



**UEPB**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS I - CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**AMANDA LETICIA OLIVEIRA SILVA**

**DEGRADAÇÃO DE IVERMECTINA UTILIZANDO O PROCESSO DE  
FOTOCATÁLISE HOMOGÊNEA**

**CAMPINA GRANDE - PB  
2022**

AMANDA LETICIA OLIVEIRA SILVA

**DEGRADAÇÃO DE IVERMECTINA UTILIZANDO O PROCESSO DE  
FOTOCATÁLISE HOMOGÊNEA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de bacharela em Engenharia Sanitária e Ambiental.

**Área de concentração:** Engenharias.

**Orientador:** Profa. Dra. Geralda Gilvânia Cavalcante de Lima

**CAMPINA GRANDE - PB  
2022**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S586d Silva, Amanda Letícia Oliveira.  
Degradação de Ivermectina utilizando o processo de fotocatalise homogênea [manuscrito] / Amanda Letícia Oliveira Silva. - 2022.  
43 p. : il. colorido.

Digitado.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia , 2022.  
"Orientação : Profa. Dra. Geralda Gilvânia Cavalcante de Lima , Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Micropoluentes. 2. Fármacos. 3. Ivermectina. 4. Degradação ambiental. 5. Processos oxidativos avançados - POAs. I. Título

21. ed. CDD 628.162

AMANDA LETICIA OLIVEIRA SILVA

DEGRADAÇÃO DE IVERMECTINA UTILIZANDO O PROCESSO DE  
FOTOCATÁLISE HOMOGÊNEA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de bacharela em Engenharia Sanitária e Ambiental.

**Área de concentração:** Engenharias.

Aprovada em: 19/07/2022

**BANCA EXAMINADORA**



---

Profa. Dra. Geralda Gilvânia Cavalcante de Lima  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)  
(Orientadora)



---

Profa. Dra. Neyliane Costa de Souza  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



---

Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que sempre esteve comigo, me mantendo firme em cada passo e me fazendo acreditar que cada coisa tem sua hora, e cada hora, o seu cuidado.

Aos meus pais, Afonso e Fátima, por todo suporte que recebi e por terem acreditado no meu esforço para concluir este curso. Vocês contribuíram para minha construção profissional.

Aos meus irmãos, Fernanda e Alex, por terem me encorajado muitas vezes e terem acreditado que a caçula da casa se tornaria engenheira.

Aos meus sobrinhos, Luiz, Samuel e Titto que mesmo sem notarem, muitas vezes foram minha força e minha calma em meio aos desafios.

A minha avó Maria José e meu primo Wallisson, que acompanharam todo esse caminho e me deram força.

A Antônio e Luan, que me acolheram na pesquisa logo no início do curso, sendo voluntária da iniciação científica. E a Carolina Miranda, que sempre foi acessível e me auxiliou diversas vezes. Vocês me incentivaram bastante e sou muito grata por isso.

As minhas colegas de curso, Bianca e Marizabel, que compartilharam várias experiências e desafios junto a mim. Vocês foram muito importantes na minha trajetória acadêmica e continuarão sendo.

Aos colegas Daniel Bezerra, Cléo Kaluaná, Ayrton Natthan, Amanda Myrna e Zenilda Garcia que sempre estiveram presentes na vida acadêmica. Vocês estão no meu coração.

As colegas de pesquisa do LAPECA que contribuíram ao longo desse tempo, por meio debates e orientações para o desenvolvimento desta pesquisa. A pesquisa se tornou mais fácil compartilhando os dias com vocês.

Aos colegas do LARTECA que me deram suporte necessário para utilização do espaço, materiais e equipamento necessário para finalizar minha pesquisa.

Aos colegas do CAESA que se fizeram presente na maior parte do curso, compartilhando bons momentos de aprendizado e de diversão.

As minhas amigas Alanna, Ana Luiza e Brenda que sempre estiveram comigo me dando o apoio necessário e me encorajando em cada vivência acadêmica. Que bom que a distância física nunca foi um obstáculo muito grande para nossa amizade.

As minhas psicólogas, em especial, Júlia Vintilia que foi essencial para o meu desenvolver acadêmico e pessoal. Muito obrigada por ter estado comigo em tantos processos e por ter sido bastante acessível.

À minha coorientadora, Deyse, que me orientou em cada passo da pesquisa colocando dedicação, paciência e empenho em cada etapa. Você se tornou indispensável e agradeço demais por ter contribuído tanto, não só para minha formação acadêmica, mas também pessoal.

