartimentos ambientais impactados pelo aporte de agrotóxicos são os ecossistemas aquáticos, visto que a ocorrência desses contaminantes em águas superficiais e subterrâneas foi registrada em diferentes países (SILVA et al., 2011; TANG et al. 2013; BECKER et al., 2021; KALANTARY; BARZEGAR; JORFI, 2022).

Segundo Severo et al. (2020), os corpos d'água próximos à áreas rurais são geralmente os mais contaminados por resíduos de agrotóxicos que podem ter efeito direto no equilíbrio dos ecossistemas aquáticos. No caso da classe dos herbicidas, o principal efeito será observado em macrófitas aquáticas diferentemente dos inseticidas em que os efeitos mais evidentes ocorrem em animais como algumas espécies de peixes.

Os efeitos adversos dos agrotóxicos podem ser letais ou subletais e atingir organismos aquáticos de diferentes níveis tróficos como algas, microcrustáceos, moluscos e peixes (AMÉRICO et al., 2015). Estudos identificaram alterações comportamentais, bioquímicas, hematológicas e histológicas provocadas por exposição de diferentes espécies de peixes a agrotóxicos que podem prejudicar a saúde e sobrevivência desses organismos (NADAN; NIMILA, 2012; AMÉRICO-PINHEIRO et al., 2019; AMÉRICO-PINHEIRO et al., 2020).

Ao ingerir esses animais, os seres humanos são expostos a concentrações maiores do que as detectadas na água (SCHAFER et al., 2011;) e há evidências que associam os agrotóxicos ao aumento do risco de câncer como por exemplo, o câncer de estômago, leucemia e linfoma (MOSTAFALOU; ABDOLLAHI, 2017). Há relatos de agrotóxicos que causam comprometimento do sistema endócrino, desconforto pulmonar e diabetes em seres humanos (KIM; KABIR; JAHAN, 2017; MOSTAFALOU; ABDOLLAHI, 2017).

Os peixes e outros organismos presentes no ecossistema aquático são utilizados como organismos bioindicadores de agrotóxicos, que possuem um papel útil devido à sua especificidade a certos impactos, pois inúmeras espécies são comprovadamente sensíveis a vários contaminantes ambientais (WASHINGTON, 1984). Assim, o uso de organismos bioindicadores de contaminação ambiental por agrotóxicos é essencial visando auxiliar em medidas de identificação desses compostos em água, caracterização de seus possíveis efeitos adversos à biota e proposição de estratégias de recuperação de ambientes aquáticos.

2 OBJETIVO

O objetivo deste artigo foi realizar uma revisão bibliográfica sobre os principais aspectos ambientais associados aos agrotóxicos e sua toxicidade para organismos aquáticos bioindicadores.

3 METODOLOGIA

A busca de publicações científicas sobre os agrotóxicos e toxicidade para organismos bioindicadores foi realizada nas plataformas de pesquisa *Science Direct*, *Scielo*, Biblioteca Virtual de Universidades e Google Acadêmico. As informações encontradas nessas plataformas foram complementadas com aspectos relacionados à legislação sobre agrotóxicos consultados em plataformas do Governo.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Aspectos gerais e ambientais sobre os agrotóxicos

Os agrotóxicos são uma das principais tecnologias agrícolas usadas para preservar as culturas agrícolas da ação danosa provocada por organismos vivos que prejudicam o desenvolvimento das plantas. Essas formulações químicas comerciais contêm ingredientes ativos tóxicos e ingredientes inertes. Os ingredientes ativos tóxicos são sintetizados e cuidadosamente selecionados durante o período de 8 a 10 anos, em condições de laboratório e de campo, sendo sua principal característica a toxicidade (MACHADO et al., 2013).

No Brasil, existem discussões a respeito da adoção dos termos agrotóxicos, defensivos agrícolas, produtos fitossanitários, pesticidas e biocidas (SPADOTO et al., 2004). Assim, a Lei nº7.802 de 1989 também conhecida como “Lei dos Agrotóxicos” definiu o termo agrotóxico para:

- a) Os produtos e os agentes de processos físicos, químicos ou biológicos, destinados ao uso nos setores de produção, no armazenamento e beneficiamentos de produtos agrícolas, nas pastagens, na proteção de florestas, nativas ou implantadas, e de outros ecossistemas e também de ambientes urbanos, hídricos e industriais, cuja finalidade seja alterar a composição de flora ou fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos.
- b) Substâncias e produtos, empregados como desfolhantes, desseccantes, estimuladores e inibidores de crescimento (BRASIL, 1989, p.1).

