UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Desenvolvimento

GABRIELA ELOÍSA DE OLIVEIRA POZETI

ANÁLISE DAS POSSIBILIDADES E DESAFIOS DO USO DE REATOR SOLAR PARA REMOVER PESTICIDAS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

TUPÃ
2025

GABRIELA ELOÍSA DE OLIVEIRA POZETI

ANÁLISE DAS POSSIBILIDADES E DESAFIOS DO USO DE REATOR SOLAR PARA REMOVER PESTICIDAS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Desenvolvimento da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus de Tupã, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área Agronegócio e Desenvolvimento.

Área de Concentração: Agronegócio e Desenvolvimento

Linha de pesquisa: Desenvolvimento e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Drª. Juliane Cristina Forti

Coorientadores: Prof. Dr. Eduardo Festozo Vicente
Prof. Drª. Angela Vacaro de Souza

TUPÃ
2025

Ficha catalográfica elaborada pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação da FCE – Unesp, Câmpus Tupã:

P893a

Pozeti, Gabriela Eloísa de Oliveira.
Análise das possibilidades e desafios do uso de reator solar para remover pesticidas em estações de tratamento de água. / Gabriela Eloísa de Oliveira Pozeti. – Tupã: [s.n.], 2025.
62 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Agronegócio e Desenvolvimento) – Universidade Estadual Paulista UNESP – Faculdade de Ciências e Engenharia, 2025.
Orientadora: Juliane Cristina Forti
Coorientador: Eduardo Festozo Vicente
Coorientadora: Angela Vacaro de Souza

1. Foto-Fenton. 2. Pesticidas. 3. Processos oxidativos avançados. 4. Reator solar CPC. 5. Tratamento de água. I. Título. II. Autor.

Fonte: Eliana Kátia Pupim, bibliotecária CRB 8 – 6202. Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto potencial desta pesquisa

Esta pesquisa contribui não apenas para o avanço científico no campo do saneamento ambiental, mas também para a promoção da saúde pública e do desenvolvimento sustentável, alinhando-se aos princípios da Agenda 2030 da ONU, particularmente ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (Água limpa e saneamento). A pesquisa estimula a busca por soluções inovadoras e eficazes para a gestão de recursos hídricos, essenciais para a construção de um futuro mais saudável e próspero.

Potential impact of this research

This research contributes not only to scientific advancement in the field of environmental sanitation, but also to the promotion of public health and sustainable development, aligning with the principles of the UN 2030 Agenda, particularly Sustainable Development Goal 6 (Clean and clean water sanitation). The research stimulates the search for innovative and effective solutions for the management of water resources, essential for building a healthier and more prosperous future.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Tupã

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANÁLISE DAS POSSIBILIDADES E DESAFIOS DO USO DE REATOR SOLAR PARA REMOVER PESTICIDAS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

AUTORA: GABRIELA ELOISA DE OLIVEIRA POZETI
ORIENTADORA: JULIANE CRISTINA FORTI
COORIENTADOR: EDUARDO FESTOZO VICENTE
COORIENTADORA: ANGELA VACARO DE SOUZA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciências, pela Comissão Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
JULIANE CRISTINA FORTI
Data: 31/03/2025 10:17:55-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. JULIANE CRISTINA FORTI (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP - Tupã/SP

gov.br Documento assinado digitalmente
JOSE APARECIDO DOS SANTOS
Data: 28/03/2025 11:57:41-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. JOSÉ APARECIDO DOS SANTOS (Participaçao Virtual)
Docente do Curso de Ciências Contábeis / Centro Universitário de Adamantina - UNIFAI - Adamantina/SP

gov.br Documento assinado digitalmente
ANGELICA GOIS MORALES
Data: 28/03/2025 18:50:47-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. ANGELICA GOIS MORALES (Participaçao Virtual)
Departamento de Gestão, Desenvolvimento e Tecnologia / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã - FCE - UNESP - Tupã/SP

Tupã, 28 de março de 2025

Aos meus filhos Helena e Pedro, vocês são a minha luz e a minha força.
Obrigada por existirem.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado a oportunidade e a força durante todo o percurso acadêmico.

Agradeço ao meu amigo de infância o Prof. Me. Rafael Teixeira Sebastiani, que me apresentou o mestrado e me incentivou a enfrentar essa jornada.

Agradeço ao meu marido Marcos Vinicius de Oliveira e aos meus filhos Helena e Pedro, que foram meu suporte, minha força e minha paz durante os momentos difíceis. Sem o apoio de vocês nada disso seria possível.

Aos meus familiares e amigos do trabalho que direta ou indiretamente contribuíram para que esse sonho fosse possível.

Em especial agradeço à minha orientadora Profª. Drª. Juliane Cristina Forti, pela paciência, confiança e tranquilidade depositadas em mim durante as dificuldades nesses anos, meu muito obrigada.

Agradeço a todos os professores e colaboradores do PGAD pelo apoio e apontamentos feitos durante o percurso.

Aos meus novos amigos que o mestrado me proporcionou, obrigada por tornar essa caminhada mais feliz. Não teria sentido sem vocês para compartilhar os momentos de angústias e também os momentos de muitas risadas.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que o caminho ficasse mais leve, meu muito obrigada.

“A educação é a chave para a liberdade”.
(Angela Davis)

POZETI, G. E. O. **Análise das possibilidades e desafios do uso de reator solar para remover pesticidas em estações de tratamento de água.** 2025. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Desenvolvimento – Faculdade de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Tupã, 2025.

RESUMO

Com o aumento dos impactos associados às atividades agrícolas, os pesticidas emergem como significativos contaminantes ambientais, representando desafios prementes de saúde pública. Sua presença tem implicações diretas na qualidade das águas superficiais e subterrâneas, frequentemente contaminadas por processos como lixiviação, pulverização aérea e desmatamento das margens dos corpos hídricos. Este estudo teve como objetivo apresentar a eficácia dos processos oxidativos avançados utilizando reatores do tipo CPC para remoção de pesticidas nas estações de tratamento de água. A implementação de reatores solares do tipo CPC (Coletor Parabólico Composto) constitui uma solução inovadora, aproveitando a energia solar para catalisar reações químicas, promovendo a degradação de pesticidas com eficiência e sustentabilidade. A relevância deste trabalho transcende o campo científico, contribuindo para a promoção da saúde pública e o desenvolvimento sustentável, em consonância com a Agenda 2030 da ONU, particularmente com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável de número 6, que visa assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos. A pesquisa destaca os benefícios de integrar inovações tecnológicas no tratamento de água, promovendo práticas mais sustentáveis e ecologicamente corretas no manejo de recursos hídricos. Este estudo tem como base uma extensa revisão da literatura, a qual fundamenta a análise das possibilidades e desafios do uso de reatores solares do tipo CPC para a remoção de pesticidas em estações de tratamento de água. Tal abordagem permite compreender, de maneira aprofundada, os aspectos tecnológicos, ambientais e metodológicos envolvidos, além de subsidiar a discussão dos resultados apresentados posteriormente. Os resultados obtidos indicam que a aplicação de reatores solares do tipo CPC em estações de tratamento de água pode ser uma alternativa viável para mitigar a contaminação por pesticidas, contribuindo significativamente para a segurança hídrica e a qualidade ambiental. Com desafios metodológicos e de aplicabilidade que devem ser cuidadosamente considerados e abordados para maximizar seu impacto e relevância, este estudo reforça a importância de continuar investindo em soluções inovadoras e eficazes para o gerenciamento de recursos hídricos, essenciais para um futuro mais saudável e próspero.

Palavras-chave: Foto-Fenton. Pesticidas. Processos oxidativos avançados. Reator solar CPC. Tratamento de água.

POZETI, G. E. O. **Analysis of the possibilities and challenges of using solar reactors to remove pesticides in water treatment plants.** 2025. Dissertation (Master in Development Agribusiness) – São Paulo State University (UNESP), School of Sciences and Engineering, Tupã, 2025.

ABSTRACT

With the increasing impacts associated with agricultural activities, pesticides are emerging as significant environmental contaminants, representing pressing public health challenges. Their presence has direct implications for the quality of surface and groundwater, which are often contaminated by processes such as leaching, aerial spraying, and deforestation along the banks of water bodies. This study aimed to present the effectiveness of advanced oxidation processes using CPC-type reactors for the removal of pesticides in water treatment plants. The implementation of CPC (Compound Parabolic Trough Collector) solar reactors constitutes an innovative solution, harnessing solar energy to catalyze chemical reactions, promoting the degradation of pesticides efficiently and sustainably. The relevance of this work transcends the scientific field, contributing to the promotion of public health and sustainable development, in line with the UN 2030 Agenda, particularly with Sustainable Development Goal number 6, which aims to ensure the availability and sustainable management of water and sanitation for all. The research highlights the benefits of integrating technological innovations in water treatment, promoting more sustainable and environmentally friendly practices in water resource management. This study is based on an extensive literature review, which supports the analysis of the possibilities and challenges of using CPC solar reactors for pesticide removal in water treatment plants. This approach allows for an in-depth understanding of the technological, environmental and methodological aspects involved, in addition to supporting the discussion of the results presented later. The results obtained indicate that the application of CPC solar reactors in water treatment plants can be a viable alternative to mitigate pesticide contamination, contributing significantly to water security and environmental quality. With methodological and applicability challenges that must be carefully considered and addressed to maximize their impact and relevance, this study reinforces the importance of continuing to invest in innovative and effective solutions for water resource management, essential for a healthier and more prosperous future.

Keywords: Pesticides. CPC solar reactor. Water treatment. Advanced oxidation processes. Photo-Fenton.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAPS – Agrotóxicos Altamente Perigosos

AMPA – Ácido aminometilfosfônico

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

CPC – Coletores do tipo parabólico composto

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

ETA – Estação de Tratamento de Água

FAO – Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação

IARC – Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer

LMR – Limite Máximo de Resíduos

MS – Ministério da Saúde

ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

OMS – Organização Mundial da Saúde

POA – Processos Oxidativos Avançados

UE – União Europeia

ODS – Objetivos...

LISTA DE FIGURA

Figura 1 – Fórmula estrutural do glifosato (*N*-(fosfonometil)glicina) 27

Figura 2 – Fórmula estrutural do AMPA (ácido aminometilfosfônico) 29

Figura 3 – Esquema de um sistema de abastecimento de água 32

Figura 4 – (3a) Coletor não concentrador, (3b) coletor concentrador parabólico, (3c) coletor parabólico composto 40

Figura 5 – Representação em perfil mostrando o formato de involuta dos refletores de um reator CPC e as diversas formas de captação de radiação incidente 41

Figura 6 – Representação esquemática de um reator CPC 42

Figura 7 – Modelo de reator solar do tipo CPC instalado na Unesp de Tupã 43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

2 OBJETIVO GERAL 15

2.1 Objetivos específicos 15

3 REFERENCIAL TEÓRICO 16

3.1 Água e pesticidas 18

3.2 O emprego dos pesticidas e seus impactos 22

3.3 O herbicida glifosato 26

3.4 Tratamentos convencionais da água 30

3.5 Processos Oxidativos Avançados (POAs) 35

3.5.1 Ozonização (O_3) 36

3.5.2 Fotocatálise heterogênea TiO_2/UV 37

3.5.3 Processos baseados nas reações de Fenton 38

3.5.4 Reator Solar ou fotoquímico 40

4 METODOLOGIA 45

5 DISCUSSÃO 46

6 CONCLUSÃO 53

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial para a vida humana e para o desenvolvimento socioeconômico. No entanto, a crescente demanda por água potável, aliada à intensificação da poluição dos recursos hídricos, torna cada vez mais desafiador garantir o fornecimento de água de qualidade para a população.

Nesse contexto, os métodos tradicionais de tratamento de água podem apresentar algumas limitações, como geração de grande volume de lodo e ineficiência na remoção de contaminantes emergentes (Igual, 2020; Nacano, 2023).

Diante desses desafios, os processos não convencionais para o tratamento da água surgem como alternativas promissoras para superar as limitações dos métodos tradicionais e garantir a qualidade da água potável de forma mais eficiente e sustentável.

O aumento da presença de contaminantes emergentes na água, com destaque para o herbicida glifosato, exige o desenvolvimento de novas tecnologias de tratamento capazes de removê-los de forma eficaz. Os processos não convencionais podem oferecer soluções ambientalmente amigáveis em comparação aos métodos tradicionais, reduzindo o consumo de energia, a geração de lodo e o uso de produtos químicos (Cunha, 2023).

As novas tecnologias podem otimizar o processo de tratamento de água, diminuindo custos e aumentando a disponibilidade de água potável para a população, ao passo que a aplicação de processos inovadores pode contribuir para a segurança e confiabilidade do abastecimento público de água, garantindo a qualidade da água para o consumo humano (Machado, 2023).

Entre as tecnologias inovadoras, esta pesquisa expõe a eficácia do reator solar do tipo CPC (Coletor Parabólico Composto) associado ao reagente de Fenton para remoção de pesticidas em estações de tratamento de água.

A viabilidade do processo oxidativo via reator solar como tratamento terciário nas estações de tratamento de água para abastecimento público é promissora e estudos realizados por Cheng (2023); Gutiérrez-Capell (2020); Esteban García (2021) apresentam diversos benefícios em termos de eficiência, sustentabilidade e impacto ambiental positivo.

Com o avanço da tecnologia e a otimização dos processos, o reator solar do tipo CPC associado aos processos oxidativos tem potencial para se tornar uma solução cada vez mais viável e amplamente adotada no tratamento da água para abastecimento público, devido a sua eficácia em comparação com técnicas tradicionais de degradação de contaminantes, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos e a promoção da saúde pública.

Não obstante ao exposto, existem muitos desafios na adoção desses processos como um tratamento terciário nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) ou Estações de Tratamento de Água (ETAs), que devem ser analisados individualmente antes de qualquer tomada de decisão. Sendo assim, questiona-se: a utilização do reator solar do tipo CPC é eficaz para ser aplicado ao tratamento da água da rede de abastecimento, no que se refere principalmente, na remoção de pesticidas. Como solução a esse cenário, esta pesquisa apresenta uma análise da eficácia do reator solar do tipo CPC como um tratamento adicional para a remoção de pesticidas em estações de tratamento de água, baseados em estudos da literatura. Para tanto, o método adotado para responder a essa questão foi por meio da revisão bibliográfica, conforme será descrito detalhadamente na seção 4.