À minha orientadora, Profa. Gilvânia, por ter me acolhido na pesquisa por dois anos seguidos e aceitado me orientar no meu trabalho final. Agradeço a senhora por ter confiado em mim e ter me incentivado ao decorrer desses anos.

Aos professores do curso de Engenharia, em especial a professora Neyliane, que me acolheu logo no início em seus projetos de pesquisa. E aos funcionários desde o setor de limpeza até os departamentais, em especial Cláudia e Alisson, que me auxiliaram em cada demanda solicitada.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta e indiretamente para minha formação profissional. Sou muito grata por cada pessoa que atravessou minha vida e por cada coisa vivida. Posso dizer que chegar até aqui com a ajuda de vocês ainda foi difícil, mas sem ela, seria impossível.

*“nosso trabalho deve preparar a próxima geração de mulheres para nos superar em todas as áreas, esse é o legado que vamos deixar.”*

Rupi Kaur

## RESUMO

A presença de compostos farmacêuticos em ambientes aquáticos despertou interesse na área da pesquisa nos últimos tempos, visto que esses produtos podem atingir o meio ambiente como compostos parentais ou metabólitos inalterados. Quando eles são liberados no meio ambiente, são transportados e distribuídos na água, no sedimento, e até mesmo no solo. No mundo todo tem sido reportado a ocorrência de substâncias como antibióticos, anti-helmínticos, hormônios, anestésicos, antilipêmicos, depressivos e anti-inflamatórios, em efluentes de estações de tratamento de esgotos (ETE's), estações de tratamento de águas de abastecimento (ETA's) e em outras matrizes ambientais em concentrações na faixa de ng/L. A ivermectina faz parte de um dos grupos farmacêuticos que compreendem um amplo espectro de diferentes estruturas e moléculas químicas, denominado anti-helmínticos. Ela é amplamente utilizada na medicina humana e veterinária, individualmente ou em combinação. Objetivando contribuir com a melhoria de saúde da população, esta pesquisa propôs a aplicação e avaliação dos Processos Oxidativos Avançados (POA's), usando a fotocatalise homogênea em dois modelos de fotoreatores, buscando a otimização do processo para a degradação da Ivermectina, haja vista seu potencial altamente poluidor. Os POA's envolvem a geração de radicais hidroxilas ( $\bullet\text{OH}$ ), os quais são altamente oxidantes e destroem as moléculas orgânicas presentes em águas contaminadas. Com isso, pode-se dizer que os objetivos dessa pesquisa foram alcançados com êxito, pois, em termos de otimização do processo, foi possível obter uma taxa de degradação de 78,60% observando a influência do pH e a concentração de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) estudada.

**Palavras-Chave:** Micropoluentes. Fármaco. Ivermectina. POA.

## ABSTRACT

The existence of pharmaceutical chemicals in aquatic ecosystems has recently sparked attention in the field, as these products can enter the environment as parent compounds or as unprocessed metabolites. They are carried and disseminated through water, sediment, and even soil when discharged into the environment. Antibiotics, anthelmintics, hormones, anaesthetics, antilipemics, depressants, and anti-inflammatory medications have been found at concentrations in the ng/L range in effluents from sewage treatment plants (ETE's), water supply treatment plants (ETA's), and other environmental matrices worldwide. Ivermectin is a member of the pharmacological class known as anthelmintics, which includes a wide range of chemical structures and compounds. It is frequently utilized in human and veterinary medicine, either alone or in combination. This study proposes the use and assessment of Advanced Oxidative Processes (AOP's) employing homogeneous photocatalysis in two separate photoreactors, with the goal of optimizing the process for the degradation of Ivermectin, given its high pollutant potential. The AOP's produce hydroxyl radicals ( $\bullet\text{OH}$ ), which are highly oxidizing and degrade organic compounds in polluted water. Thus, it can be stated that the objectives of this research were met because, in terms of process optimization, a degradation rate of 78.60% was obtained, observing the influence of pH and the concentration of hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ).