A Lei dos Agrotóxicos, assim como outras legislações, é regulamentada por decreto. O responsável pela regulamentação da presente Lei, Decreto nº 4.074 de 2002, determina as competências dos órgãos responsáveis pelo registro dos produtos. Esses órgãos incluem Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) (BRASIL, 2002).

Segundo Ribas e Matsumura (2009), essas substâncias químicas podem ser classificadas em inseticidas (controle de insetos), fungicidas (controle de fungos), herbicidas (controle de plantas daninhas), desfoliantes (controle de folhas indesejadas), fumegantes (controle de bactérias do solo), raticidas (controle de roedores) e acaricidas (controle de ácaros).

Os grupos de agrotóxicos mais comercializados são dos inseticidas e herbicidas. No Brasil, em 2019, os agrotóxicos mais comercializados foram os formulados à base dos ingredientes ativos do glifosato, ácido diclorofenoxiacético (2,4-D), mancozebe, acefato, atrazina; clorotalonil; dicloreto de paraquate; malationa; enxofre e clorpirifós (IBAMA, 2021a).

No caso dos inseticidas, os grupos que mais se destacam em relação ao uso e a toxicidade são os organoclorados, organofosforados, carbamatos, piretróides e neonicotinóides (FIKES, 1990; SPENCER et al., 2001; TOMIZAWA; CASIDA, 2003; FLORES et al., 2004; AMÉRICO-PINHEIRO et al., 2019; AMÉRICO-PINHEIRO et al., 2020). Para os herbicidas, podem-se ressaltar os estudos realizados com glifosato, 2,4 D e atrazina (SANTOS et al. 2015; CRUZ et al., 2016; RODEA-PALOMARES et al., 2015; HOU et al., 2017; TEIXEIRA et al., 2018). Neste contexto, o glifosato é o ingrediente ativo mais produzido e aplicado no mundo o que propicia sua presença em vários ecossistemas aquáticos (MARTINI et al., 2012; FARIA et al., 2021).

O uso e aplicação dos agrotóxicos pode ser realizado em florestas, ambientes aquáticos, áreas urbanas e industriais, agricultura e pastagem de acordo com a recomendação de cada produto (RIBAS; MATSUMURA, 2009). Após a aplicação de um agrotóxico existem vários processos físicos, químicos e biológicos que influenciam seu comportamento no ambiente como sorção, transformação e transporte, além da interação entre esses processos. Condições meteorológicas, microrganismos presentes no solo, topografia, manejo do solo, quantidade de água na superfície são também alguns fatores que interferem no destino o movimentação dos agrotóxicos em matrizes ambientais como solo, águas subterrâneas e águas superficiais (EMBRAPA, 2021).

Além dos processos que determinam o destino ambiental dos agrotóxicos, a estrutura e as propriedades desses contaminantes podem influenciar no seu descolamento e movimentação no ambiente (SPADOTTO et al., 2004). A aplicação dos agrotóxicos pode chegar até os organismos que vivem nas áreas aplicadas, nos animais domésticos, nas pessoas que vivem no entorno, trabalhadores expostos e nos consumidores de alimentos que possam apresentar algum tipo de resíduo desses compostos (MACHADO et al., 2013).

Com isso, o IBAMA estabelece critérios que visam à utilização racional e segura dos agrotóxicos a fim de preservar os recursos naturais. Para isso, é importante conhecer as características e comportamento ambiental do agrotóxico que se pretende registrar por meio de estudos de testes físico-químicos, toxicológicos e ecotoxicológicos. Baseado nessas informações, os agrotóxicos são classificados quanto ao seu potencial de periculosidade ambiental (PPA) em quatro classes que variam de I a IV sendo a menor classificação mais restritiva do ponto de vista ambiental, conforme Quadro 1 (IBAMA, 2021b).

Quadro 1- Classificação dos agrotóxicos quanto ao potencial de periculosidade ambiental

Classe	Potencial de Periculosidade Ambiental
I	Produto altamente perigoso ao meio ambiente
II	Produto muito perigoso ao meio ambiente
III	Produto perigoso ao meio ambiente
IV	Produto pouco perigoso ao meio ambiente

Fonte: Adaptado de IBAMA (2001b)

4.2 Agrotóxicos em recursos hídricos

A expansão das áreas agrícolas e a intensificação da utilização de agrotóxicos nessas áreas propiciam a ocorrência de resíduos de agrotóxicos nos mananciais aquáticos superficiais e subterrâneos que estão constantemente expostos a receber esses contaminantes. Esses compostos podem atingir os recursos hídricos por processos de drenagem, percolação, escoamento superficial e subsuperficial, erosão, deriva e volatilização (SILVA et al., 2009).