2 OBJETIVO GERAL

Apresentar a eficácia dos processos oxidativos avançados utilizando reatores do tipo CPC para remoção de pesticidas nas estações de tratamento de água.

2.1 Objetivos específicos

- Verificar a eficácia da aplicabilidade de processos não convencionais na rede de abastecimento público, a fim de avaliar a remoção de pesticidas.

- Expor a eficácia dos processos oxidativos tendo o reator do tipo CPC como fonte de radiação em conjunto com o reagente de Fenton para oxidar o pesticida glifosato presente na água de abastecimento público.

- Identificar desafios e possibilidades do uso de reator solar para remoção das pesticidas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A constituição das sociedades humanas está diretamente ligada aos reservatórios, aos cursos e aos ciclos das águas, que lhes provém o abastecimento, a produção dos alimentos e a criação de animais. Com a Revolução Industrial em ascensão, a taxa de crescimento populacional acelerou-se, acompanhada pela busca de melhores condições de vida e redução da mortalidade. O aumento da população trouxe consigo a preocupação com a disponibilidade de alimentos, levando, por volta de 1940, ao surgimento de uma abordagem agrícola inovadora denominada Revolução Verde. Esta trouxe consigo a introdução de várias técnicas agrícolas, incluindo o uso intensivo de pesticidas, conhecidos como agrotóxicos, e fertilizantes (Cunha, 2023).

O impulsionamento do uso intensivo de pesticidas ocorreu na década de 1970, por meio de apoio do governo federal somado a influência da bancada ruralista, com o jargão “pesticida é um produto químico que visa exterminar a peste” – ou seja, toda espécie que compita com a humana pelos mesmos alimentos, ameacem a produtividade, saúde humana ou de espécies que servem de alimentação aos homens. Com a expansão do mercado de alimentos, o Brasil ocupa, desde 2008, o primeiro lugar no ranking mundial de consumo de pesticidas (Vale, 2015; Marques, 2018).

Assunção (2014) mostra que a contaminação das águas, mesmo com níveis de resíduos dentro dos valores permitidos na legislação vigente, pode estimular efeitos tóxicos, principalmente em razão das misturas desses agentes contaminantes e dos micropoluentes, como fármacos e pesticidas. Exposições a carcinogênicos ou desreguladores endócrinos, em qualquer nível de exposição diferente de zero pode causar algum dano à saúde ou ao meio ambiente. Esses agentes podem estar presentes tanto em água bruta ou tratada, em diferentes concentrações, dependendo das eficiências das estações de tratamento de água ou esgoto.

Os agentes contaminantes são resistentes à degradação e os tratamentos convencionais disponibilizados pelos órgãos públicos, tanto para água de abastecimento quanto para os esgotos, não são capazes de fazer sua remoção total, prejudicando a qualidade da água potável e consequentemente o meio ambiente e a saúde pública (Vicentini. 2023).

Desse modo, diante da carência de conhecimento sobre seus efeitos à saúde humana e o real comprometimento à integridade do ecossistema, o monitoramento dessas substâncias não contempla a rede de abastecimento e nem os controles ambientais das legislações.

Nas grandes cidades, devido à sua má estruturação, é comum a prática de reutilização da água, com a captação do recurso de uma fonte e o descarte do efluente rio abaixo, seguido pelo uso desse mesmo corpo hídrico por outra localidade algumas distâncias à frente. Assim, a deterioração gradual desse manancial é um cenário recorrente ao longo de seu percurso. Essa prática é muito utilizada no Brasil, em virtude da falta de planejamento, fator agravado pela grande quantidade de esgoto bruto despejado nos mananciais, que concomitantemente afeta o tratamento da água que é utilizada para abastecimento da população (Montagnera, 2017).

Os tratamentos da água da rede de abastecimento destacam-se por sua longa história, eficácia comprovada, simplicidade, ampla adoção, padronização e custo-benefício. São utilizados desde 1876, sendo a cidade do Rio de Janeiro pioneira na inauguração em nível mundial de uma Estação de Tratamento de Água (ETA). O termo "tratamento convencional de água" refere-se a um conjunto de métodos tradicionais e comprovados que removem impurezas e patógenos da água, tornando-a potável para consumo humano (Soares, 2019).

Por outro lado, diferente dos tratamentos convencionais, têm-se os processos oxidativos avançados (POAs), que são capazes de eliminar traços de compostos orgânicos naturais ou contaminantes emergentes, através da geração de radicais hidroxilas ($HO^{\cdot}$). Esses radicais são altamente oxidantes e não seletivos, sendo capazes de oxidar compostos não afetados por oxidantes convencionais, como oxigênio, ozônio e cloro, reduzindo a toxicidade e garantindo a melhor qualidade da água para consumo. Diversos POAs como a fotocatálise, ozonização, Fenton e foto-Fenton que, combinados com a radiação ultravioleta (UV), quebram a molécula de peróxido de hidrogênio (H2O2) e formam radicais hidroxilas (Cruz, 2020).

Para elevar a eficácia dos POAs, surgem os fotorreatores do tipo coletores parabólico composto (CPC), os quais concentram a luz solar em um tubo absorvente onde ocorre o processo de oxidação. Este tipo de reator é particularmente eficaz em processos que utilizam a radiação solar, como desinfecção fotocatalítica ou processos semelhantes.

3.1 Água e pesticidas

A água é um recurso natural finito, indispensável para a vida humana e para os animais. O saneamento, exerce a salubridade ambiental, necessário à saúde pública como um todo, representando um dos principais dispositivos de proteção das reservas de água potável. Tanto a água, quanto o saneamento são direitos humanos necessários para uma vida digna (Pinto, 2022).

A água representa um direito primordial e vital da humanidade, que deve ser disponibilizado de forma universal e igualitária, sem levar em conta fatores socioeconômicos ou culturais. A sua disponibilidade e qualidade dependem totalmente do estilo de vida e do desenvolvimento da atividade antrópica exercida no seu entorno, que afetam os mananciais superficiais e as águas subterrâneas, que podem fomentar a sua escassez (Hirata, 2019).

Deste modo, mais de 2 bilhões de pessoas em todo o mundo vivem sob condições de estresse hídrico, segundo dados do Relatório Mundial das Nações Unidas que também aponta que o mundo enfrentará um déficit hídrico global de 40% até 2030, se o cenário se mantiver sem alterações. Isso agrava ainda mais pelo fato de que 80% de todas as águas residuais e municipais são lançadas na água sem tratamento, afetando a saúde humana e ecossistemas (Pinto, 2022).

Além das emissões de produtos químicos nocivos causadas pela indústria, novos contaminantes como microplásticos, produtos farmacêuticos e pesticidas também causam preocupação às autoridades ambientais. Com relação à preocupação, acredita-se que a biodiversidade e os serviços ambientais estão se perdendo e que os cultivos agrícolas vão substituir principalmente as paisagens naturais. Assim, os ecossistemas de água doce são os mais afetados, colocando em risco o futuro da agricultura, da alimentação e da água (Unesco, 2023).

Nessa perspectiva, discussões sobre o acesso à água surgem como uma necessidade da atualidade. A ONU, por meio dos ODS (Objetivos do Desenvolvimento Sustentável), propõe que os países garantam a gestão sustentável da água e do saneamento até 2030, atendendo o ODS 6 – Água potável e Saneamento. Esse ODS é crucial para o abastecimento de água urbano, por garantir o acesso universal à água potável segura, melhorar sua qualidade, promover o uso eficiente e defender a gestão integrada dos recursos hídricos. Porém, no Brasil, o cumprimento do ODS 6 pode gerar alguns desafios, uma vez que a má distribuição geográfica, crescimento

populacional, poluição hídrica, mudanças climáticas e a precariedade do saneamento básico são fatores que dificultam a gestão da água (Santos, 2022).

Para o cumprimento da meta 6.3 – Qualidade da água e águas residuais, o desafio é ainda maior. Em 2020, segundo relatório da UNESCO, 44% das águas residuais domésticas do mundo não tiveram tratamento adequado antes da descarga no meio ambiente, deixando muito claro que estamos muito longe do caminho certo para alcançar tais metas (Unesco, 2023).

A quantidade de água adequada para consumo humano, sem tratamento prévio, está se tornando escassa. Antes de poder ser consumida, a água deve passar por um processo rigoroso de tratamento para se tornar potável, conforme definido pelo Ministério da Saúde (MS) - atendendo aos padrões microbiológicos, físicos, químicos e radioativos. Por ter uma ampla variedade de agentes químicos utilizados, a legislação brasileira restringe o uso de poucos pesticidas (Palma, 2011).

Com o crescimento dos impactos decorrentes das atividades agrícolas, os pesticidas são considerados um dos mais relevantes contaminantes ambientais causadores de problemas de saúde pública da atualidade. Os pesticidas têm grande relevância na alteração da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, as quais podem ser contaminadas por meio do escoamento superficial e por lixiviação, onde elementos químicos são transportados para os corpos hídricos, e ainda são potencializados pela pulverização aérea e pelo desmatamento das margens de corpos hídricos (Fundação Heinrich Böll, 2023).

Possuindo a maior reserva de água doce mundial, o Brasil cai em contradição ao ser classificado como maior consumidor de pesticidas do mundo, indicando uma ameaça em escala global: a contaminação das principais reservas hídricas do mundo e o comprometimento da diversidade biológica como consequência das atividades antrópicas. Com níveis de concentração na água significativamente mais altos do que os estabelecidos pela União Europeia, o Brasil camufla a realidade da contaminação dos recursos hídricos (Fundação Heinrich Böll, 2023).

A economia política negligenciou a importância da água ao considerar seu valor de uso similar ao do ar, devido à sua abundância e características que a fazem não ter valor financeiro. Se a água fosse escassa e pudesse ser possuída, assim como o solo, poderia se tornar uma fonte de renda. Com sua presença abundante em muitas regiões do planeta, a água está se tornando alvo de disputas crescentes devido aos

diferentes usos a que é destinada, como consumo humano, irrigação, indústria, consumo animal e produção de energia. Isso está levando a população a enfrentar escassez e problemas de abastecimento (Coletti, 2022).

Nesse contexto, no centro de um debate acirrado está a mudança na natureza da água: de bem público para mercadoria. Essa transformação gera tensões entre dois valores distintos, de um lado, a água como bem público - sua essência reside no uso, no acesso vital para todos, sem distinções. É um direito humano fundamental, indissociável da vida e do bem-estar. Por outro lado, a água como mercadoria: seu valor se concentra na troca, no mercado. Essa lógica abre portas para a privatização e consequente exploração dos recursos hídricos, priorizando o lucro em detrimento do acesso universal. Ademais, o avanço do setor agrícola intensifica esse conflito; a utilização intensiva dos mananciais, atrelada à poluição, coloca em risco a qualidade e a disponibilidade da água para as populações (Coletti, 2022).

O reconhecimento do acesso à água potável como direito humano fundamental é um marco histórico na luta por justiça social e ambiental. Essa conquista consolidou-se internacionalmente mediante diversos instrumentos jurídicos, a exemplo da Resolução 64/292 da Assembleia Geral das Nações Unidas, de 2010, que consagrou o direito humano à água e ao saneamento básico (Silva, 2022).

No Brasil, tal direito encontra amparo na Constituição Federal de 1988, que em seu artigo 5º, assegura a todos o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, essencial à qualidade de vida. Além disso, a Lei das Diretrizes Básicas para o Saneamento Básico (Lei nº 11.455/2007) estabelece como diretriz fundamental a universalização do acesso à água potável e ao esgotamento sanitário (Silva, 2022).

Assim, a questão da segurança hídrica no abastecimento das cidades está relacionada com a certeza de que haverá água suficiente e de boa qualidade de maneira sustentável e resistente, atendendo às demandas atuais e futuras da população. Isso envolve garantir que todos tenham acesso à água para beber, para os cuidados de higiene, saneamento e crescimento socioeconômico, mesmo diante de situações de mudanças climáticas e catástrofes naturais como secas e enchentes (Paula, 2023).

Um estudo publicado em 2019 pela Repórter Brasil apontou que um em cada quatro municípios brasileiros possui, na água para abastecimento público, uma mistura de 27 diferentes tipos de pesticidas. O que mais chama atenção neste fato é que 21 dos 27 pesticidas encontrados estão proibidos nos países da União Europeia (Farto, 2021; Souza, 2021). Entre os 27 pesticidas encontrados, o que é o mais comum e amplamente utilizado é o herbicida glifosato, mais conhecido por Roundup®. Trata-se de um herbicida não seletivo e de ação sistêmica, muito eficaz no controle de plantas daninhas de folhas largas e estreitas. Esse herbicida, mesmo que tenha sido classificado como possível cancerígeno e de baixa toxicidade, pode causar efeitos adversos em algumas plantas. Além disso, devido ao seu uso intensivo e prolongado - por ter a sua venda menos onerosa e burocrática - tem resultado em riscos graves à saúde e ao meio ambiente (Farto, 2021; Souza, 2021).

Marques (2018) que constatou 49 rios em 11 estados do Brasil se encontram em situação crítica. A análise, que se baseia no Índice de Qualidade da Água (IQA) do Conama (Conselho Nacional do Meio Ambiente), revela um panorama preocupante: nenhum dos rios avaliados atingiu um nível considerado ótimo ou bom. Mais de um quarto (24,5%) desses cursos d'água apresentam alto grau de poluição, contaminados por pesticidas, fertilizantes e esgotos. Essa realidade configura um grave risco à saúde humana e ao meio ambiente, exigindo medidas urgentes para reverter esse quadro.

Contaminantes emergentes em pequenas concentrações (microgramas ou nanogramas por litro) já estão presentes na água para consumo humano mesmo em mínimas concentrações são eminentemente tóxicos. Substâncias como essas podem gerar efeitos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, comprometendo a saúde pública como o grande aumento dos casos de câncer, endometriose, além da mudança da qualidade dos animais e do meio aquoso como um todo. Os pesticidas, por sua vez, podem gerar efeitos nos sistemas nervoso, respiratório, reprodutivo e circulatório dos seres humanos e animais (Santos, 2023).

Tendo em vista a importância da água como recurso finito, valioso e necessário à existência, deve ser preservada e adequadamente tratada visando assegurar sua qualidade para o meio ambiente e a saúde pública. Nesse cenário, os processos oxidativos surgem como instrumentos fundamentais na luta contra a poluição da água, colaborando para a promoção da saúde da população, o alcance

dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estipulados pela ONU e a proteção do meio ambiente.