**Keywords:** Micropollutants. Drug. Ivermectin. POA

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Rotas de contaminação e exposição humana aos fármacos e desreguladores endócrinos .....	16
Figura 2 - Fórmula estrutural da Ivermectina.....	17
Figura 3 - Representação esquemática do reator de câmara .....	23
Figura 4 - Representação esquemática do reator de chicanas .....	24
Figura 5 - Espectro de absorção da IVM em diferentes concentrações ( $\lambda_{\text{máx}} = 246$ nm).....	28
Figura 6 - Curva da concentração de ivermectina versus absorbância.....	30
Figura 7 - Verificação da melhor concentração de $\text{H}_2\text{O}_2$ .....	31
Figura 8 - Influência do pH .....	33
Figura 9 - Análise da degradação de IVM nos reatores de câmara e de chicanas .....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistemas típicos de processos oxidativos avançados.....	20
Tabela 2 - Dados para a curva analítica padrão para análise da IVM.....	29
Tabela 3 - Condições de verificação da influência do pH.....	32
Tabela 4 - Média dos valores de absorbância em diferentes condições de pH....	32
Tabela 5 - Análise e verificação da melhor condição de remoção da IVM .....	33
Tabela 6 - Ensaio da remoção da IVM com o fotoreator de câmara .....	34
Tabela 7 - Dados complementares do reator de câmara .....	34
Tabela 8 - Ensaio da remoção da IVM com o fotoreator de chicanas .....	35
Tabela 9 - Dados complementares do reator de chicanas .....	35

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

HCl	Ácido clorídrico
H <sub>2</sub> O	Água
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
ETA	Estação de tratamento de água
ETE	Estação de tratamento de esgoto
NaOH	Hidróxido de sódio
IVM	Ivermectina
O <sub>3</sub>	Ozônio
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /UV	Peroxidação assistida por radiação UV
POA	Processo oxidativo avançado
UV	Radiação ultravioleta
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peróxido de hidrogênio
•OH	Radical hidroxila
pH	Potencial hidrogeniônico
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Sulfito de sódio
HO <sub>2</sub> •	Hidroperoxila
UV-C	Lâmpada germicida

# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
2.1 Objetivo geral .....	14
2.2 Objetivos específicos .....	14
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
3.1 Fármacos no meio ambiente .....	15
3.1.1 <i>Ivermectina</i> .....	17
3.2 Problemas associados ao efluente não tratado.....	18
3.3 Processos oxidativos avançados .....	19
3.3.1 <i>Fotocatálise homogênea H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV</i> .....	21
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>23</b>
4.1 Fotoreatores .....	23
4.1.1 <i>Reator de Câmara</i> .....	23
4.1.2 <i>Reator de Chicanas</i> .....	24
4.2 Preparação do efluente sintético .....	24
4.3 Varredura – espectro de absorção da ivermectina e construção da curva de calibração.....	25
4.4 Ensaio H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /UV .....	26
4.4.1 <i>Reator de câmara</i> .....	26
4.4.2 <i>Reator de chicanas</i> .....	27
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>28</b>
5.1 Determinação da Ivermectina .....	28
5.1.1 <i>Curva de calibração da IVM</i> .....	29
5.2 Avaliação da influência da concentração de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	30
5.3 Avaliação da influência do pH .....	31
5.4 Otimização do sistema operacional.....	34
5.5 Tempo de irradiação .....	36
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>38</b>
<b>APÊNDICE A - ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DA MELHOR CONCENTRAÇÃO DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b> .....	<b>43</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um fator importante na saúde pública são os problemas de saneamento básico, os quais estão relacionados diretamente com as doenças de veiculação hídrica, como: cólera, amebíase, giardíase, febre tifóide, hepatite infecciosa entre outras (BRASIL, 2014).

Além do mais, algumas pesquisas alertam sobre os efeitos adversos de várias substâncias químicas nos ecossistemas aquáticos, por efluentes contendo substâncias tóxicas de origem doméstica, industrial, de hospitais, de clínicas e de aterros sanitários. E como afirma Ayoub *et al* (2019), tais efluentes podem ser lançados nos corpos hídricos sem tratamento, ou provenientes de estações de tratamento com tecnologias ineficientes para redução de substâncias químicas.

À vista disso, sabe-se que o alto consumo de fármacos pela população é um dos principais responsáveis pela introdução dos contaminantes emergentes. De acordo com Grosseli (2016), foi identificado recentemente que diversos contaminantes emergentes estão dispostos no ambiente e faz-se necessário detectar a ocorrência desses micropoluentes, entender as vias de contaminação e o destino final, afim de buscar soluções para mitigar essa problemática.

Dentre os demais fármacos existentes, tem-se a ivermectina que é um anti-helmíntico muito utilizado na medicina humana e veterinária, e por assim ser, é amplamente encontrado em águas residuárias. Molento (2020), enfatiza que é um fármaco tão conhecido e utilizado que foi elevado ao patamar de químicos muito famosos no âmbito farmacêutico.