Vários estudos relataram a ocorrência de resíduos desses contaminantes em águas superficiais e subterrâneas no mundo, principalmente em áreas agrícolas, que podem comprometer a qualidade das águas e trazer prejuízos aos organismos presentes nesses ambientes impactados (GRÜTZMACHER et al., 2008; MARSALA et al. 2020; BECKER et al., 2021). No Quadro 2 estão compiladas informações sobre agrotóxicos detectados em diferentes matrizes ambientais aquáticas do mundo.

Quadro 2 – Ocorrência de agrotóxicos em recursos hídricos de diferentes países

Agrotóxico	Classe agrônômica	Matriz ambiental	País	Referência
Atrazina	Herbicida	Água superficial	Brasil e Paraguai	Becker et al. (2021)
			Espanha	Rodriguez-Mozaz, Alda, Barceló (2004)
Carbofuran	Inseticida	Água superficial	Brasil	Grützmacher et al. (2008)
		Água subterrânea	Coreia	Lee et al. (2019)
Clomazone	Herbicida	Água superficial	Brasil	Grützmacher et al. (2008)
Clorpirifós	Inseticida	Água superficial e água de consumo humano	Vietnã	Wan et al. (2021)
Fipronil	Inseticida	Água superficial	Brasil	Grützmacher et al. (2008)
			Vietnã	Wan et al. (2021)
Glifosato	Herbicida	Água superficial	Brasil	Mattos et al. (2002)
Isoprocarb	Inseticida	Água superficial	China	Chen et al. (2021)
Propiconazole	Fungicida	Água superficial	Malásia	Elfikrie et al. (2020)
Simazina	Herbicida	Água superficial	China	Chen et al. (2021)
			Japão	Tanabe et al. (2000)
Trimetacarbe	Inseticida	Água subterrânea	Itália	Marsala et al. (2020)

Fonte: Elaborado pelos autores.

De acordo com estudo realizado em área agrícola por Martini et al. (2012), o herbicida glifosato e o inseticida carbofuran apresentam alto potencial de transporte por escoamento superficial apresentando risco de contaminação das águas superficiais. No que se refere ao risco de contaminação de águas subterrâneas, o herbicida que apresenta potencial contaminador é o glifosato e o inseticida carbofuran (MARTINI et al., 2012).

Destarte, todos os registros da presença de resíduos de agrotóxicos em recursos hídricos estão associados ao elevado nível de industrialização, a necessidade do aumento da produção de alimentos concomitante com a alta densidade populacional, que geralmente se distribuem em regiões geográficas adjacentes as partes mais baixas dos cursos d'água (ZAGATTO; BERTOLETTI, 2008).

4.3 Ecotoxicologia e organismos bioindicadores de agrotóxicos

A ecotoxicologia é uma ciência que estuda os efeitos tóxicos de compostos naturais ou sintéticos em seres vivos incluindo todas as comunidades e populações aquáticas e terrestres, assim como a interação dessas substâncias tóxicas com o meio (TRUHAUT, 1977). A toxicidade de um agrotóxico (ingredientes ativos das formulações) baseia-se na sua capacidade de intoxicar determinadas espécies ou conjunto de espécies que causam prejuízos às culturas agrícolas no campo ou aos produtos colhidos. No entanto, essas substâncias podem apresentar toxicidade para organismos não alvos de controle (MACHADO et al., 2013).

As avaliações ecotoxicológicas de substâncias químicas podem ser realizadas por meio de ensaios laboratoriais ou de campo utilizando várias espécies aquáticas e terrestres. No caso das espécies aquáticas, os organismos mais utilizados são algas, microcrustáceos e peixes (MANSANO; MOREIRA; ROCHA, 2013; CRUZ et al., 2016; AMÉRICO-PINHEIRO et al., 2020; STENSTRÖM; KREUGER; GOEDKOOP, 2021).