3.2 O emprego dos pesticidas e seus impactos

A humanidade percebeu a importância da agricultura como forma de utilizar os recursos naturais, ocupar territórios e prosperar, gerando benefícios e desenvolvendo civilizações em regiões ricas em serviços ecossistêmicos. Com o passar do tempo, por meio da necessidade de desenvolvimento, o homem passou a ignorar as condições naturais e acabou se acostumando com o fato de que as suas características se sobressaem mais do que as da natureza, com as alterações dos ecossistemas e paisagens em decorrência da exploração agrícola, deixando rastros gigantescos no meio ambiente (Bertuzzo, 2023).

O emprego dos pesticidas ocorreu pela primeira vez, durante a Primeira e Segunda Guerras Mundiais, seguindo com a automação das lavouras, com o intuito de produzir alimentos em larga escala, e que deu origem a Revolução Verde, enfatizando ser impossível alimentar a população mundial sem o uso dos pesticidas e equipamentos na produção de alimentos, e que com esse modelo de agricultura haveria melhorias na quantidade e qualidade dos alimentos e que por consequência acabaria com a problemática da fome (Bertuzzo, 2023).

O uso de maquinário e o uso de pesticidas no processo de produção aumentaram ainda mais no campo brasileiro principalmente em 1956, com a implantação do Sistema Nacional de Crédito Rural (SNCR), que ligava a liberação do empréstimo ao produtor à fixação de uma porcentagem a ser gasta com pesticidas. Assim, a terra passou a ser apropriada, deixando de cumprir seu papel de essencialidade à vida, para o papel de produzir mercadorias (Peres, 2003; Bertuzzo, 2023; Souza, 2019).

Grandes benefícios foram alcançados usando diferentes tipos de pesticidas em diversas áreas, como na saúde pública e nas atividades agrícolas. Na saúde pública, os pesticidas são usados diariamente para matar pragas, incluindo mosquitos, carrapatos, ratos e camundongos, e graças a isso muitas doenças causadas por essas pragas foram substancialmente reduzidas ou eliminadas. Cerca de um terço dos produtos agrícolas são produzidos com pesticidas, e sem esse uso, haveria uma

grande perda na produção de frutas, vegetais e cereais. Portanto, os pesticidas desempenham um papel relevante na redução de doenças e na melhoria do aumento do rendimento das colheitas em todo o mundo (Tudi, 2020).

Contudo, para além dos alimentos, uma significativa parcela da economia brasileira sustenta-se na exportação de mercadorias básicas, conhecidas como *commodities* (itens que podem ser empregados como matéria-prima na criação de animais e na produção de biocombustível), como soja, açúcar, carne de frango, farelo de soja, carne bovina, celulose e café em grão. Entre elas, a soja destaca-se como líder, garantindo o destaque do Brasil como principal exportador mundial (Bombardi, 2017).

Incentivos fiscais são concedidos aos pesticidas desde o final da década de 1960 e assim continuam até os dias de hoje, com beneficiamento não só ao produto final, mas também dos equipamentos de aplicação, como aviões de uso agrícola. No passado, esses incentivos seguiram uma política mundial para fomentar a Revolução Verde nos países em desenvolvimento. A razão da isenção dos pesticidas está fundamentada no princípio da seletividade, visto que estes são insumos imprescindíveis para a produção agrícola. Essa prática comercial intensifica-se com o tratado de livre comércio assinado pela União Europeia e o Mercosul, sendo o primeiro o principal exportador de pesticida, e os países latino-americanos responsáveis pelo abastecimento de produtos agrícolas básicos (Cunha, 2020).

Embora haja benefícios sociais que justifiquem essas isenções, é essencial avaliá-los à luz dos impactos sociais dos pesticidas. Esses produtos ilustram claramente o conceito de externalidades negativas, em que os danos à saúde e ao meio ambiente, decorrentes de seu uso, não são considerados nas transações de mercado dos pesticidas. Esse custo adicional não é incorporado nem ao preço dos pesticidas nem aos produtos agrícolas que deles dependem, sendo repassado para a sociedade como um todo. Tais custos acabam refletidos nos recursos destinados pelo Sistema Único de Saúde (SUS) ao tratamento de intoxicações e outras doenças crônicas relacionadas aos pesticidas, nos gastos públicos com a fiscalização, regulação, controle e demais despesas associadas à gestão dessas substâncias nocivas (Cunha, 2020).

Assim, Tendler no documentário O Veneno está na mesa, ainda destaca que:

> “O Brasil é o país que mais consome agrotóxico, 5,2 litros por habitante. Muitos dos agrotóxicos, herbicidas, fungicidas e pesticidas que consumimos estão proibidos em quase todo mundo, pelo risco que representam para a população; tanto para a saúde dos trabalhadores, que manipulam os venenos, quanto para a dos cidadãos, que consomem os alimentos, estão ameaçadas. Só quem lucra são as transacionais do veneno” (O veneno está na mesa, Silvio Tendler, 2014).

Mesmo que a aplicação de pesticidas sirva a muitos propósitos importantes, incluindo proteção contra perdas de safras e contra doenças transmitidas por vetores, há preocupações significativas sobre os potenciais efeitos tóxicos de pesticidas para organismos não-alvo, incluindo os seres humanos. Os pesticidas são projetados para serem tóxicos para grupos específicos de organismos, o que traz benefícios aos humanos. No entanto, eles têm efeitos adversos consideráveis em outras criaturas vivas, bem como nos recursos naturais, incluindo ar, água e solo (Luo, 2019).

Deste modo, evidencia o princípio da Proibição do Retrocesso Ambiental, conhecido como um princípio fundamental do direito ambiental brasileiro que estabelece a garantia de que o nível de proteção ambiental já alcançado não poderá ser diminuído por leis, normas ou atos administrativos futuros. Em outras palavras, esse princípio visa assegurar que as conquistas já obtidas na proteção do meio ambiente sejam irreversíveis, impedindo que retrocessos sejam realizados, mesmo que haja mudanças na legislação ou na postura do governo.

O Princípio da Proibição do Retrocesso Ambiental está presente na Constituição Federal de 1988, no artigo 225, que garante o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado:

> Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.
>
> § 1º Para assegurar a efetividade desse direito, incumbe ao Poder Público:
>
> I - preservar e restaurar os processos ecológicos essenciais e prover o manejo ecológico das espécies e ecossistemas;
>
> II - preservar a diversidade e a integridade do patrimônio genético do País e fiscalizar as entidades dedicadas à pesquisa e manipulação de material genético;

Pozzetti, (2021) segue esse raciocínio e relembra que a Revolução Verde prometeu eliminar a fome do planeta de forma que não cause prejuízos ao meio ambiente. Caso ocorra, está ferindo o Princípio ao Retrocesso Ambiental, instrumento

protetivo no qual prevê que não é possível o poder legislativo editar uma norma que cause retrocesso ou diminuição dos direitos já alcançados por uma lei anterior.

No entanto, o sucesso da colheita significa prejuízo ao meio ambiente, conforme destaca Pozzetti (2014, p. 104):

> A busca de uma melhor qualidade nos alimentos, bem como a suposta necessidade de produção em larga escala e a necessidade de preservação do meio ambiente, chocam-se com as tendências recentes do sistema agroalimentar. Se por um lado temos a necessidade de produzir mais, por outro temos a obrigação de fazê-lo com a devida cautela e segurança. A busca de uma melhor qualidade nos alimentos choca-se com as novas técnicas de produção.

É preciso produzir alimentos sem que haja prejuízo ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, fazendo com que o alimento seja de qualidade, e se isso não acontecer, o consumidor poderá não morrer de fome, mas sim das doenças causadas pela forma inadequada de cultivo. Diante disso, é fundamental debater o uso de pesticidas em nosso país, considerando os direitos relacionados a um ambiente ecologicamente equilibrado para as atuais e futuras gerações (Pozzetti, 2021; Souza, 2019).

O nível de poluição dos recursos hídricos tem sido progressista e os pesticidas, por sua vez, assumem um papel de destaque como contaminantes, principalmente porque a sua utilização desenfreada e intensa traz uma série de transtornos. Com a sua utilização desenfreada, a presença dos pesticidas em água para consumo humano vem sendo discutida não só no Brasil, mas também no mundo, fomentando uma preocupação aos efeitos adversos ao meio ambiente e a saúde humana (Lopes, 2018; Palma, 2011).

Para detectar Pesticidas Altamente Perigosos (PAPs), a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) e a OMS definem alguns critérios: são considerados altamente perigosos se tiverem um efeito letal agudo, causarem câncer ou defeitos genéticos, prejudicarem a fertilidade ou prejudicarem os fetos, ou seja, só serão classificados como muito perigosos se causarem danos irreversíveis à saúde ou ao meio ambiente. Embora haja essa classificação, ainda não foi exibida uma lista com os PAPs utilizados no mundo todo, impossibilitando a identificação e a regulação pelos governos e agentes fiscalizadores (Unesco, 2023)

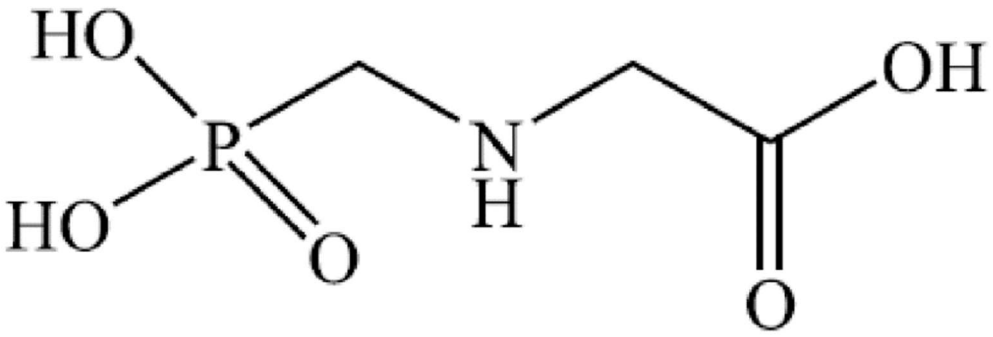
Segundo a Unesco (2023), no ano de 2022, 35 novos pesticidas foram aprovados para o uso e 22 (65%) foram classificados como muito perigosos ao meio ambiente pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis (IBAMA). Já nos anos anteriores, 2019 e 2020, 19% dos pesticidas registrados foram classificados como altamente tóxicos para a saúde humana.

Presente nas culturas de soja, milho e cana-de-açúcar. Seu uso exacerbado não demora a se revelar, causando a contaminação das águas superficiais e subterrâneas (Pereira, 2022).

3.3 O herbicida glifosato

O glifosato (N-(fosfonometil)glicina) (Figura 1) foi introduzido pela Monsanto Company em 1974. Amplamente utilizado pelo mundo todo, o glifosato é um herbicida sistêmico não seletivo para controle de ervas daninhas. Esse herbicida, mesmo que tenha sido classificado como possível cancerígeno e de baixa toxicidade, pode causar efeitos adversos em algumas plantas, e devido ao seu uso intensivo e prolongado - por ter a sua venda menos onerosa e burocrática - tem resultado em riscos graves à saúde e ao meio ambiente (Farto, 2021; Souza, 2021).

Figura 1. Fórmula estrutural do glifosato (*N*-(fosfonometil)glicina).



Fonte: Brillas, 2021.

O *Glyphosate Renewal Group* (Grupo de Renovação do Glifosato) de que fazem parte empresas como a Bayer, solicitou novamente a aprovação do uso do herbicida na União Europeia, herbicida que foi banido pela IARC e pela OMS em 2015 por ser cancerígeno para humanos. No entanto, o grupo ainda conseguiu aprovar sua

utilização até o final de 2023 na época. O pedido da Bayer é baseado em várias revisões de literatura e pesquisas, porém nenhuma pesquisa mais recente sustenta que o químico não seja cancerígeno. No contexto brasileiro, o pesticida de maior utilização é o glifosato. Em 2020, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) decidiu manter o uso do glifosato com restrições, o que reduziu a deriva da pulverização do produto (Unesco, 2023).

Assim, na contramão dos países europeus, no Brasil os opositores às demandas burocráticas, a saúde e ao meio ambiente, defendem que seja necessário acelerar o processo de liberação dos pesticidas pois o país precisa “crescer”, enfatizando que a espera de oito meses para a liberação é um tempo muito longo. No Congresso Nacional, há um projeto de Lei – PL nº 6.299/2022 – que prevê a exclusão do termo agrotóxico para produtos fitossanitários, que facilitará a entrada de novos produtos no país (Pozzetti, 2021).

A indústria farmacêutica impulsionada pela produção de alimentos passou a vender mais, principalmente nos últimos anos medicamentos para doenças nunca vistas antes, que surgiram devido às contaminações do meio ambiente e da cadeia alimentar, estimulando também doenças como cânceres que são cada vez mais comuns (Pozzetti, 2021; Peres, 2003).

Apesar de sua aceitabilidade biológica e epidemiológica, a avaliação do potencial cancerígeno dos produtos químicos é extremamente difícil de se realizar. Com altos gastos públicos orientados para diagnóstico, tratamento e comorbidades, o câncer é um problema de saúde pública que representa a segunda maior mortalidade no mundo. Atualmente, um grande número de estudos indicam que o glifosato é um dos principais fatores que contribuem para o surgimento da doença, podendo interromper a via do estrogênio, prejudicam funções cerebrais, aumentam o estresse oxidativo, causam inflamação e causa o aumento progressivo da disfunção renal (Igual, 2020; Nacano, 2023).

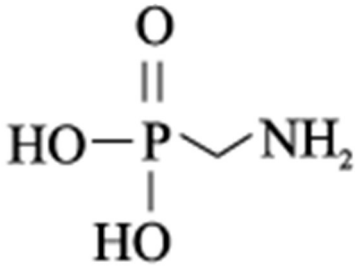
As formulações a base de glifosato, mesmo com concentrações abaixo dos limites, ocasionam desregulação endócrina e efeitos carcinogênicos em outros organismos vivos, como peixes, répteis e anfíbios. Além disso, o glifosato induz a resistência dos antibióticos em bactérias como *Escherichia coli* e *Salmonella.* Já a toxicidade do metabólito primário do glifosato, o ácido aminometilfosfônico (AMPA)

pode ser ainda maior, devido a sua persistência no ambiente, em comparação ao glifosato (Klingelhöfer, 2021*).*

Organismos não alvo podem ser afetados por herbicidas não seletivos como o glifosato, devido ao seu comportamento e o destino que causam riscos dependendo das condições ambientais, como temperatura, precipitação, velocidade do vento, que são impulsionados pela pulverização e o processo de deriva, podendo causar ainda mais prejuízos para água, plantas e animais (Klingelhöfer, 2021*).*

Dessa maneira, o entendimento do comportamento do glifosato e de seu metabólito primário - AMPA (ácido aminometilfosfônico) (Figura 2) na saúde e no meio ambiente é de extrema importância, uma vez que o solo possui grande capacidade de sorção dos compostos, somados ao escoamento superficial e lixiviação que resulta da dose, precipitação, fluxo preferencial sorção e degradação, podendo atingir águas superficiais e subterrâneas, sendo encontradas concentrações mais baixas em águas pluviais, esgotos, nas saídas das estações de tratamento e até em águas potáveis engarrafadas (Klingelhöfer, 2021*).*

Figura 2. Fórmula estrutural do AMPA (ácido aminometilfosfônico)



AMPA

Fonte: Amarante *et al.*, 2002, p.