Embora as concentrações de fármacos como a ivermectina sejam muito baixas, ainda assim podem ser potencialmente prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. Segundo Horvat *et al.* (2012), a exposição a vários medicamentos, ainda que em baixas concentrações, dispostos no ambiente, pode ser o ponto de partida para o desenvolvimento de cepas resistentes de bactérias.

Com isso, faz-se necessário desenvolver estudos na área de processos oxidativos avançados, os quais se baseiam na geração de radicais hidroxilas como agente oxidante, que são tecnologias capazes de degradar substâncias orgânicas recalcitrantes, presentes em efluentes aquosos em baixas concentrações (WU *et al.*, 2020; MALATO *et al.*, 2009).

Dal Bosco (2012) e Araújo *et al* (2016) afirmam que esses processos são considerados uma alternativa eficaz do ponto de vista técnico, econômico e ambiental no que se refere a degradação de poluentes presentes em águas residuais e efluentes industriais.

O sistema homogêneo utilizado nessa pesquisa é o processo oxidativo avançado de peroxidação assistida por radiação ultravioleta ( $H_2O_2/UV$ ), que de acordo com Souza (2010) e Rodrigues-Silva *et al* (2014), acontece a geração de radicais hidroxila quando os dois processos são combinados: a fotólise e a peroxidação.

À vista disso, essa pesquisa busca uma alternativa através do processo  $H_2O_2/UV$  para a degradação de ivermectina em meio aquoso. Podendo assim, contribuir para uma melhor qualidade das águas, bem como melhoria de qualidade de vida da população.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Aplicar o processo de fotocatalise homogênea utilizando o catalisador peróxido de hidrogênio combinado com radiação UV, como tecnologia de tratamento em amostras aquosas contaminadas pelo fármaco ivermectina.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Realizar ensaios experimentais, usando a fotocatalise homogênea com peróxido de hidrogênio no tratamento de efluente sintético contendo o contaminante para avaliar a degradação do fármaco;
- Verificar no processo estudado, a influência de parâmetros como pH, concentração de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e do tempo de reação;
- Otimizar o processo proposto através da análise do comportamento da degradação de ivermectina utilizando dois reatores distintos;
- Consolidar a aplicação da tecnologia da fotocatalise homogênea na descontaminação desse antibiótico.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Fármacos no meio ambiente

Os fármacos, em especial, os antibióticos são utilizados tanto para a saúde humana quanto para saúde animal objetivando tratar infecções. E por ser de uso frequente, estudos têm sido feitos afim de identificar a presença de antibióticos em ambientes aquáticos, visto que são encontrados em águas superficiais, águas do mar, águas subterrâneas e até mesmo água potável (LIU *et al.*, 2018).

Estudar a contaminação dos fármacos em corpos hídricos naturais é fundamental para avaliar seu impacto nos riscos ecológicos e humanos (CHEN *et al.*, 2020) Os antibióticos são despejados sucessivamente no meio ambiente como metabólitos, comumente solúveis e bioativos. Tornando-se uma preocupação em termos de toxicidade ambiental de antibióticos em organismos aquáticos (LIU *et al.*, 2018)

Embora os níveis de produtos farmacêuticos sejam muito baixos, ainda assim podem ser potencialmente prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. A exposição a baixas concentrações de vários medicamentos no ambiente também pode incentivar o desenvolvimento de cepas resistentes de bactérias (HORVAT *et al.*, 2012).

Micropoluentes são contaminantes que quando presentes nas águas residuais ainda que estejam em concentrações muito baixas produzem efeitos adversos. Isso porque os processos usados nas estações de tratamento de águas residuais convencionais não são capazes de remover de forma eficiente um grande número desses contaminantes recalcitrantes (AYOUB *et al.*; 2019).

Esses contaminantes atingem as águas superficiais por uma variedade de mecanismos, incluindo o descarte de esgoto sanitário sem tratamento, o chorume proveniente de aterros sanitários, na lixiviação de solos agrícolas contaminados, e devido à incompleta remoção de muitos compostos químicos em Estações de Tratamento (AQUINO *et al.*, 2013).