Esses organismos aquáticos utilizados em ensaios ecotoxicológicos são considerados bioindicadores de contaminação ambiental por agrotóxicos. De acordo com Arias et al. (2007), o uso de bioindicadores abrangendo diferentes níveis tróficos permite identificar sobre qual nível o contaminante interage com os organismos, e qual destes níveis e espécies são mais sensíveis à ação do composto tóxico.

A espécie mais utilizada como bioindicador e em ensaios ecotoxicológicos para avaliação da qualidade da água é o *Danio rerio*, um peixe popularmente conhecido como peixe zebra, bandeirinha ou paulistinha. Suas características tornam este peixe um modelo seguro na pesquisa, por ser uma espécie pequena facilmente mantida e distribuída nos aquários e possuir alta taxa de fecundidade (HILL et al., 2005).

O *D. rerio* é um vertebrado cada vez mais usado na pesquisa biomédica, incluindo estudos de neurotoxicologia, uma vez que esta espécie animal exibe o sistema nervoso semelhante ao dos seres humanos, bem como sistemas de neurotransmissores semelhantes (HORZMANN; FREEMAN, 2016).

Segundo Faria et al. (2021), concentrações do herbicida glifosato presentes em muitos ecossistemas aquáticos podem prejudicar a sobrevivência dos peixes. Os autores citados constaram que concentrações ambientalmente relevantes do herbicida tem efeito neurotóxico no peixe *D. rerio* (FARIA et al., 2021).

Alguns inseticidas, como carbamatos e organofosforados, são conhecidos por interromper a função neuromuscular de vários organismos isto é, atuam como agentes anticolinesterásicos (CASIDA; BRYANT, 2017). As colinesterases são um grupo de enzimas responsáveis pela hidrólise de ésteres carboxílicos e de colina. Essas enzimas possuem sensibilidade a uma série de produtos químicos. Sua principal e mais importante função é a atuação com neurotransmissor (PERES; MOREIRA 2003).

Severo et al. (2020) constaram que o uso de agrotóxicos pode atingir o ambientes aquáticos próximos a áreas rurais e causar efeitos negativos como redução da taxa de eclosão de ovos, alterações na frequência cardíaca e nos níveis da enzima acetilcolinesterase (AChE) em peixes como *D. rerio*. A AChE e a butirilcolinesterase (BChE) são os dois tipos de enzimas existentes nos peixes. Teoricamente, o glifosato não atua como um composto anticolinesterásico, no entanto, há relatos da inibição da AChE em peixes expostos ao herbicida (MOURA et al., 2017; SANCHEZ et al., 2017; TEIXEIRA et al., 2018).

Quando ocorre o bloqueio da enzima AChE ocorre um acúmulo de estímulos nervosos, e leva a uma hiperestimulação colinérgica, o que pode ocasionar a morte do organismo (CALDAS, 2000). A ocorrência da inibição da colinesterase em vertebrados pode ocasionar convulsões, inconsciência e insuficiência respiratória, ocasionando a morte do indivíduo. No caso de invertebrados, há uma hiperexcitação que leva a morte por exaustão do organismo (ČOLOVIĆ et al., 2013; CASIDA; DURKIN, 2013). Por este motivo, as colinesterases como AChE e BChE são comumente utilizadas como biomarcadores em peixes a fim de se determinar sua exposição a agrotóxicos.

Além do *D. rerio*, várias espécies de peixes são muito utilizadas em ensaios ecotoxicológicos com agrotóxicos como *Hyphessobrycon eques*, *Phallocerus caudimaculatus*, *Piaractus mesopotamicus* (CRUZ et al., 2015), *Cyprinus carpio* (CLASEN et al., 2018; NUNES et al., 2018), *Oncorhynchus mykiss* (MCCUAIG; MARTYNIUK; MARLATT, 2020) e *Oreochromis niloticus* (AMÉRICO-PINHEIRO et al., 2020). No quadro 3 são apresentadas espécies de peixes utilizadas em ensaios ecotoxicológicos com agrotóxicos e os principais efeitos observados após exposição ao contaminante.