O glifosato e o AMPA levantaram uma extrema inquietação referente a sua toxicidade e acumulação na cadeia alimentar. Com o cultivo de culturas geneticamente modificadas em todo o mundo, o uso intensivo do glifosato teve um aumento exponencial e com isso seus resíduos têm sido encontrados em alguns alimentos. Devido ao aumento de 75% de sua presença em alguns alimentos, o glifosato pode ser encontrado em ovos, farinhas, bebidas, mel, carne e peixes,

salgadinhos, biscoitos, sucos, leguminosas e até em óleos vegetais. O risco dietético é considerado baixo se a ingestão do composto não ultrapassar de 1 mg/kg de peso corporal (Fao, 2023; Meftaul, 2020).

Em virtude do aumento exponencial do uso do glifosato por mais de 45 anos após o surgimento de culturas geneticamente modificadas, ervas daninhas desenvolveram certa resistência ao composto, fazendo com que o glifosato fosse banido em aproximadamente de 20 países (Klingelhöfer, 2021*).*

Segundo Bombardi (2017) a comparação entre a legislação brasileira e europeia a respeito dos Limites Máximos de Resíduos (LMR) mostra o grau de controle do agronegócio sobre o Estado brasileiro. Na legislação europeia, com exemplo do glifosato, os LMR são extremamente rigorosos, sendo de até 0,1 µg/L. Já no Brasil o limite chega a 500 µg/L, ou seja, 5.000 vezes mais. No Brasil, 72% dos pesticidas utilizados são destinados à cultura da soja, milho e cana-de-açúcar e não são destinados diretamente à alimentação da população. O glifosato corresponde a 50% desse total, mesmo sendo classificado, segundo a Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) no Grupo 2A – provavelmente cancerígeno.

3.4 Tratamentos convencionais da água

O agravamento do abastecimento de água urbano vem ganhando destaque principalmente em virtude dos problemas ocasionados pela escassez e pela qualidade da água disponível. Crescimento populacional, ocupação desordenada próxima a mananciais e falta de planejamento das concessionárias responsáveis pelo abastecimento intensificam a situação, tornando-se um dos sérios problemas mundiais que vem aumentando continuamente (Cruz, 2020).

Há uma crescente preocupação no que diz respeito à presença de contaminantes em corpos hídricos, particularmente no que se refere à exposição a substâncias carcinogênicas e desreguladores endócrinos. Esses compostos, mesmo quando presentes em níveis de concentração mínimos, podem representar potenciais riscos à saúde humana e ao equilíbrio ambiental. Tais agentes poluentes encontram-se tanto em águas brutas quanto em águas que passaram por processos de tratamento, apresentando variações na sua concentração. Essa variação está diretamente relacionada à eficiência das estações de tratamento de água e esgoto,

que desempenham um papel crucial na mitigação dos impactos desses contaminantes. Portanto, a eficácia dos processos de purificação e saneamento é fundamental para garantir a segurança da água destinada ao consumo humano e para preservar a integridade dos ecossistemas aquáticos (Assunção, 2014).

Os pesticidas lixiviados e percolados que chegam aos cursos d'água são o acesso para a contaminação das populações, sendo as águas superficiais de abastecimento a principal afetada após os processos de transporte e deposição. O controle de vigilância e qualidade da água para consumo humano é pautada pela Portaria GM/MS nº 888/2021 do MS, que inclui 40 parâmetros de agrotóxicos, definidos na Revisão do Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/2014, que devem ser monitorados semestralmente junto aos responsáveis pelo abastecimento de água, tanto para águas superficiais quanto subterrâneas (Brasil, 2021).

A presença de pesticidas e outros poluentes emergentes nas águas de abastecimento é uma realidade atual, apesar da concentração decrescente ao longo de toda a sequência do ambiente aquático, como águas, águas tratadas, águas superficiais e águas públicas. Mais de 10.000 produtos químicos são utilizados na maior parte dos produtos de uso doméstico, industrial e agrícola, que acabam atingindo as águas superficiais pelo lançamento de águas residuárias (Cruz, 2020; Sousa, 2019).

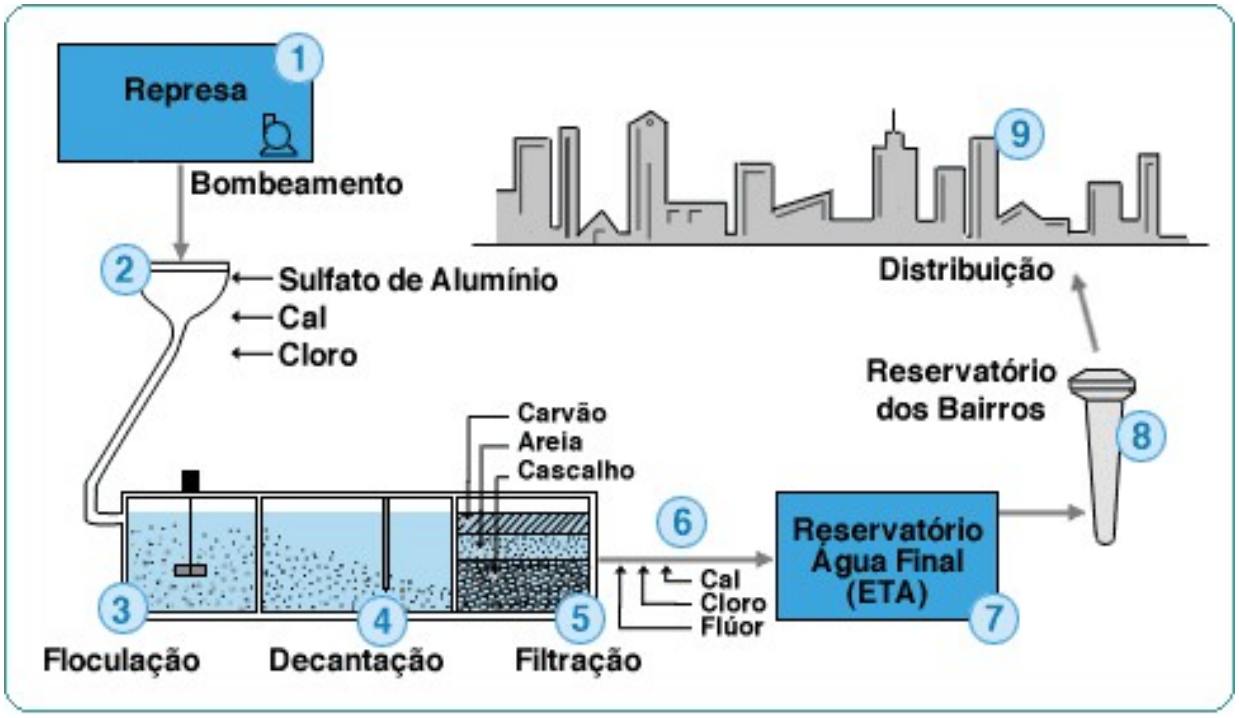
Segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), corpos d'água classificados como Classe 1 podem receber efluentes líquidos e servir como fontes de abastecimento público. Nesses casos, é exigido apenas um tratamento simplificado antes da distribuição da água, consistindo na filtração e desinfecção. Ainda, a água que é distribuída à população brasileira é submetida a uma norma de potabilidade limitada no que tange a padrões para os poluentes emergentes (Sousa, 2019).

As estações de tratamento das águas de abastecimento são projetadas para o controle de vários poluentes, possui um conjunto de processos e operações físico-químicas que tem por objetivo a remoção de matéria orgânica, microorganismos e outros compostos que podem estar presentes na água destinada à população e que podem ser danosas à saúde (Sousa, 2019).

No Brasil, a técnica de potabilização da água nas Estações de Tratamento é denominada convencional. O processo convencional pode ser adaptado de acordo

com as características da água bruta e os requisitos de qualidade da água potável. Tal processo é um conjunto de etapas interligadas que visam remover impurezas, patógenos e outras substâncias presentes na água bruta, tornando-a potável e segura para o consumo humano. O processo divide-se em etapas principais, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3. Esquema de um sistema de abastecimento de água.



Fonte: SABESP, 2024.

Quadro 1. Sequência do esquema de abastecimento de água.

Fases do sistema de abastecimento	Descrição da fase
1 **CAPTAÇÃO**	Localização: A água bruta é captada de mananciais como rios, lagos ou reservatórios subterrâneos, escolhidos por sua qualidade e quantidade adequadas. Obras de Captação: Podem ser simples (tomada d'água) ou complexas (barragens), com sistemas de gradeamento para retenção de detritos maiores. Transporte: A água bruta captada é canalizada por tubulações ou canais até a ETA, vencendo desníveis e distâncias. Em alguns casos, pode haver pré-tratamento na adução, como remoção de detritos flutuantes ou sedimentação grosseira.
2 – 3 - 4 **PRÉ TRATAMENTO**	Coagulação: Adição de coagulantes químicos (alumínio, ferro) para desestabilizar as impurezas suspensas na água, facilitando sua agregação. Floculação: Agitação suave da água coagulada para promover a formação de flocos maiores e mais pesados. Decantação: Sedimentação dos flocos em tanques, separando-os da água clarificada. O lodo decantado é removido para tratamento adequado
5 **FILTRAÇÃO**	Passagem por Leitos Granulares: A água decantada passa por filtros com camadas de areia, cascalho e antracito, retendo partículas sólidas remanescentes. Lavagem dos Filtros: Periodicamente, os filtros são lavados com água limpa para remover o material retido e garantir a eficiência da filtração.
6 **PÓS-TRATAMENTO**	Correção do pH: Ajuste da acidez (pH) da água para o valor ideal (entre 6,5 e 8,5), evitando corrosão nas tubulações e garantindo a eficiência da desinfecção. Desinfecção: Eliminação de microrganismos patogênicos através da adição de desinfetantes como cloro, ozônio ou radiação ultravioleta.

	Fluoretação: Adição de flúor à água para prevenir cáries dentárias, principalmente em crianças. Controle de Qualidade: Monitoramento contínuo da qualidade da água em todas as etapas do processo, garantindo a potabilidade e segurança para o consumo.
7 – 8 – 9 **ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO**	Reservatórios: A água tratada é armazenada em reservatórios elevados para regular a distribuição e garantir pressão adequada na rede. Rede de Distribuição: A água potável é distribuída por tubulações até as casas, comércios e indústrias, para o consumo humano.

Fonte: Adaptado de SABESP, 2024.

Os tratamentos convencionais são ineficientes para a remoção de poluentes emergentes como pesticidas ou a mistura deles. Dos 5.570 municípios brasileiros, apenas 46% emitem informativos sobre a presença de pesticidas em suas águas. Os resultados desse monitoramento são informados pela vigilância e pelos operadores no Sistema de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano – SISÁGUA. O monitoramento não obedece a um critério para as escolhas das épocas das amostragens e não leva em conta certas especificidades para a realização das coletas, que são sempre no mesmo período. O Quadro 1 apresenta os critérios adotados no Brasil, OMS e UE para o monitoramento de pesticidas (Siságua, 2022; Bursztejn, 2023).

Quadro 2. Critérios adotados no Brasil e pelas diretivas internacionais para o monitoramento de pesticidas.

Diretiva	Critérios de Monitoramento	Frequência de monitoramento de pesticidas
Brasil	- Monitoramento deve ser realizado pela autoridade em saúde pública (Vigilância) e pelos operadores dos sistemas de abastecimento de água (Controle) de forma independente - Planos de monitoramento devem ser aprovados pelas secretarias municipais de saúde. - Obrigatório em todos os 5.570 municípios do Brasil.- Resultados publicados no Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (SISAGUA)	- Semestral, para 40 pesticidas.
OMS	- Planos de segurança da água (PSA) são instrumentos adequados para alcançar os objetivos de água segura para consumo. - Prioriza o monitoramento microbiológico sobre o químico porque é considerado de maior risco imediato à saúde	- Anual (mananciais superficiais); - Mais espaçados (subterrâneos); - Subterrâneos: frequência maior, dependendo da localização das fontes de poluição e fluxos no aquífero.
União Europeia	- Parâmetros devem ser atualizados anualmente; - Definida uma concentração máxima admissível (MAC) de 0,1 µg/L para um pesticida individual, e de 0,5 µg/L para a concentração total, em qualquer amostra	- Mínima em função do volume diário de água distribuída ou produzida numa zona de abastecimento. - Verificada a ausência do agrotóxico na água, pode haver diminuição na frequência ou mesmo o encerramento do monitoramento.

Fonte: Bursztejn, 2023, adaptado.

Nas práticas internacionais de monitoramento dos pesticidas, percebe-se que uma maior flexibilidade acontece no Brasil em relação à Organização Mundial da Saúde (OMS) e à União Europeia (UE), em que a maioria dos países desenvolvidos controla constantemente o período e as especificidades de utilização dos pesticidas. Para a obtenção de dados mais extensos, os altos custos das coletas e amostragens

são fatores limitantes, fazendo com que inexistam dados desses monitoramentos em mais de 90% das terras agrícolas no mundo (Bursztejn, 2023).

3.5 Processos Oxidativos Avançados (POAs)

A poluição da água é atualmente uma problemática que a comunidade científica deve resolver no século XXI, questão que se torna ainda mais desafiadora pelo fato de que os processos convencionais de tratamento de água e efluentes na maioria das vezes apresentam baixa eficiência principalmente na degradação dos pesticidas e outros micropoluentes (Machado, 2023).