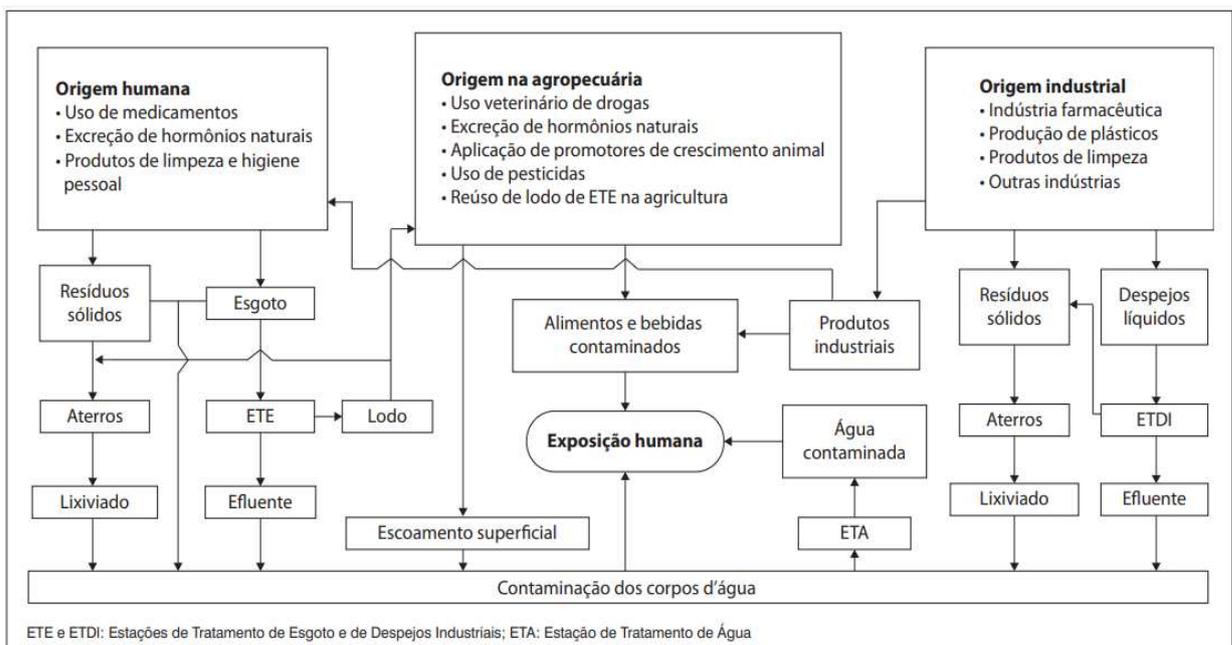
As técnicas biológicas utilizadas nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE's), não são eficientes para remover micropoluentes. Do mesmo modo que, os corpos d'água contaminados pela ineficiência do tratamento podem se tornar mananciais de abastecimento público em que o tratamento convencional de água,

descrito como tecnologia de ciclo completo utilizado nas Estações de Tratamento de água (ETA's) do Brasil, também não são capazes de remover esses micropoluentes orgânicos, tais como agrotóxicos, fármacos ou produtos de higiene pessoal (SOARES; LEÃO, 2015).

Nos últimos anos foi verificado que diversos contaminantes emergentes estão dispostos no ambiente, e a comunidade científica tem se estimulado para detectar a ocorrência desses micropoluentes. Bem como, entender as vias de contaminação e o destino final, podendo assim, analisar o risco e a potencialidade (GROSSELI, 2016).

O alto consumo de fármacos pela população é um dos principais responsáveis pela introdução dos contaminantes emergentes. Quando o fármaco é ingerido ele é excretado via urina, fezes ou suor na sua forma inalterada ou na forma de metabólitos. Quando se tem as ETE's, elas são descritas como o principal destino dos contaminantes orgânicos e a fonte emissora destes para o ambiente aquático, uma vez que as ETE's não são projetadas para remoção desta classe de compostos (DAUGHTON, 2013). A Figura 1 explana as fontes dos contaminantes emergentes e suas vias de entrada no ambiente.