Quando 3 – Espécies de peixes utilizadas em ensaios ecotoxicológicos com agrotóxicos e os efeitos observados

Ingrediente ativo do agrotóxico	Espécie bioindicador	Efeitos ecotoxicológicos	Referência
Carbosulfan (inseticida)	Truta arco-íris (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	Concentrações subletais causam necrose no fígado e rim	Capkin et al. (2010)
Glifosato (herbicida)	Surubim híbrido (<i>Pseudoplatystoma sp</i>)	Diminuição das atividades antioxidantes e nos níveis de ácido ascórbico no fígado e cérebro dos peixes	Sinhorin et al. (2014)
Atrazina (herbicida)	<i>Pacu</i> (<i>Piaractus mesopotamicus</i>)	Efeitos subcrônicos com alterações nas brânquias, fígado e na enzima acetilcolinestarese no cérebro	Santos et al. (2015)
Mistura de Cipermetrina e Clorpirifós (inseticidas)	Paulistinha (<i>Danio rerio</i>) e Carpa (<i>Cyprinus carpio</i>)	Efeitos agudos como aumento nos níveis de ácido ascórbico e diminuição na atividade da catalase	Nunes et al. (2018)
Imidacloprid (Inseticida)	Tilápia (<i>Oreochromis niloticus</i>)	Concentrações subletais do inseticida alteram parâmetros hematológicos (leucograma, eritrócitos, proteínas plasmáticas e trombócitos)	Américo-Pinheiro et al. (2019)
Carbofuran (inseticida)	Tilápia (<i>Oreochromis niloticus</i>)	Concentrações subletais causam alterações na estrutura das brânquias, necrose no fígado e rim	Américo-Pinheiro et al. (2020)

Fonte: Elaborado pelos autores.

Embora haja relativamente poucas informações disponíveis sobre os efeitos desses contaminantes em nível ecológico, principalmente em concentrações subletais e suas interações em um cenário de exposição múltipla contínua, as espécies de peixes são bioindicadores promissores para entender o destino ambiental e a dinâmica dos agrotóxicos em ambientes aquáticos (PÉREZ-PARADA et al., 2018).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ocorrência de agrotóxicos em matrizes ambientais aquáticas de vários países evidencia o uso constante e inadequado dessas substâncias nas áreas agrícolas e urbanas. Essa problemática apresenta grandes desafios que envolvem a busca de medidas preventivas e/ou de recuperação dos possíveis impactos ao ambiente, aos organismos não alvos e aos seres humanos que estão expostos à contaminação por agrotóxicos.

A utilização de organismos bioindicadores de contaminação por agrotóxicos é essencial para identificar os efeitos dessas substâncias no ambiente e a sensibilidade entre as espécies e os diferentes níveis tróficos aquáticos. Os peixes constituem um excelente grupo de bioindicadores utilizados mundialmente, entre eles, o paulistinha (*D. rerio*) é o que se destaca nos estudos ecotoxicológicos.

Os efeitos ecotoxicológicos observados com maior frequência nos estudos com peixes incluem letalidade, neurotoxicidade, alterações enzimáticas, bioquímicas, hematológicas e histológicas. Esses efeitos podem comprometer a sobrevivência e a saúde desses vertebrados interferindo no equilíbrio dos ambientes aquáticos e possível impacto na saúde humana por meio do consumo de peixe e água contaminada com resíduos de agrotóxicos.

REFERÊNCIAS

- AMÉRICO, J. H. P. et al. O uso de agrotóxicos e os impactos nos ecossistemas aquáticos. **ANAP Brasil**, Tupã, v. 8, n. 3, p. 101-115, 2015. DOI 10.17271/1984324081320151149
- AMÉRICO-PINHEIRO et al. Sublethal effects of imidacloprid in hematological parameters of tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 230, 193, 2019. DOI 10.1007/s11270-019-4256-0
- AMÉRICO-PINHEIRO et al. Histological changes in targeted organs of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) exposed to sublethal concentrations of the pesticide carbofuran. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 231, 228, 2020. DOI 10.1007/s11270-020-04628-5
- 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. DOI 10.1590/S1413-81232007000100011
- BECKER, R. W. et al. Pesticides in surface water from Brazil and Paraguay cross-border region: Screening using LC-QTOF MS and correlation with land use and occupation through multivariate analysis. **Microchemical Journal**, v. 168, 106502, 2021. DOI 10.1016/j.microc.2021.106502
- BRASIL. **Lei nº 7.802**, de 11 de julho de 1989. Lei dos agrotóxicos. Diário Oficial da União, Brasília, DF - Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7802.htm. Acesso em: 25 jun.2021.
- BRASIL. **Decreto nº 4.074, de 04 de janeiro de 2002. Regulamenta a lei nº 7.802 de 1989**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4074.htm. Acesso em: 25 jun.2021.
- CALDAS, L. Q. A. **Intoxicações exógenas agudas por carbamatos, organofosforados, compostos biperidílicos e piretróides**. 1.ed. Niterói: Centro de controle de intoxicações de Niterói, 2000.
- CAPKIN, E. et al. Effects of some pesticides on the vital organs of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). **Tissue & Cell**, v. 42, p. 376–382, 2010.
- CASIDA, J. E., BRYANT, R. J. The ABCs of pesticide toxicology: amounts, biology, and chemistry. **Toxicology Research**, v. 6, n.6, p. 755–763, 2017. DOI 10.1039/c7tx00198c
- CASIDA, J. E.; DURKIN, K. A. Neuroactive insecticides: targets, selectivity, resistance, and secondary effects. **Annual Reviews**, v. 58, p. 99–117, 2013. DOI 10.1146/annurev-ento-120811-153645