Considerando que os contaminantes emergentes estão cada vez mais presentes na natureza, gerando preocupações significativas, torna-se essencial remover tais substâncias, especialmente quando se trata da água destinada ao consumo humano, sendo uma prioridade.

Nesse cenário, os métodos de tratamentos oxidativos surgem como instrumentos na luta contra a poluição da água, colaborando para a promoção da saúde da população e a proteção do meio ambiente.

Diferente dos tratamentos convencionais, os POAs, são capazes de eliminar traços de compostos orgânicos naturais ou sintéticos, sem seletividade. Os POAs funcionam através da geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), como radicais hidroxila ($HO^{\cdot}$), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) ou ozônio (O_3). Os $HO^{\cdot}$ quebram as cadeias carbônicas dos poluentes podendo mineralizá-los completamente em dióxido de carbono CO_2-, água e íons inorgânicos. Para compostos com elevada recalcitrância, poderá haver formação de compostos intermediários com menor toxicidade e mais facilmente degradável pelos processos convencionais (Yi-di, 2021).

Nos POAs a geração dos $HO^{\cdot}$ pode ser realizada por método químico, eletroquímico, fotoquímico e os mais recentes sonoquímico e sonoeletroquímico. Existem processos heterogêneos (com catalisadores sólidos - duas fases distintas) ou homogêneos (uma única fase), podendo ocorrer na presença ou na ausência de luz UV (de origem artificial ou natural solar). Exemplos típicos estão mostrados no Quadro 2:

Quadro 3. Principais tipos de processos oxidativos avançados

Processo	Homogêneo	Heterogêneo
Com irradiação	O_3/UV	Fotocatálise heterogênea/UV
	H_2O_2/UV	
	O_3/H_2O_2/UV	
	Foto-Fenton	
Sem irradiação	Reagente de Fenton	Oxidação anódica
	O_3	Eletro-Fenton
	O_3/H_2O_2	

Fonte: Adaptado de Parra, 2022.

3.5.1 Ozonização (O_3)

A ozonização é um processo oxidativo avançado que utiliza o ozônio (O_3), para degradar contaminantes orgânicos e inorgânicos presentes na água. Pode ser gerado no local por meio de descarga elétrica em ar puro ou oxigênio. Diversos métodos de geração podem ser utilizados, como descarga corona (mecanismo de descarga elétrica), descarga silenciosa e barreiras dielétricas. Pode ser injetado na água através de difusos e dissolve-se, formando o ozônio aquoso ($O_{3(aq)}$).

O ozônio aquoso age como um forte oxidante, reagindo com diversos contaminantes presentes na água, como: pesticidas, produtos farmacêuticos, compostos orgânicos voláteis (COVs), bactérias, vírus, protozoários, ferro, manganês, sulfeto de hidrogênio e outros. É amplamente eficiente na remoção de contaminantes nos efluentes, por ser considerado um grande gás oxidante e desinfetante, podendo ser otimizado com a combinação de radiação ultravioleta.

Pode ter grande eficácia no tratamento de águas residuais contaminadas por glifosato em baixas concentrações e com um tempo de reação curto. Entretanto, existem desvantagens que podem dificultar a sua aplicação, visto que o ozônio é instável em condições normais, é solúvel em água e com isso são necessárias técnicas especiais de mistura. Essa técnica possui alto custo de manutenção para o

tratamento de água e, em certas condições, pode gerar subprodutos indesejáveis e demanda considerável de energia para geração de ozônio (Feng, 2020).

3.5.2 Fotocatálise heterogênea TiO_2/UV

Com origem na década de 1970, os processos fotocatalíticos foram desenvolvidos com o objetivo de produção de combustíveis, visando transformar a energia solar em química. A oxidação da água em TiO_2 (dióxido de titânio) ocorreu em 1972, gerando hidrogênio e oxigênio, porém somente em 1983 a aplicação em descontaminação foi explorada. A partir daí surgiram interesses de pesquisadores devido a sua eficiência na degradação de poluentes (Brito, 2012).A geração da fotocatálise heterogênea dá-se pela ativação do semicondutor (TiO_2) por luz solar ou artificial, que segundo Brito, (2012 p. 6):

> Os potenciais adquiridos são suficientes para gerar radicais HO• a partir de moléculas de água adsorvidas na superfície do semicondutor, os quais podem subsequentemente oxidar o contaminante orgânico. A eficiência da fotocatálise depende da competição entre o processo em que o elétron é retirado da superfície do semicondutor pelo oxigênio, evitando o processo de recombinação do par elétron-lacuna.

Logo, a diminuição das concentrações foi comprovada após o tratamento por fotólise heterogênea (TiO_2/UV) e demonstraram eficiência para uma completa mineralização dos poluentes (Santos, 2023; Brito, 2012).

3.5.3 Processos baseados nas reações de Fenton

O reagente de Fenton foi mencionado pela primeira vez em 1894 por H. J. H. Fenton, sendo um método químico que utiliza a combinação de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e íons ferro (geralmente Fe^{2+}) para gerar os radicais hidroxila. É um processo oxidativo avançado químico e homogêneo, onde ocorrem as reações em cadeia. A reação é iniciada pela decomposição do H_2O_2 catalisada por íons ferro (Machado, 2023).

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH^- + HO^{\cdot} \qquad \text{(reação 1)}$$

Esse processo tem maior eficácia em pH ácido (entre 2,5 e 3,0) para evitar a precipitação do ferro e formação de lodo. Os radicais hidroxila reagem rapidamente com compostos orgânicos, quebrando suas moléculas em fragmentos menores e mais simples e os radicais livres reagem entre si, regenerando os íons de ferro (Machado, 2023).

$$Fe^{3+} + HO^{\cdot} \rightarrow Fe^{2+} + OH^{-} \qquad \text{(reação 2)}$$

O processo Foto-Fenton combina a reação de Fenton com a irradiação (hv) por luz ultravioleta (UV) ou solar. Sob irradiação de luz, $[Fe(OH)]^{2+}$ sofre excitação regenerando Fe^{2+} que catalisa a decomposição de H_2O_2 produzindo $HO^{\cdot}$ que degrada poluentes orgânicos, de acordo com a reação 3. Além disso, a fotólise direta de H_2O_2 também produz $HO^{\cdot}$ (reação 4) (Machado, 2023; Feng, 2020).

$$[Fe(OH)]^{2+} + h\nu \rightarrow Fe^{2+} + HO^{\square} \qquad \text{(reação 3)}$$

$$H_2O_2 + h\nu \rightarrow 2\ HO^{\square} \qquad \text{(reação 4)}$$

Como vantagem, o processo Foto-Fenton tem mostrado eficiência na degradação de vários poluentes como pesticidas, fármacos, corantes e surfactantes, devido a não seletividade dos radicais hidroxila, outra vantagem é a utilização de reagentes baratos como H_2O_2 e sais de ferro.

O eletro-Fenton é um dos processos de oxidação eletroquímica avançada mais populares e é baseado na reação de Fenton assistida eletroquimicamente. Em contraste com o sistema Fenton já descrito em que o reagente de Fenton é adicionado externamente à solução a ser tratado, o processo eletro-Fenton geralmente não utiliza produtos químicos, exceto uma quantidade catalítica de ferro ferroso. O H_2O_2 é formado pela redução de O_2 (reação 5) em um cátodo adequado. O H_2O_2 formado

reage com o catalisador adicionado externamente (Fe^{2+}) para formar $HO^{\cdot}$ homogeneamente via reação de Fenton (reação 6).

$$O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow H_2O_2 \qquad \text{(reação 5)}$$

$$H_2O_2 + Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + OH^- + HO^{\square} \qquad \text{(reação 6)}$$

Os materiais catódicos mais utilizados para a produção de H_2O_2 são baseados em materiais de carbono (carbono feltro, carbono vítreo reticulado - RVC, esponja de carbono, nanotubos de carbono - CNT ou grafite).

O processo foto-eletro-Fenton consiste na irradiação de luz (UV) ao sistema eletro-Fenton e permite aumentar a eficiência de mineralização do processo eletro-Fenton. A combinação de processos tem mostrado que as velocidades de degradação são maiores quando comparadas às taxas de degradação dos processos individuais. Como maior vantagem, os POAs e a eletroquímica utilizam como insumos a energia necessária para realizar a eletrólise, sendo como únicos reagentes os elétrons e os fótons.

Embora o foto-eletro-Fenton na prática forneça alto poder de oxidação/mineralização, o uso de luz artificial torna o processo oneroso. Portanto, o processo utilizando radiação solar é indicado para remediar este inconveniente.

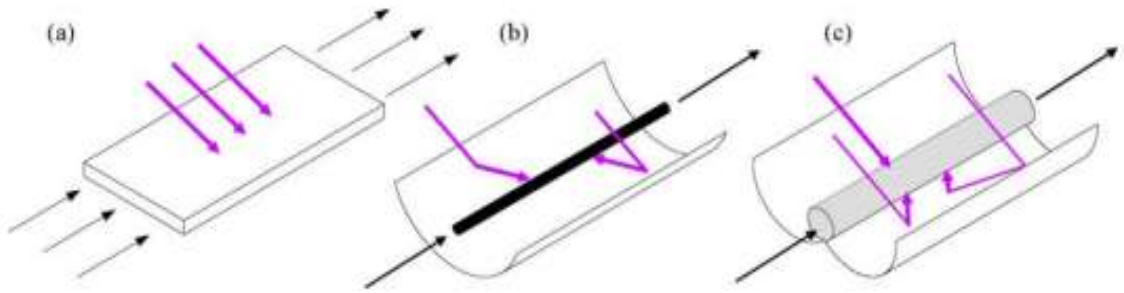
3.5.4 Reator Solar ou fotoquímico

A radiação solar é uma alternativa promissora para o tratamento de águas e efluentes contaminados, proporcionando uma solução sustentável e economicamente viável. A importância desse método dá-se devido a compatibilidade ambiental, alta eficiência energética e facilidade de automação (Cruz-Rizo, 2017)

Os reatores usados na descontaminação fotocatalítica de efluentes com energia solar podem ser categorizados em três grupos, dependendo do fluxo do efluente ser tratado dentro do reator (agitado, de filme ou tubular) e em dois grupos distintos, com base na aplicação do catalisador (em suspensão ou imobilizado) (Guillard, 2003; Malato, 2002; Giménez,1999).

No contexto atual, tem-se observado o desenvolvimento de reatores projetados para otimizar o aproveitamento da luz solar incidente. Dentre os diversos tipos de foto-reatores disponíveis, a superfície coletora destaca-se como um parâmetro crucial para a caracterização desses dispositivos. A avaliação criteriosa dessa superfície é fundamental para a seleção adequada do equipamento, levando em consideração as diferentes eficiências na concentração da radiação incidente sobre o efluente que se pretende tratar. Malato, (2009), discute que os reatores solares podem ser classificados em três categorias principais: coletor não concentrado (CNC), coletor concentrador parabólico (CCP) e coletor parabólico composto (CPC), como mostra a figura 4.

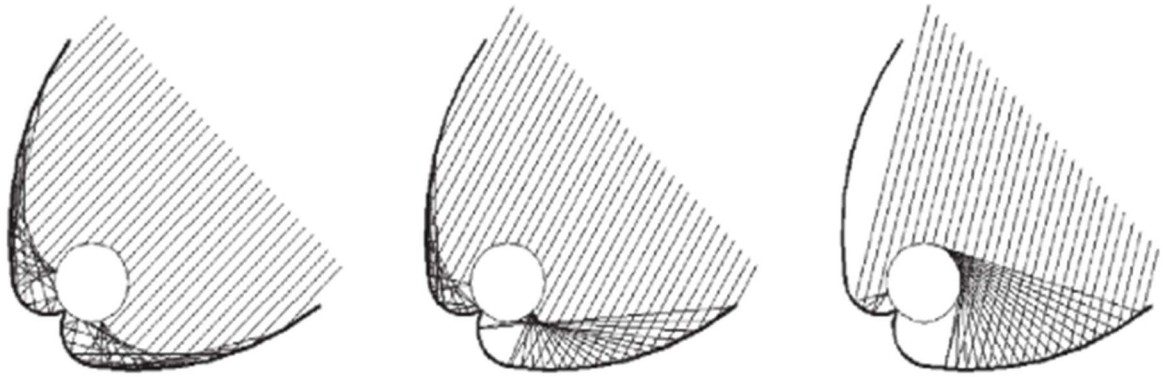
Figura 4. Tipos de reatores solares: **(3a)** Coletor não concentrador (CNC), **(3b)** coletor concentrador parabólico (CCP) e **(3c)** coletor parabólico composto (CPC).



Fonte: Malato, 2009.

Dentre esses modelos de reatores existentes, no reator solar com coletores do tipo parabólico composto (CPC) tubular, as superfícies refletoras são moldadas no formato involuta e dispostas ao redor dos tubos cilíndricos de vidro borossilicato (figura 5), pelos quais o efluente circula. Esses reatores destacam-se por apresentarem baixo custo e não possuir partes móveis, sendo fáceis de instalar, além de possibilitar melhor aproveitamento da eficiência da radiação solar, principalmente a difusa (Da Hora Machado, 2004; Sattler, 2004; Malato, 2002; Giménez, 1999).

Figura 5. Representação em perfil mostrando o formato de involuta dos refletores de um reator CPC e as diversas formas de captação de radiação incidente.



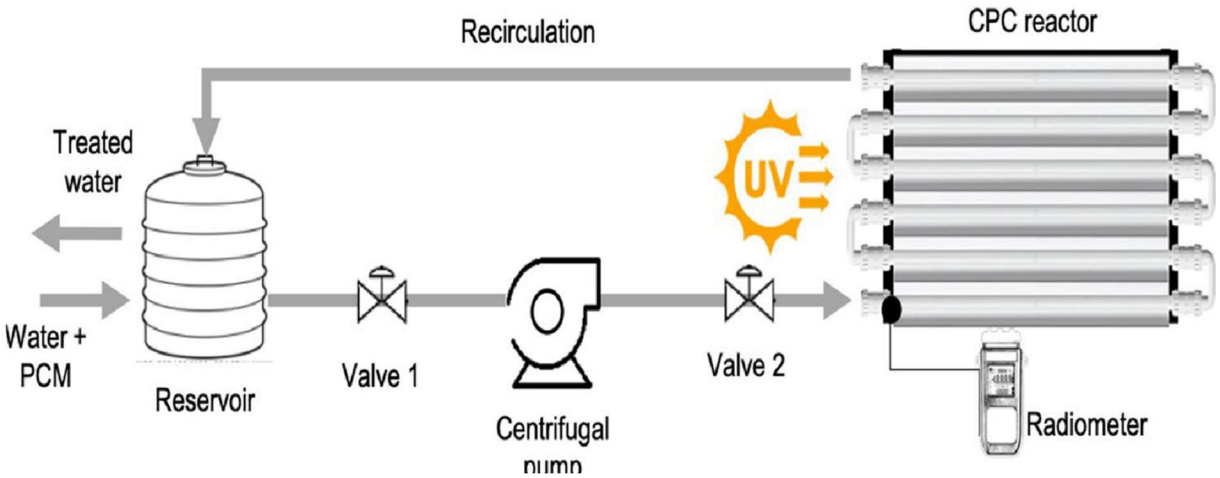
Fonte: Duarte, 2005.