**Figura 1** – Rotas de contaminação e exposição humana aos fármacos e desreguladores endócrinos



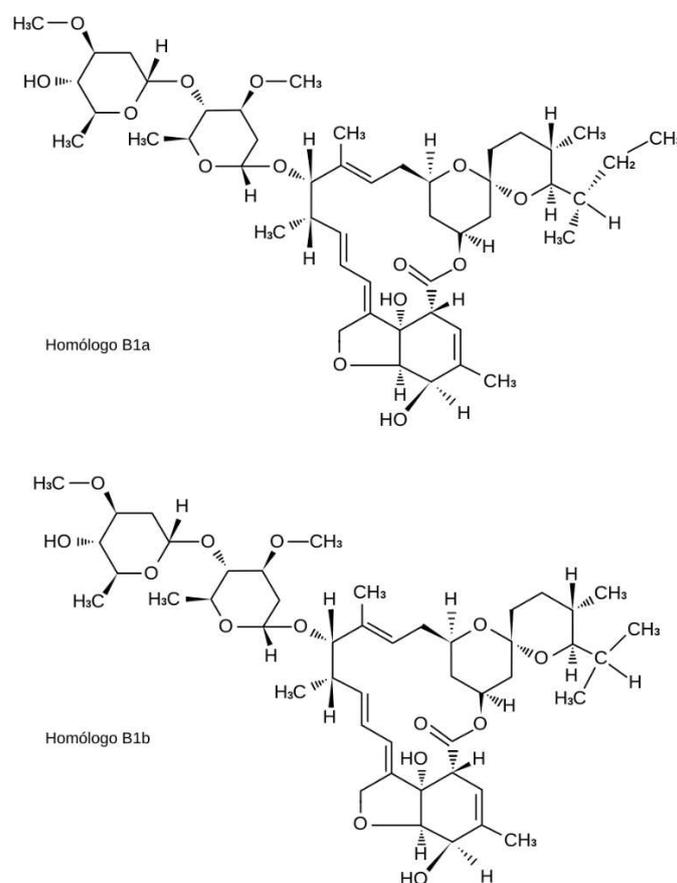
Fonte: AQUINO *et al.*, 2013.

### 3.1.1 Ivermectina

Os anti-helmínticos são um grupo de produtos farmacêuticos que compreendem um amplo espectro de diferentes estruturas e moléculas químicas. A ivermectina (IVM) é um anti-helmíntico amplamente utilizados na medicina humana e veterinária, individualmente ou em combinação, sendo bastante eficaz no controle da oncocercose humana, animal e é usado em programas de controle regional na África e nas Américas nos últimos anos (CUPP *et al.*, 2011).

A IVM faz parte da classe das lactonas macrocíclicas das avermectinas, e corresponde a mistura de dois compostos homólogos, 22,23- dihidroavermectina B<sub>1a</sub> (H<sub>2</sub>B<sub>1a</sub>, não inferior a 80%) e 22,23- dihidroavermectina B<sub>1b</sub> (H<sub>2</sub>B<sub>1b</sub>, não superior a 20%) (CROUBELS *et al.*, 2002). A Figura 2 mostra a representação dessa fórmula molecular.

**Figura 2 – Fórmula estrutural da Ivermectina**



Fonte: COSTA e NETTO, 2012.

Comercialmente, a IVM foi lançada no início dos anos 80, gerando impacto positivo no que se refere a área da terapêutica veterinária mundial. Desde então o fármaco foi elevado ao patamar de químicos como a morfina, aspirina e penicilina, lançadas respectivamente em 1827, 1899 e 1942, devido a vários fatores como às suas características de segurança, o seu amplo espectro contra endo e ectoparasitos, e o seu exclusivo efeito de longa ação em formulações específicas para animais (MOLENTO, 2020).

Com a pandemia de COVID-19, o consumo de medicamentos no Brasil aumentou significativamente, em decorrência do denominado “tratamento precoce” ou “kit-covid” que correspondia a um conjunto de medicamentos sem evidências científicas conclusivas para o uso com essa finalidade. Dentre eles, a hidroxicloroquina ou cloroquina, associada à azitromicina, à ivermectina e à nitazoxanida, combinados a suplementos de zinco e das vitaminas C e D (MELO, 2021).

Medicamentos como a ivermectina, apresentaram um tremendo acréscimo nas vendas, passando de R\$ 44 milhões em 2019 para R\$ 409 milhões em 2020, com alta de 829%. Sendo possível notar o potencial do consumo durante a fase mais crítica da pandemia no Brasil. A ivermectina apresentou o maior percentual de utilização por automedicação, com cerca de 35,6% (ANDRADE *et al*, 2021; REIS, 2021).

### **3.2 Problemas associados ao efluente não tratado**

No Brasil, de acordo a portaria GM/MS nº 888/2021 que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, a água considerada potável é a que atenda aos requisitos estabelecidos no referido anexo.

No entanto, vale salientar que essa norma não relaciona compostos como fármacos e desreguladores endócrinos em seus padrões. Por essas substâncias não estarem dispostas na norma, podem ser definidas como potencialmente nocivas ao ecossistema aquático e à saúde humana. Sendo possível que uma água considerada potável apresente contaminação (SOUZA, 2019).