- CHEN et al. The profiling of elements and pesticides in surface water in Nanjing, China with global comparisons. **Science of The Total Environment**, v. 774, 145749, 2021. DOI 10.1016/j.scitotenv.2021.145749
- CLASEN, B. et al. Bioaccumulation and oxidative stress caused by pesticides in *Cyprinus carpio* reared in a rice-fish system. **Science Of The Total Environment**, v. 626, p. 737-743, 2018. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.01.154.
- ČOLOVIĆ, M. B. et al. Acetylcholinesterase Inhibitors: Pharmacology and Toxicology. **Current Neuropharmacology**, v. 11, p. 315-335, 2013.
- CRUZ, C. et al. Imazapyr herbicide efficacy on floating macrophyte control and ecotoxicology for non-target organisms. **Planta Daninha**, v. 33, n. 1, p. 103-108, 2015.
- CRUZ, C. et al. Sensitivity, ecotoxicity and histopathological effects on neotropical fish exposed to glyphosate alone and associated to surfactant. **Journal Environmental Chemistry Ecotoxicology**, v. 8, n. 3, p. 25-33, 2016.
- ELFIKRIE, N. et al., Occurrence of pesticides in surface water, pesticides removal efficiency in drinking water treatment plant and potential health risk to consumers in Tengri River Basin, Malaysia. **Science of The Total Environment**, v. 712, 136540, 2020. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.136540
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Perdas de agrotóxicos**. Brasília: Embrapa, 2021. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agricultura_e_meio_ambiente/arvore/CONTAG01_39_21020079214.html. Acesso em: 28 jul. 2021.
- FARIA, M. et al. Glyphosate targets fish monoaminergic systems leading to oxidative stress and anxiety. **Environment International**, v. 146, p. 106253-106263, 2021. DOI 10.1016/j.envint.2020.106253.
- FIKES, J. D. Organophosphorus and carbamate insecticides. **Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice**, v. 20, n. 2, p. 353-367, 1990.
- FLORES, A. V. et al.. Organoclorados: um problema de saúde pública. **Ambiente & Sociedade**, v. 7, n. 2, p. 111-124, 2004.
- GRÜTZMACHER, D. D. et al. Monitoramento de agrotóxicos em dois mananciais hídricos no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.6, p. 632-637, 2008.
- HILL, A. et al. Zebrafish as a model vertebrate for Investigating Chemical Toxicity. **Toxicological Sciences**, v. 86, p. 6-19, 2005.
- HORZMANN, K.A.; FREEMAN, J.L. Zebrafish get connected: investigating neurotransmission targets and alterations in chemical toxicity. **Toxics**, v. 4, n. 3, p. 19, 2016.
- HOU, X. et al. Ascorbic acid induced atrazine degradation. **Journal Hazardous Materials**. v. 327, n. 5, p. 71-78, 2017.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS (IBAMA). 2021a. **Relatórios de comercialização de agrotóxicos**. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>. Acesso em: 28 jul. 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS (IBAMA). 2021b. **Avaliação do Potencial de Periculosidade Ambiental (PPA) de Agrotóxicos e Afins**. Disponível em: <http://ibama.gov.br/avaliacao-e-destinacao/quimicos-e-biologicos/registro-especial-temporario-de-agrotoxicos-e-afins-ret/182-quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/1156-ppa#classificacaoibama>. Acesso em: 28 jul. 2021.
- KALANTARY, R. R.; BARZEGAR, G.; JORFI, S. Monitoring of pesticides in surface water, pesticides removal efficiency in drinking water treatment plant and potential health risk to consumers using Monte Carlo simulation in Behbahan City, Iran. **Chemosphere**, v, 286, e131667, p. 1-12, 2022.
- KIM, K. H., KABIR, E., JAHAN, S .A. Exposure to pesticides and the associated human health effects. **Science of The Total Environment**, v. 575, p. 525–535, 2017. DOI 10.1016/j.scitotenv.2016.09.009.
- LEE, H-J et al. Occurrence and distribution of pharmaceutical and personal care products, artificial sweeteners, and pesticides in groundwater from an agricultural area in Korea. **Science of The Total Environment**, v. 659, p. 168-176, 2019. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.12.258