A luz refletida pelo reator é distribuída em torno do receptor tubular, garantindo que toda a circunferência do tubo seja iluminada e que a luz incidente no fotorreator seja equivalente à que atingiria uma placa plana. Os processos de degradação utilizando a radiação UV são influenciados por diversos fatores, como a radiação solar, a concentração inicial do composto a ser degradado, catalisadores, pH e temperatura (Maffessoni, 2021; Malato, 2009).

Geralmente os reatores CPC são compostos por tubos usados como coletores de borossilicato com baixo teor de ferro com dimensões específicas para obtenção de maior radiação possível (Duarte, 2005).

Nos tubos de borossilicato são inseridas superfícies refletoras compostas por folhas de alumínio aumentando a refletividade com baixo custo. As demais tubulações são compostas de CPVC (cloreto de polivinila clorado). O reator conta também com instalação de um radiômetro para medir a intensidade da energia solar e possibilitar sua quantificação, uma bomba de circulação e o reservatório, como mostra a representação esquemática da figura 6 e o reator construído e alocado na Faculdade de Ciências e Engenharia, Unesp, campus Tupã, apresentado na figura 6.

Figura 6. Representação esquemática de um reator do tipo CPC



Fonte: Gonzalez-Pereyra, 2022.

Figura 7. Imagens do modelo de reator solar do tipo CPC construído e instalado na Unesp, Campus de Tupã.





Fonte: Frigulio, 2025

O reator solar do tipo CPC deve ser construído visando a otimização econômica, tecnológica e ambiental. Este processo oferece a energia necessária para iniciar e acelerar reações químicas, tornando-se uma ferramenta poderosa na degradação de poluentes na água, especialmente quando associado aos reagentes de Fenton, que são mais econômicos em comparação com outros processos oxidativos (Zhao, 2022). O processo Foto-Fenton com radiação solar é altamente promissor para aplicação no tratamento de água. Ele oferece uma solução eficiente e versátil para a remoção de uma ampla variedade de contaminantes presentes na água de abastecimento público, incluindo herbicidas como o Roundup® (glifosato), que representa uma ameaça significativa à saúde e ao meio ambiente (Li, 2021; Xiong, 2020).

4 METODOLOGIA

Esta pesquisa adota uma abordagem qualitativa, fundamentada em uma revisão narrativa da literatura científica sobre os desafios relacionados à qualidade da água, os métodos convencionais e não convencionais de tratamento, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) e a viabilidade do uso de reatores solares fotocatalíticos. O estudo analisou a eficácia da tecnologia CPC (coletores parabólicos compostos) associada ao processo Foto-Fenton na remoção de pesticidas da água de abastecimento público, com especial atenção ao glifosato.

A metodologia adotada seguiu um processo estruturado, começando com uma revisão de literatura para identificar a análise de estudos sobre a contaminação da água por pesticidas e seus impactos ambientais, a eficiência dos processos convencionais de tratamento, a aplicabilidade dos POAs e a eficácia do reator solar do tipo CPC associado ao reagente de Fenton para a remoção de pesticidas em estações de tratamento de água.

A revisão da literatura foi conduzida em bases de dados científicas como Web of Science, Scopus, SciELO e Google Scholar, utilizando *strings* de pesquisa como glifosato, reator solar CPC, tratamento da água de abastecimento, processos oxidativos avançados e Foto-Fenton. Foram considerados artigos científicos, dissertações, teses e relatórios técnicos relevantes, publicados nos últimos anos, para garantir atualização e contextualização teórica do tema. A seleção dos estudos

baseou-se na relevância para a temática, na qualidade metodológica e na contribuição para a compreensão crítica do problema. As informações extraídas construíram uma discussão sobre a viabilidade e eficácia do uso da tecnologia proposta, considerando sua aplicabilidade, sustentabilidade e impactos ambientais.

O estudo concentrou-se na contaminação da água de abastecimento público por pesticidas. Dado os impactos adversos desse composto para a saúde humana e o meio ambiente, a pesquisa investiga o potencial do reator solar CPC como solução inovadora para mitigar esse problema. Esse reator destaca-se pelo uso de superfícies refletoras parabólicas que concentram a radiação solar e potencializam reações fotocatalíticas. Quando associado ao processo Foto-Fenton, ele favorece a degradação de contaminantes emergentes, proporcionando uma solução sustentável e eficiente para a remoção de pesticidas.

A partir da revisão de literatura, foi realizada uma análise comparativa entre métodos convencionais e inovadores de tratamento de água. Esta análise considerou os desafios e oportunidades na implementação do reator solar CPC e a avaliação dos efeitos do Foto-Fenton na degradação de pesticidas. A interpretação crítica dos dados coletados permitiu identificar lacunas de conhecimento e sugerir possíveis caminhos para estudos futuros.

Os métodos adotados proporcionaram um aprofundamento na análise dos impactos que os pesticidas exercem sobre a qualidade da água, bem como na avaliação da viabilidade dos POAs em combinação com reatores solares do tipo CPC. Através da comparação entre distintas abordagens tecnológicas, a pesquisa contribuiu para o desenvolvimento de estratégias que sejam mais sustentáveis e eficazes no tratamento da água destinada ao abastecimento público, em consonância com as metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6) da Organização das Nações Unidas (ONU).

Assim, este estudo oferece fundamentação para investigações futuras e para a formulação de políticas públicas voltadas à melhoria da qualidade da água e à preservação dos recursos hídricos.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ODS 6 busca assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável para todas e todos, conta com metas que enfrentam desafios para serem alcançadas. Por meio da implantação do tratamento terciário e a implantação de processos oxidativos avançados nas estações de abastecimento de água, entende-se que é possível.

As metas 6.1 e 6.a ressaltam, respectivamente:

> **6.1 -** Até 2030, alcançar o acesso universal e equitativo à água potável e segura para todos (Onu, 2024).
> **6.a -** Até 2030, ampliar a cooperação internacional e o apoio à capacitação para os países em desenvolvimento em atividades e programas relacionados à água e saneamento, incluindo a coleta de água, a dessalinização, a eficiência no uso da água, o tratamento de efluentes, a reciclagem e as tecnologias de reuso (Onu, 2024).

Ambas as metas possuem como essência, a preservação, o acesso e o apoio a novas tecnologias para o alcance da água potável para toda a população. Assim, faz-se necessários investimentos em projetos para o assertivo cumprimento e efetividade das mesmas. No entanto, é fundamental realizar estudos detalhados para cada caso específico, a fim de otimizar o processo e garantir a sua viabilidade técnica e econômica.

A crescente preocupação com a presença de poluentes emergentes nas águas residuais e a limitada eficácia dos tratamentos convencionais têm estimulado a busca por tecnologias mais avançadas. Dentre essas, os processos oxidativos avançados, como o foto-Fenton, têm se mostrado promissores. Essa técnica combina a geração de radicais hidroxila por meio da eletroquímica com a ativação fotoquímica, resultando em uma maior eficiência na degradação de poluentes. A utilização da radiação solar como fonte de energia para a ativação fotoquímica torna o processo foto-eletro-Fenton solar uma alternativa ambientalmente amigável e economicamente atrativa.

O grande desafio para a aplicação dos POAs é a busca da eficiência com o menor custo e a radiação solar, por ser uma fonte de energia abundante e renovável, desempenha um papel crucial nos tratamentos oxidativos avançados. Por isso a utilização de um reator solar do tipo CPC visa a otimização econômica, tecnológica e

ambiental, a fim de usar a energia solar como fonte de radiação juntamente com o reagente Fenton.

A oferta de energia necessária para iniciar e acelerar reações químicas, a luz solar se torna uma ferramenta poderosa na degradação de poluentes em água principalmente quando associados aos reagentes de Fenton, que apresentam baixo custo em comparação a outros processos oxidativos.

O processo Foto-Fenton solar apresenta um grande potencial para a aplicação em larga escala no tratamento da água, oferecendo uma solução eficiente e versátil para a remoção de uma ampla variedade de contaminantes presentes na água de abastecimento público, principalmente herbicidas tais como o Roundup® (glifosato), muito utilizado no Brasil e que representa uma grande ameaça à saúde e ao meio ambiente. O Quadro 3 apresenta os prós e contras dos métodos de tratamentos da água e as abordagens dos POAs em cada limitação.

Quadro 4. Prós e contras dos métodos de tratamentos convencionais e as abordagens dos POAs.

Método de Tratamento	**Prós**	**Contras**	**Limitações com Glifosato**	**Abordagem dos POAs**
Coagulação / Floculação	Remove partículas suspensas	Pode não remover todos os contaminantes	Ineficaz para remoção do glifosato	Podem degradar contaminantes orgânicos resistentes
Sedimentação	Reduz a turbidez	Processo lento e não remove contaminantes dissolvidos	Não remove o glifosato	Atuam mais rapidamente e de forma eficaz
Filtração	Remove impurezas físicas	Não elimina contaminantes químicos	Não captura o glifosato	Podem degradar compostos químicos complexos
Cloração	Efetivo contra bactérias	Gera subprodutos prejudiciais	Pouco eficaz contra o glifosato	Não geram subprodutos prejudiciais
Desinfecção UV	Eficaz e sem subprodutos	Não possui efeito residual	Não degrada o glifosato	Complementam com poder oxidativo adicional

Ozonização	Remove odores e cores	Custo elevado e pode formar subprodutos	Parcialmente eficaz	Podem ser usados para oxidação sem subprodutos
Fotocatálise TiO_2 / UV	Alta eficiência na degradação de poluentes	Requer controle de pH e recuperação de catalisadores	Eficaz, mas pode requerer ajustes	Decompõe o glifosato usando radicais gerados pela luz UV
Fenton	Eficaz na degradação de poluentes orgânicos	Requer condições ácidas e gera lodo ferruginoso	Eficaz, mas gera resíduos	Forte oxidação que pode tratar glifosato de forma eficaz
Foto Fenton	Eficiente e sustentável com luz solar	Depende de condições climáticas	Altamente eficaz	Degrada o glifosato de forma eficaz e sustentável

Fonte: Adaptado de Malato, 2009; Zang, 2021.

Alguns autores como Castro (2015) e González-Pereyra (2022) sobre o tratamento de pesticidas utilizando reatores do tipo CPC evidenciam a eficácia e a inovação dessa abordagem em comparação com técnicas tradicionais de degradação de contaminantes. A utilização de reatores CPC tem se mostrado vantajosa, pois proporciona uma melhor exposição à luz e maximiza a área de superfície do fotocatalisador, promovendo reações de fotodegradação mais eficientes. Mas há desafios a serem superados, como custo, consumo de energia e requisitos de expertise**,** além da necessidade de avaliar cuidadosamente a compatibilidade com os processos existentes e os potenciais subprodutos. Logo, essas decisões devem ser tomadas com base em cada projeto e tratamento desejados.

A viabilidade do reator solar integrado à rede de abastecimento é viável por e demonstram sua eficácia na degradação de compostos como o glifosato, atingindo níveis compatíveis com padrões internacionais de qualidade da água. Esta tecnologia preenche lacunas deixadas por métodos convencionais de tratamento, que muitas vezes não conseguem remover micropoluentes emergentes (Cheng, 2023).

Gutiérrez-Capell, (2020 p. 101), em uma análise econômica realizada, destacou que:

> Os custos iniciais do sistema podem ser moderados; no entanto, a médio e longo prazo, são compensados pela redução no uso de produtos químicos convencionais e pela melhoria na saúde pública, diminuindo gastos associados a doenças relacionadas à exposição a contaminantes na água.

Adicionalmente, a utilização da energia solar como fonte de radiação reforça o compromisso com práticas de baixo impacto ambiental, alinhando-se aos princípios do desenvolvimento sustentável e ao cumprimento do ODS 6 da Agenda 2030 da ONU. A integração de tecnologias sustentáveis é essencial para enfrentar desafios ambientais contemporâneos (Zhao, 2022).

Esteban García, (2021, p. 7), em um estudo realizado com águas residuárias de uma vinícola, concluem que:

> O processo foto-Fenton utilizando energia solar provou ser altamente eficaz na mineralização e desintoxicação de águas residuais vinícolas reais produzidas durante o período de vinificação.

El-Gawad, (2024 p. 12), com base na análise detalhada conduzida no estudo referente ao tratamento de águas residuais provenientes da indústria têxtil, foi concluído que:

> Diferentemente de estudos anteriores, combinados os processos convencionais de pré-tratamento (sedimentação, triagem, adsorção) com um estágio otimizado de oxidação avançada foto-Fenton solar em um sistema unificado.
>
> Uma inovação fundamental é o uso de um novo reator coletor parabólico com diâmetro de tubo absorvedor aumentado, permitindo a captura eficiente da radiação solar em doses menores de catalisador — uma melhoria substancial em relação aos projetos convencionais.

A combinação de fotocatalisadores avançados, como óxido de titânio (TiO_2) dopado com metais ou carbono, em reatores CPC resulta em altas taxas de degradação de pesticidas, como glifosato. A pesquisa de Zhang (2021) mostrou que a modificação da superfície do TiO_2 aumentou significativamente sua atividade sob luz visível, permitindo a degradação completa do glifosato em condições controladas.

Ademais, a introdução de ozônio no sistema CPC pode potencializar ainda mais a degradação dos pesticidas. A combinação de ozônio e luz UV gera radicais livres que atacam moléculas orgânicas complexas, como mostrado no estudo de Rodríguez *et al*. (2020), que investigaram a degradação do clorpirifós no sistema híbrido de ozônio e fotocatálise.