A presença da IVM no meio ambiente, seu potencial tóxico e suas consequências em médio e longo prazo estão sendo estudadas desde os anos 80,

quando foi lançada comercialmente. Entretanto, as suas concentrações no ambiente têm sido pouco avaliadas (MANCINI *et al.*, 2020).

O fármaco ativo é eliminado praticamente íntegro nas fezes e por assim ser, não se observa claramente os danos causados em curto prazo. No entanto, sua liberação é lenta e cumulativa por mais de 200 dias e os danos ambientais são preocupantes (MESA *et al.*, 2020).

A IVM é eliminada na sua maioria (>96%) inalterada nas fezes e em grandes quantidades. Através de dados de questionários sanitários no que se refere a frequência de tratamentos no Brasil, o despejo de IVM no ambiente pode ser de aproximadamente 15 toneladas por ano (MOLENTO, 2009).

É distribuído na matriz água e pode ocorrer o seu acúmulo no lodo de rios e represas, resultando em resíduos de longa duração (>400 dias) em um dia após a sua administração nos animais. No Brasil, o desafio parasitário é contínuo e o tratamento em animais de produção é realizado em grande parte com o uso de químicos e em intervalos menores que 90 dias. Dessa forma, a IVM que alcança o ambiente acaba manifestando grande acúmulo, antes mesmo da sua degradação (MOLENTO, 2021).

### **3.3 Processos oxidativos avançados**

Os processos de oxidação avançada (POA's) são alternativas tecnológicas para degradação de substâncias orgânicas recalcitrantes, presentes em efluentes aquosos em baixas concentrações. Nos últimos anos, essa tecnologia tem recebido atenção especial, sendo publicadas diferentes análises sobre POA's direcionados a remoção de poluentes emergentes. Tal qual, revisões sobre essa técnica aplicada a classes específicas de compostos emergentes, como aditivos à gasolina, citostáticos, alquilfenóis, corantes orgânicos e compostos farmacêuticos (WU *et al.*, 2020).

Tratamentos que utilizam processos oxidativos avançados têm sido relatados como um possível método para degradar, ou reduzir a concentração de fármacos humanos e veterinários na água. Além de serem considerados uma alternativa eficaz do ponto de vista técnico, econômico e ambiental no que se refere a degradação de poluentes presentes em águas residuais e efluentes industriais (DAL BOSCO, 2012; ARAÚJO *et al.*, 2016).

Esses processos são ditos como limpos, pois, não há formação de lodo e transferência de fase dos poluentes, e são considerados não seletivos pelo fato de degradar inúmeros compostos, independentemente da presença de outros. Da mesma maneira que, podem ser usados para destruir compostos orgânicos em fase aquosa, gasosa ou adsorvida numa matriz sólida. Além disso, os produtos da reação completa são  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , íons inorgânicos e subprodutos menos tóxicos (SOUZA, 2010; RODRIGUES, 2017).

Os POA's têm a mesma característica química que é produção de radicais hidroxilas ( $\bullet\text{OH}$ ), ainda que utilizem de meios diferentes reacionais. A sua eficácia está relacionada a geração de radicais livres reativos, tendo como o principal, o radical hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ), utilizado para a oxidação dos poluentes. Esses processos têm sido aplicados com êxito para a remoção ou a degradação de poluentes recalcitrantes e com isso, têm se destacado como métodos alternativos promissores no tratamento de águas residuais e efluentes industriais (TERAN, 2014; ARAÚJO *et al.*, 2016).

O radical hidroxila é formado por meio de reações que derivam da combinação de oxidantes, como o ozônio ( $\text{O}_3$ ) e o peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), com radiação ultravioleta (UV) ou visível (Vis), e catalisadores, como íons metálicos ou semicondutores (NOGUEIRA *et al.*, 2007). Os POA's podem ser divididos em sistemas homogêneos e heterogêneos, de acordo com a Tabela 1 (BOHRER, 2018).

**Tabela 1** - Sistemas típicos de processos oxidativos avançados

Processos	Com irradiação	Sem irradiação
Homogêneos	$\text{O}_3/\text{UV}$ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ Foto-Fenton	$\text{O}_3/\text{HO}^\cdot$ $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ Reativo de Fenton
Heterogêneos	Fotocatálise heterogênea ( $\text{TiO}_2/\text{O}_2/\text{UV}$ )	$\text{O}_3/\text{Catalisador}$

Fonte: BOHRER, 2018.