- MACHADO, A. A. et al. Toxicologia dos agrotóxicos e segurança do trabalho. In: Busoli et al. (org.). **Tópicos em Entomologia Agrícola – VI**. 1.ed. Jaboticabal: UNESP, 2013, p. 311-327.
- MANSANO, A. S.; MOREIRA, R. A.; ROCHA, O. Toxicidade aguda do agrotóxico carbofuran ao cladóceros *Ceriodaphnia silvestrii daday*. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v.9, n.11, p.91- 103, 2013.
- MARSALA, R. Z. et al. First evaluation of pesticides occurrence in groundwater of Tidone Valley, an area with intensive viticulture. **Science of The Total Environment**, v. 736, 139730, 2020. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.139730
- MARTINI, L. F. D. et al. Risco de contaminação das águas de superfície e subterrâneas por agrotóxicos recomendados para a cultura do arroz irrigado. **Ciência Rural**, v.42, n.10, p.1715-1721, 2012.
- MATTOS, M. L. T. et al. Monitoramento ambiental do glifosato e do seu metabólito (ácido aminometilfosfônico) na água de lavoura de arroz irrigado. **Pesticidas**, v. 12, p. 145-154, 2002.
- MCCUAIG, L. M.; MARTYNIUK, C. J.; MARLATT, V. L. Morphometric and proteomic responses of early-life stage rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) to the aquatic herbicide diquat dibromide. **Aquatic Toxicology**, v. 222, p. 105446, 2020. DOI 10.1016/j.aquatox.2020.105446.
- MOREIRA, J. C. et al. Avaliação integrada do impacto do uso de agrotóxicos sobre a saúde humana em uma comunidade agrícola de Nova Friburgo, RJ. **Ciência e Saúde Coletiva**, v. 7, n. 2, p. 299-311, 2002. DOI 0.1590/S1413-81232002000200010
- MOSTAFALOU, S., ABDOLLAHI, M. Pesticides: an update of human exposure and toxicity. **Archives of Toxicology**, v. 91, p. 549–599, 2017.
- MOURA, F. R. et al. 2017. Oxidative stress in the hybrid fish jundiara (*Leiarius marmoratus x Pseudoplatystoma reticulatum*) exposed to Roundup Original (R). **Chemosphere**, 185, 445–451, 2017. DOI 10.1016/j.chemosphere.2017.07.030.
- NANDAN, S. B.; NIMILA, P. J. Lindane toxicity: histopathological, behavioural and biochemical changes in *Etroplus maculatus* (Bloch, 1795). **Marine Environmental Research**, v. 76, p.63–70, 2012.
- NUNES, G. S.; RIBEIRO, M. L. Pesticidas: Uso, Legislação e Controle. **Pesticidas**, v.9, p.31-44, 1999.
- NUNES, M. E. M. et al. Oxidative effects of the acute exposure to a pesticide mixture of cypermethrin and chlorpyrifos on carp and zebrafish – A comparative study. **Comparative Biochemistry And Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology**, v. 206-207, p. 48-53, 2018. DOI 10.1016/j.cbpc.2018.03.002.
- PERES, F.; MOREIRA, J. C. **É veneno ou é remédio? Agrotóxicos, saúde e ambiente**. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2003.
- PERES-PARADA, A. et al. Recent advances and open questions around pesticide dynamics and effects on freshwater fishes. **Current Opinion in Environmental Science & Health**. v. 4, p. 38-44, 2018. DOI 10.1016/j.coesh.2018.08.004
- RIBAS, P. P.; MATSUMURA, A. T. S. A química dos agrotóxicos: impacto sobre a saúde e meio ambiente. **Revista Liberato**, v.10, n.14, p. 149-158, 2009.
- RODEA-PALOMARES, I. et al. Effect of PFOA/PFOS pre-exposure on the toxicity of the herbicides 2,4-D, Atrazine, Diuron and Paraquat to a model aquatic photosynthetic microorganism. **Chemosphere**, v.139, p. 65-72, 2015.
- RODRIGUEZ-MOZAZ, S.; ALDA, M. J. L.; BARCELÓ, D. Monitoring of estrogens, pesticides and bisphenol A in natural Waters and drinking water treatment plants by solid-phase extraction-liquid chromatography-mass spectrometry. **Journal of Chromatography A**, v. 1045, p. 85-92, 2004.
- SÁNCHEZ, J. A. A. et al. Effects of Roundup formulations on biochemical biomarkers and male sperm quality of the livebearing *Jenynsia multidentata*. **Chemosphere**, v. 177, p. 200-210, 2017.
- SANTOS, E. A. et al. Atrazine levels in the Jaboticabal water stream (São Paulo State, Brazil) and its toxicological effects on the pacu fish *Piaractus mesopotamicus*. **Archives Industrial Hygiene and Toxicology**. v. 666, p. 73-82, 2015.
- SEVERO, E. S. et al. Ecological risk of pesticide contamination in a Brazilian river located near a rural area: a study of biomarkers using zebrafish embryos. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 190, p. 110071-110080, 2020. DOI 10.1016/j.ecoenv.2019.110071.