A análise de parâmetros operacionais, como fluxo de água, intensidade da luz e concentração de pesticidas, é fundamental para otimizar o desempenho dos reatores. Em um estudo de otimização, Silva *et al*. (2022) exploraram a influência do fluxo de água na eficiência de degradação de pesticidas em reatores CPC, destacando a relevância desse fator para escalabilidade do processo.

Castro, (2015, p. 7) concluem que:

> A aplicação de foto-reator solar é uma alternativa promissora no tratamento de efluentes recalcitrantes, pois a utilização da energia solar, limpa e sem ônus, representa uma economia de gastos de operação.
> [...] o foto-Fenon apresentou ser uma alternativa promissora, possibilitando a reutilização de um efluente na planta industrial.

França, (2021, p. 10) em um estudo sobre a degradação de um efluente têxtil sintético utilizando os POAs Foto-Fenton Artificial e Foto-Fenton solar, destacam:

> Os processos de degradação utilizando Foto-Fenton assistido por luz artificial e solar apresentaram resultados satisfatórios, com destaque para radiação solar que mostrou melhor desempenho no parâmetro remoção de cor. O bom desempenho do reator solar do tipo CPC na degradação do corante Preto Biozol.
> O bom rendimento do processo utilizando luz solar durante o dia, comprova que esta é uma alternativa de tratamento com potencial promissor, apresentando vantagens de ordem econômica e ambiental, uma vez que pode minimizar prejuízos para o meio ambiente. Tal processo, deve sempre que possível, ter sua aplicação fomentada.

González-Pereyra, (2022, p. 13), mostraram que o método solar foto-Fenton surge como uma opção promissora para a descontaminação de efluentes da indústria têxtil e enfatizam que:

> A degradação e mineralização do alaranjado de metila foram realizadas com sucesso sob radiação solar por fotocatálise heterogênea e processos de foto-Fenton em um reator CPC. Nossos resultados mostram o foto-Fenton solar como o processo com maior projeção para escalonar o tratamento.

A remoção de microplásticos, que representa um dos grandes desafios do século XXI, viu nos POAs e nos reatores do tipo CPC uma abordagem de tratamento promissora para a degradação de polímeros, segundo Hand, (2022, p. 21):

> As técnicas de CPC são agora mais adequadas para uma configuração em escala piloto e além. O projeto e o aumento de escala de uma planta fotocatalítica para degradação de microplásticos com base em CPC são razoavelmente viáveis devido ao amplo conhecimento e experiência no desenvolvimento e implementação de CPCs com base em fotocatalítica em fotocatálise e engenharia solar térmica.

A literatura demonstra um avanço notável em relação à combinação de POAs com radiação solar para aprimorar a qualidade quantidade de água em favor das comunidades rurais. Abdul-Rahaman, (2024, p. 6) ressaltam que:

> A integração de técnicas de POAs com a luz solar melhora a eficiência do tratamento de água para o fornecimento de água potável segura para populações maiores. Ao fazer a integração, deve-se prestar atenção a fatores ambientais contextuais, como disponibilidade e intensidade da luz solar, projetos operacionais simples juntamente com múltiplas técnicas de POAs sem comprometer a eficiência do sistema tecnológico.

Ao avaliar a desinfecção de um efluente secundário de uma estação de tratamento de águas residuais, Arguillo-Barceló, (2013, p. 9), constatam que:

> Os tratamentos de foto-oxidação testados foram capazes de atingir o nível de desinfecção necessário para reduzir os riscos à saúde microbiana dos usuários e pareciam ser funcionais em relação ao tempo de tratamento necessário para atingir os limites regulatórios. Consequentemente, de um ponto de vista prático, esta é uma informação altamente valiosa ao decidir qual desses tratamentos é o mais viável para obter água recuperada segura.

Ainda, segundo Marcelino *et al.,* 2015, o uso de POAs não apenas reduz os custos relacionados à eletricidade, como também reduz os riscos de contaminações. Marcelino, (2015, p. 1) enfatizam que:

> É importante observar que o tempo de resistência do contaminante no reator é estabelecido de acordo com as variações na intensidade da radiação solar durante o dia e época do ano, incluindo as condições climáticas, para maximizar a eficiência do sistema no tratamento.

Em síntese, a eficácia e a versatilidade do reator CPC no tratamento de pesticidas, contaminantes emergentes e vários tipos de efluentes, apresenta ser uma alternativa viável para a gestão ambiental de resíduos químicos. A continuidade das investigações nessa área pode levar a soluções ainda mais inovadoras e eficazes para a descontaminação de ambientes impactados por pesticidas.

Apesar do sucesso obtido em alguns experimentos e projeções, é fundamental destacar que a ampliação dessa tecnologia para escala industrial requer adaptações à infraestrutura existente, treinamento de profissionais e o fortalecimento de políticas públicas que incentivem a adoção de processos tecnológicos modernos. Estas adaptações são cruciais para garantir uma transição suave e eficaz para o uso em larga escala (Syafiuddin, 2021).

De maneira adicional, uma análise do impacto ambiental e social dessa tecnologia proposta poderá quantificar a redução de resíduos químicos gerados e avaliará o potencial de aceitação pela população local. Tal aceitação é vital para o sucesso a longo prazo de inovações tecnológicas em contextos comunitários (Cheng, 2023)

Finalmente, a implementação do reator do tipo CPC ao tratamento da água de abastecimento poderá contribuir para a garantia do acesso à água potável de qualidade, a promoção da saúde pública e o desenvolvimento sustentável, promovendo um futuro mais saudável e próspero para todos. Este aspecto reforça a importância de investir em soluções inovadoras para desafios hídricos globais (Li, 2021).

Portanto, a implementação do reator solar no tratamento terciário das estações de tratamento de água não só é possível, mas também recomendada para promover um abastecimento hídrico seguro e sustentável (Zhang, 2023).

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa evidenciou as possibilidades e desafios do uso do reator solar associado aos processos oxidativos como uma solução inovadora e sustentável para o tratamento terciário em estações de abastecimento de água. A integração dessa tecnologia possibilita a remoção eficiente de contaminantes

emergentes, com destaque para o herbicida glifosato, que é amplamente utilizado na agricultura brasileira e apresenta riscos significativos à saúde humana e ambiental.

O reator solar utilizado baseia-se em tecnologia comprovada para desinfecção fotocatalítica e processos semelhantes, aproveitando a energia solar como fonte sustentável de radiação. Esta abordagem visa não apenas minimizar a necessidade de produtos químicos adicionais, mas também reduzir os custos operacionais a longo prazo, favorecendo a adoção de práticas ecologicamente responsáveis em larga escala.

A proposta para a implantação do reator do tipo CPC associado aos tratamentos oxidativos avançados – principalmente ao foto-Fenton - a rede de abastecimento, revelou ser tecnicamente e ambientalmente viável.

A implantação do reator solar no tratamento de água busca integrar-se harmoniosamente com processos já existentes nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), garantindo compatibilidade e eficiência sem a geração de subprodutos indesejados. Os desafios associados à implementação, como o custo inicial e as exigências técnicas, são equilibrados pelos benefícios de uma solução limpa e eficaz, vital para garantir a segurança hídrica em um cenário de crescente demanda ambiental.

Este método de tratamento tem o potencial de revolucionar o abastecimento de água, promovendo saúde pública e avanço dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estipulados pela ONU, especificamente ao cumprimento do ODS 6 da Agenda 2030.

Apesar do sucesso obtido em alguns experimentos e projeções dos estudos apresentados, é fundamental destacar que a ampliação dessa tecnologia para escala industrial requer adaptações à infraestrutura existente, treinamento de profissionais e o fortalecimento de políticas públicas que incentivem a adoção de processos tecnológicos modernos, além de estudos de viabilidade ambiental, uma vez que desafios como custos iniciais, monitoramento constante e exigências técnicas para a operação do reator devem ser cuidadosamente abordadas para garantir a eficiência e a aceitação da tecnologia.

Em conclusão, a pesquisa confirma que os processos oxidativos avançados utilizando reatores solares para remoção de pesticidas não só representam uma ferramenta eficaz na gestão da qualidade da água, mas também

um caminho promissor para ampliar o acesso universal à água potável segura, garantindo a saúde pública e preservando os recursos hídricos em um cenário de crescente demanda por soluções ambientais inovadoras.

O uso de reatores solares do tipo CPC apresenta um potencial significativo para inovação e contribuição para a sustentabilidade ambiental. No entanto, enfrenta desafios metodológicos e de aplicabilidade que devem ser cuidadosamente considerados e abordados para maximizar seu impacto e relevância. Espera-se que este estudo inspire novas pesquisas e contribua para avanços científicos e tecnológicos no campo do saneamento ambiental.

REFERÊNCIAS

ABDUL-RAHAMAN A., SIMON A. A., MARION M. Systematic review of the effects of advanced oxidation processes integration with solar water disinfection for improved drinking water production. **Waste Management Bulletin**. v. 1, Issue 4. 2024.

AGULLÓ-BARCELÓ, M.I. POLO-LÓPEZ, F. LUCENA, J. JOFRE, P. FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ. Solar Advanced Oxidation Processes as disinfection tertiary treatments for real wastewater: Implications for water reclamation**, Applied Catalysis B. Environmental,** Volumes 136–137, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.01.069. Acesso em: 20 jan. 2025.

ALMEIDA NETO, M. G.; REIS, R. B. S. Agrotóxicos em água para o consumo humano: revisão de literatura. Id on Line **Revista Multidisciplinar e de Psicologia**, [Jan./2017], v. 10, n. 33, p. 274-282. ISSN 1981-1179.

AMARANTE JÚNIOR, O. P. DE, SANTOS, T. C. R. DOS, BRITO, N. M., & RIBEIRO, M. L. (2002). Métodos de extração e determinação do herbicida glifosato: breve revisão. **Química Nova,** n. 3 v. 25, 420–428. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000300015. Acesso em: 22 jan. 2025.

ANDREOZZI, R.; CAPRIO, V.; INSOLA, A.; MAROTTA, R. Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. Catalysis Today, v. 53, n. 1, p. 51-59, 1999. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00126-2. Acesso em: 01 fev. 2025.

BERTUZZO, T. BREGOLIN, O uso de agrotóxicos e a pulverização aérea no Brasil: a conjuntura dos desastres e as consequências de um acordo comercial entre União Europeia e Mercosul. In: Debater a Europa. Coimbra University Press, 2022-2023.

BOMBARDI, L. M. **Geografia do uso de agrotóxicos no Brasil e conexões com a União Europeia.** 2017.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o [texto da portaria] para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, n. 85, p. 127, 4 maio 2021.

BRITO, N. N.; SILVA, V. B. M. Processo oxidativo avançado e sua aplicação ambiental. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil, n. 3, 2012.

BURSZTEJN, S.; BENETTI, A. D. Monitoramento de agrotóxicos em sistemas de abastecimento de água: uma análise comparada entre a Portaria nº 888/2021 e as diretivas internacionais. Revista Águas Subterrâneas, 2023.

CASTRO, L. A. S. et al. Foto-reator solar para remoção de poluentes e desinfecção de água: critérios de projeto e montagem. Bluncher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n. 2, p. 9441-9449, 2015.

CHENG, X. et al. Recent advances in solar-driven photo-Fenton processes for water purification. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 11, n. 1, p. 107123,

2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107123. Acesso em: 20 set. 2024.

COLETTI, T. Ninguém diga “desta água não beberei”: produção agropecuária e contaminação hídrica no Oeste Catarinense, Brasil. Cadernos de Saúde Pública, 2022, v. 38, n. 4, e00165421. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0102-311X00165421. Acesso em: 11 ago. 2024.

COMISSÃO TÉCNICA NACIONAL DE BIOSSEGURANÇA. Parecer técnico nº 739/2023/SEI-CTNBio. Parecer técnico: 8565/2023. Disponível em: <https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/gmfp/docs/Commercial%20release%208565-2023.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2024

CRUZ, N.; MIERZWA, J. C. Saúde pública e inovações tecnológicas para abastecimento público. Saúde em Debate, São Paulo, v. 29, n. 1, e180824, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1590/s0103-11042020000100024. Acesso em: 12 jan. 2025

CUNHA, J. R. Agrotóxicos em águas de abastecimento: um diagnóstico sistematizado da porção mineira da bacia do rio São Francisco. 2023.

CUNHA, L. N.; SOARES, W. L. Os incentivos fiscais aos agrotóxicos como política contrária à saúde. Cadernos de Saúde Pública, 2020.

CRUZ-RIZO, A.; GUTIÉRREZ-GRANADOS, S.; SALAZAR, R.; PERALTA-HERNÁNDEZ, J. M. Application of electro-Fenton/BDD process for treating tannery wastewaters with industrial dyes. Separation and Purification Technology, v. 172, p. 296-302, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.08.029. Acesso em 01 fev. 2025

DA HORA MACHADO, A. E. et al. Solar photo-Fenton treatment of chip board production wastewater. Solar Energy, v. 77, n. 5, p. 583-589, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.06.004. Acesso em: 20 set. 2024.

EL-GAWAD, H. A.; GHALY, M. Y.; HUSSIENY, N. F. et al. Novel collector design and optimized photo-Fenton model for sustainable industry textile wastewater treatment. Scientific Reports, v. 14, n. 8573, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-024-58610-w. Acesso em: 29 jan. 2025.

FARTO, C. D.; ATHAYDE JÚNIOR, G. B.; SENA, R. F.; ROSENHAIM, R. Contaminantes de preocupação emergente no Brasil na década 2010-2019 – Parte II: tecnologias de tratamento e eficiências de remoção em ETES e ETAS. Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 18, e7, 2021.

FENG, D.; SORIC, A.; BOUTIN, O. Treatment technologies and degradation pathways of glyphosate: a critical review. Science of The Total Environment, v. 742, 140559, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140559. Acesso em: 29 jan. 2025.

FENTON, H. J. H. Oxidation of tartaric acid in the presence of iron. Journal of the Chemical Society, Transactions, v. 65, p. 899-910, 1894. Disponível em: https://doi.org/10.1039/CT8946500899. Acesso em: 15 jun. 2024.

FORTI, J. C. et al. Toxicidade de pesticidas em ambiente aquático após aplicação de tratamentos oxidativos via reator solar. 2021.

FRANÇA, A. A. P. C. et al. Degradação de efluente têxtil sintético utilizando os processos oxidativos avançados foto-fenton artificil e foto-fenton solar. Revista Virtual Química, 2021, 13 (2), 335-346.