- SILVA, D. R. O. et al. Monitoramento de agrotóxicos em águas superficiais de regiões orizícolas no Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v.39, n.9, p.2383-2389, 2009.
- SILVA, D. R. O. et al. Ocorrência de agrotóxicos em águas subterrâneas de áreas adjacentes a lavouras de arroz irrigado. **Química Nova**, v. 34, n. 5, p. 748-752, 2011. DOI: 10.1590/S0100-40422011000500004
- SINHORIN, V. D. G et al. Effects of the acute exposition to glyphosate-based herbicide on oxidative stress parameters and antioxidant responses in a hybrid Amazon fish surubim (*Pseudoplatystoma sp*). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 106, p. 181-187, 2014. DOI 10.1016/j.ecoenv.2014.04.040
- SPADOTTO, C. A. et al. **Monitoramento de risco ambiental de Agrotóxicos: princípios e recomendações**. Documentos 42. Jaguariúna: EMBRAPA:CNPMA, 29p., 2004
- SPENCER, C. L. et al. Actions of pyrethroid insecticides on sodium currents, action potentials, and contractile rhythm in isolated mammalian ventricular myocytes and perfused hearts. **The Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics**, v. 298, n.3, p.1067-1082, 2001.
- STENSTRÖM, J. R.; KREUGER, J.; GOEDKOOP, W. Pesticide mixture toxicity to algae in agricultural streams – Field observations and laboratory studies with in situ samples and reconstituted water. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. v. 215, 112153, 2021. DOI 10.1016/j.ecoenv.2021.112153
- TANABE, A. et al. New monitoring system for ninety pesticides and related compounds in river water by solid-phase extraction with determination by gas chromatography/mass spectrometry. **Journal of AOAC International**, v. 83, n. 1, p. 61-77, 2000. DOI 10.1093/jaoac/83.1.61
- TANG, Z. et al. Organochlorine pesticides in the lower reaches of Yangtze River: Occurrence, ecological risk and temporal trends. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.87, p. 89-97, 2013.
- TEIXEIRA, J. M. et al. Acute toxicity and effects of Roundup Original® on pintado da Amazônia. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 25, p. 25383-25389, 2018.
- TOMIZAWA, M.; CASIDA, J. E. Selective Toxicity of Neonicotinoids Attributable to Specificity of Insect and Mammalian Nicotinic Receptors. **Annual Review of Entomology**, v.48, p. 339-364, 2003.
- TRUHAUT, R. Ecotoxicology: Objectives, Principles and Perspectives. **Ecotoxicology Environmental Safety**, v. 1, n.2 p.151-173, 1977.
- WAN, Y. et al. Neonicotinoids, fipronil, chlorpyrifos, carbendazim, chlorotriazines, chlorophenoxy herbicides, bentazon, and selected pesticide transformation products in surface water and drinking water from northern Vietnam. **Science of The Total Environment**, v.750, 141507, 2021. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.141507
- WASHINGTON, H. G. Diversity, biotic and similarity indices. A review with special relevance to aquatic ecosystems. **Water Research**, v. 18, p.653-694, 1984.
- ZAGATTO, P. A; BERTOLETTI, E. **Ecotoxicologia aquática: princípios e aplicações**. 2a ed. São Carlos: Rima, 2008. 472p.