FUNDAÇÃO HEINRICH BÖLL. Atlas dos agrotóxicos: fatos e dados sobre agrotóxicos na agricultura 2023 / organização: Marcelo Montenegro, Julia Dolce. – Rio de Janeiro: Fundação Heirich Böll, 2023. p.68: il.., color. ISBN: 978-65-87665-17-7.

GARCÍA, A. B. E. et al. Treatment of laundry wastewater by solar photo-Fenton process at pilot plant scale. Environmental Science and Pollution Research, v. 28, p. 8576-8584, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11356-020-11151-x. Acesso em: 12 jan. 2025.

GARCÍA-SEGURA, S.; OCON, J. D.; CHONG, M. N. Electrochemical oxidation remediation of real wastewater effluents—a review. Process Safety and Environmental Protection, v. 113, p. 48-67, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.10.011. Acesso em: 12 jan. 2025.

GIMÉNEZ, J.; CURCÓ, D.; QUERAL, M. A. Photocatalytic treatment of phenol and 2, 4-dichlorophenol in a solar plant in the way to scaling-up. Catalysis Today, v. 54, n. 2-3, p. 229-243, 1999.

GONZÁLEZ-PEREYRA, D. et al. Dye degradation by heterogeneous and homogeneous photocatalysis processes. A scaled-up approach for a CPC solar reactor. **Topics in Catalysis**, v. 65, n. 9, p. 1062-1070, 2022.

GUILLARD, C. et al. Eficiência solar de um novo fotocatalisador de titânia depositado: aplicações de clorofenol, pesticidas e remoção de corantes. Catálise Aplicada B: Ambiental, v. 2, p. 319-332, 2003.

GUTIÉRREZ-CAPELL, C. et al. Recent advances in photo-Fenton reaction for water treatment: a review. Water Research, v. 188, 116513, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116513. Acesso em: 10 fev. 2025.

HAMD W., DAHER ELIE A0, TOFA T. S., DUTTA J. Recent Advances in Photocatalytic Removal of Microplastics: Mechanisms, Kinetic Degradation, and Reactor Design. Frontiers in Marine Science, vol 9. 2022. DOI=10.3389/fmars.2022.885614. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2022.885614. Acesso em: 10 fev. 2025.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma

análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2019. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/aguas-subterraneas-e-saneamento-basico/>. Acesso em: 05 mar. 2024.

IGUAL, S. D.; HARTWING, S. V.; IGNOTTI, E. Tendência das taxas de mortalidade por câncer e o do consumo de glifosato no Brasil. Research, Society and Development, v. 9, n. 11, e84891110263, 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i11.10263. Acesso em 10 fev. 2025.

KLINGELHÖFER, D.; BRAUN, M.; BRÜGGMANN, D. et al. Glyphosate: How do ongoing controversies, market characteristics, and funding influence the global research landscape? Science of the Total Environment, v. 765, p. 144271, 2021. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144271

LI, W. et al. Advances in photo-Fenton oxidation for water treatment: a comprehensive review. Chemosphere, v. 277, 130231, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130231. Acesso em: 05 mar. 2024.

LOPES, C. V. A.; ALBUQUERQUE, S. C. A. Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. Saúde Debate, v. 42, n. 117, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0103-1104201811714. Acesso em: 10 jun. 2024.

LUO, R.; WU, C. Pesticides: Environmental Exposure, Toxicity, and Mechanism. In: ZHANG, Y. (Ed.). Emerging Chemicals and Human Health. Singapore: Springer, 2019. cap. 7, p. 85-93. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9535-3_7. Acesso em: 10 fev. 2025.

MARCELINO, R.B.P., QUEIROZ, M.T.A., AMORIM, C.C. *et al.* Solar energy for wastewater treatment: review of international technologies and their applicability in Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 22, 762–773 (2015). Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11356-014-3033-2. Acesso em: 29 jan. 2025.

MACHADO, F.; TEIXEIRA, A. C. S. C.; RUOTOLO, L. A. M. Revisão crítica dos processos de tratamento de águas residuais Fenton e Photo-Fenton nas últimas duas décadas. Jornal Internacional de Ciência e Tecnologia Ambiental, 2023.

MACHADO, F.; TEIXEIRA, A. C. S. C.; RUOTOLO, L. A. M. Revisão crítica dos processos de tratamento de águas residuais Fenton e Photo-Fenton nas últimas duas décadas. Jornal Internacional de Ciência e Tecnologia Ambiental, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s40726-022-00365-6. Acesso em: 29 jan. 2025.

MAFFESSONI, D. Avaliação da eficiência de coletor parabólico composto para remoção de moxifloxacino de água. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

MALATO, S.; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, P.; MALDONADO, M. I.; BLANCO, J.; GERNJAK, W. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends. Catalysis Today, v. 147, n. 1, p. 1-59, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.07.005. Acesso em: 29 jan. 2025.

MALATO, S.; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, P.; MALDONADO, M. I.; OLLER, I.; POLO-LUQUE, M. L. Applied studies in solar photocatalytic detoxification: an overview. Solar Energy, v. 84, n. 9, p. 1443-1460, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.04.017. Acesso em: 29 jan. 2025.

MALATO, S. et al. Nova grande planta fotocatalítica solar: configuração e resultados preliminares. Quim. Nova, v. 25, n. 3, p. 235-240, 2002.

MARQUES, L. Capitalismo e colapso ambiental. 3. ed. rev. ampl. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2018.

MEFTAUL, I. M. D. et al. Controversies over human health and ecological impacts of glyphosate: Is it to be banned in modern agriculture? Environmental Pollution, v. 263, 114372, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114372. Acesso em: 29 jan. 2025.

MONTAGNERA, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABA, R. I. D. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. Química Nova, v. 40, n. 9, p. 1094-1110, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170091. Acesso em: 29 jan. 2025.

MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABA, R. D. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. Química Nova, v. 40, n. 9, p. 1094-1110, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170091. Acesso em: 20 mar. 2024.

NACANO, B. R. M.; CONVENTO, M. B.; OLIVEIRA, A. S.; CASTINO, R.; RAZVICKAS, C. V.; BONDAN, E.; BORGES, T. F. Efeitos do herbicida glifosato nos rins. Brazilian Journal of Nephrology, v. 46, n. 2, e20230043, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1590/2175-8239-2023-0043. Acesso em: 20 ago. 2024.

NOGUEIRA, R. F. P.; GUIMARÃES, J. R.; DE ANDRADE, A. R. Degradation of nitrobenzene by electrochemical hydrogen peroxide generation. Environmental Science & Technology, v. 31, n. 4, p. 1477-1483, 2013.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos do desenvolvimento sustentável. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 6 jun. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 6 jun. 2024.

PARRA, W. S. Análise dos processos de eletro-oxidação simples e foto-assistido usando ânodo de mistura de óxidos metálicos comercial em meio alcoólico e atrazina como composto modelo. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PALMA; LOURENCETTI. Agrotóxicos em água e alimentos: risco à saúde humana. Revista UNIARA, v. 14, n. 2, dez. 2011.

PAULA, I. X.; FORMIGA-JOHNSON, R. M. Segurança hídrica para abastecimento urbano perante condições ambientais e qualidade da água do manancial: o caso da ETA Guandu, RMRJ. 2023.

PEREIRA, B. F. M.; ALVES, B. M.; MEDEIROS, M. P.; PEREIRA, R. M. Contaminação no lençol freático, rios, lagos e lagoas do Brasil por agrotóxicos. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, São Paulo, v. 8, n. 7, jul. 2022.

PERES, F.; MOREIRA, J. C. É veneno ou é remédio? Agrotóxicos, saúde e ambiente. Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 2003. 384 p. ISBN 85-7541-031-8.

PIGNATELLO, J. J.; OLIVEROS, E.; MACKAY, A. Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 36, n. 1, p. 1-84, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1080/10643380500360671. Acesso em: 6 jun. 2024.

PINTO, A. M.; RIBAS, L. M. O direito humano à água e ao saneamento sob a perspectiva do estado constitucional cooperativo de Peter Häberle. Revista da Água, 2022.

POZZETTI, V. C. Alimentos transgênicos e o direito do consumidor à informação. Revista Jurídica Unicuritiba, v. 3, n. 36, 2014.

POZZETTI, V. C.; FONSECA, M. C. B.; ZANBRANO, V. Revolução verde e retrocesso ambiental. Revista Catalana de Dret Ambiental, vol. XII, núm. 1, p. 1-27, 2021.

RAMAKRISHNAN, A.; BLANEY, L.; KAO, J. et al. Contaminantes emergentes em chorume de aterro e seu gerenciamento sustentável. Environmental Earth Sciences, v. 73, p. 1357-1368, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12665-014-3489-x. Acesso em: 10 set. 2024.

RICHARDSON, J. R.; FITSANAKIS, V.; WESTERINK, R. H. S. et al. Neurotoxicity of pesticides. Acta Neuropathologica, v. 138, p. 343-362, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00401-019-02033-9. Acesso em: 10 set. 2024.

RODRÍGUEZ-PENA, M.; NATIVIDAD, R.; BARRERA-DÍAZ, C. E.; HERNÁNDEZ, P. B.; RAMÍREZ, C. I. A.; ROA-MORALES, G. Current perspective of advanced electrochemical oxidation processes in wastewater treatment and life cycle analysis. International Journal of Electrochemical Science, v. 19, 100589, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s40726-022-00365-6. Acesso em: 12 jan. 2025.

RODRÍGUEZ, J. et al. Application of ozone-assisted photocatalysis for the degradation of chlorpyrifos: a novel approach. Journal of Hazardous Materials.

SABESP. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Tratamento de água. Fases do tratamento. Disponível em: https://www.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=47. Acesso em: 7 jul. 2024.

SANTOS, R. M. S.; NASCIMENTO, R. F.; CARVALHO FILHO, J. A. A.; SILVA, L. C.; PAIVA, A. L. R. Contaminação dos recursos hídricos por micropoluentes emergentes e os possíveis métodos de tratamento para sua remoção. Journal of Environmental Analysis and Progress, v. 8, n. 2, p. 070-085, 2023.

SANTOS, L. G.; SILVA, D. M. A meta 6.1 da Agenda 2030 da ONU frente ao direito fundamental de acesso à água potável no Brasil. Revista do Instituto de Direito Constitucional e Cidadania – IDCC, Londrina, v. 7, n. 1, e049, jan./jun. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.48159/revistadoidcc.v.7n1.e049. Acesso em: 07 jun. 2024.

SATTLER, C. et al. Desintoxicação solar fotocatalítica de água de efluentes de fábricas de papel. Energia, v. 29, n. 5-6, p. 835-843, 2004.

SILVA, M.; SILVA, A. I.; SODRÉ, F. Direito humano à água, promoção da saúde e desigualdades de acesso: contribuições para o debate. Enciclopédia Biosfera, Março de 2022, v. 19, n. 39.

SILVA, R. et al. Operational parameters in the photocatalytic degradation of pesticides using CPC reactors. Chemical Engineering Journal.

SISÁGUA. Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano. 2022. Disponível em: https://sisagua.saude.gov.br/sisagua/login.jsf. Acesso em: 02 nov. 2024.

SOUZA, E. G. J. Agrotóxicos na água potável: considerações sobre os municípios da bacia hidrográfica do rio Itabapoana. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, 2021.

SOUSA, R. Á. D.; PEREIRA, L. A. Agronegócio e agrotóxico: uma parceria para o (in)sucesso da produção de alimentos. 2019.

SYAFIUDDIN, A. et al. A comprehensive review on advanced oxidation processes for the removal of contaminants and pollutants from wastewater. Process Safety and Environmental Protection, v. 146, p. 34-54, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.011. Acesso em: 9 jan. 2025.

TENDLER, S. O veneno está na mesa. Filme. São Paulo: Escola Politécnica de Saúde, 2014.

TRAPIDO, M.; EPOLD, I.; BOLOBAJEV, J.; DULOVA, N. Emerging micropollutants in water/wastewater: growing demand on removal technologies. Environmental Science and Pollution Research, v. 21, n. 21, p. 12217-12222, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11356-014-3020-7. Acesso em: 13 ago. 2024.

TUDI, M.; RUAN, D.; WANG, L.; LYU, J.; SADLER, R.; CONNELL, D.; CHU, C.; PHUNG, D. T. Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 18, n. 3, 1112, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ijerph18031112. Acesso em: 13 ago. 2024.

UNESCO. (2023). Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2023: Parcerias e cooperação para a água. Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO). Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384657. Acesso em: 10 mar. 2024.

VALE, R. L.; SILVA, S. S.; ANDRADE, E. M. G.; OLIVEIRA, J. P. M.; MARACAJÁ, P. B. Diagnóstico do potencial de contaminação de águas subterrâneas por agrotóxicos aplicados na agricultura do entorno do reservatório São Gonçalo – PB. 2015. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável.

VETTORELLO, G.; BRANDT, V. V.; DALLAZEN, M. C.; KUHN, D.; ETGETON, H. P.; SPELLMEYER, J. G.; CARLESSO, W. M.; HOEHNE, L. Micropoluentes em água – o novo desafio emergente. Revista Caderno Pedagógico, v. 14, n. 1, p. 72-83, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.22410/issn.1983-0882.v14i1a2017.1410. Acesso em: 11 jan. 2025.

VICENTINI, T. A. Respostas morfoanatômicas e fisiológicas de duas espécies arbóreas sob deriva simulada do herbicida glifosato. 2023.

XIONG, Y. et al. Efficient degradation of glyphosate by photo-Fenton process: mechanism and kinetic model. Journal of Water Process Engineering, v. 38, 101647, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101647. Acesso em: 11 ago. 2024.

YI-DI, C.; XIAOGUANG, D.; XU, Z.; RUPENG, W.; SHAOBIN, W.; NAN-QI, R.; SHIH-HSIN, H. Advanced oxidation processes for water disinfection: features, mechanisms and prospects. Chemical Engineering Journal, v. 409, 128207, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128207. Acesso em: 11 ago. 2024.

ZHANG, M. et al. A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. Science of the Total Environment, v. 670, p. 110-121, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.180. Acesso em: 11 ago. 2024.

ZHANG, S. et al. Solar photocatalysis for water decontamination: an overview and future perspectives. Environmental Science & Technology, v. 57, n. 3, p. 1200-1214, 2023.

ZHANG, Y. et al. Enhanced photocatalytic degradation of glyphosate under visible light using carbon-doped TiO2. Environmental Science & Technology.

ZHAO, H. et al. Recent developments of advanced oxidation processes in water treatment: a review. Water Research, v. 211, 118071, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118071. Acesso em: 15 jan. 2025.