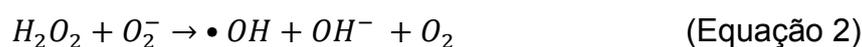
Esses processos em escala industrial mediante a otimização desses fatores de eficácia têm despertado interesses significativos, mesmo tendo limitações no que se refere ao alto custo das fontes de energia, ao desenvolvimento de novos materiais catalíticos de baixo custo, e a construção de reatores em escala real (ARAÚJO *et al*, 2016).

### 3.3.1 Fotocatálise homogênea $H_2O_2/UV$

Os sistemas homogêneos são caracterizados pela ausência de catalisadores sólidos, seja com presença ou não de irradiação. A degradação do poluente orgânico pode ocorrer por meio de dois mecanismos: sendo pela fotólise direta com radiação ultravioleta (UV), em que a luz é a exclusiva fonte na destruição dos poluentes, ou pela geração de radicais hidroxila, um forte oxidante, com geração podendo ocorrer na presença de oxidantes fortes como o  $H_2O_2$  e  $O_3$  (BOHRER, 2018).

O peróxido de hidrogênio é um dos oxidantes mais versáteis que existe. Ele é superior ao cloro, ao dióxido de cloro e ao permanganato de potássio. Além disso, quando combinado com agentes catalíticos como compostos de ferro, luz UV, semicondutores e entre outros, ele pode ser convertido em radicais hidroxil ( $\bullet OH$ ) com potencial de oxidação significativa (TAMBOSI, 2008).

O processo oxidativo avançado de peroxidação assistida por radiação ultravioleta ( $H_2O_2/UV$ ) gera radicais hidroxila quando dois processos muito conhecidos são combinados: a fotólise e a peroxidação. A formação de radical  $\bullet OH$  acontece em razão da oxidação direta do peróxido através da irradiação UV. As equações de 1 a 3 mostram formação do radical  $\bullet OH$  e a oxidação de um composto R (SOUZA, 2010; RODRIGUES-SILVA *et al*, 2014).



Souza (2010) afirma que, o peróxido de hidrogênio também pode agir como capturador de radicais  $\bullet OH$  comprometendo assim o sistema como pode ser visto na equação 4.



O peróxido de hidrogênio combinado com radiação ultravioleta resulta numa reação indireta, e ela é mais eficiente porque o potencial de oxidação do radical hidroxil ( $E_0 = +2,80 \text{ V}$ ) é mais elevado que o do peróxido de hidrogênio sozinho ( $E_0 = +1,78 \text{ V}$ ), dessa forma, torna-se possível promover a oxidação mais energética com o processo combinado (BRITO e SILVA, 2012).

O processo que combina peróxido de hidrogênio com irradiação ultravioleta é um dos POA's mais antigos e tem sido usado com êxito na remoção de contaminantes presentes em águas e efluentes. Em razão da maior produção de radicais hidroxila, esse processo combinado é muito mais eficiente do que o uso de cada um deles separadamente (TAMBOSI, 2008).

## 4 METODOLOGIA

O trabalho foi realizado no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba, onde as etapas seguintes foram adotadas como metodologia de trabalho.

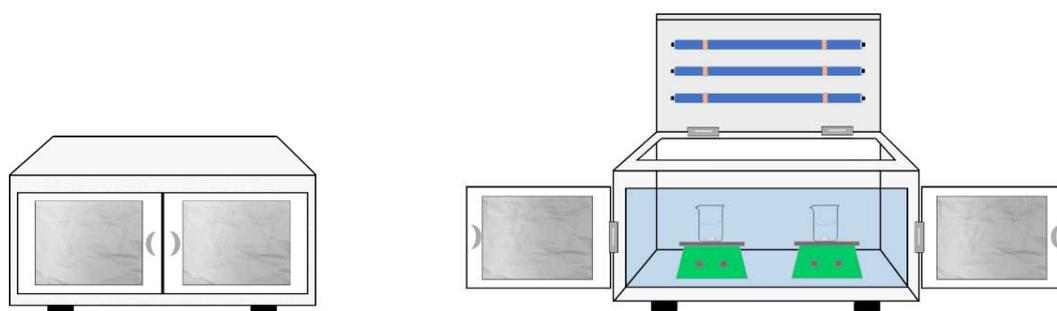
### 4.1 Fotoreatores

No desenvolver da pesquisa foram utilizados dois fotoreatores afim de analisar em qual deles a degradação foi mais eficiente. Nos pontos a seguir estão descritas as especificações de cada fotoreator.

#### 4.1.1 Reator de Câmara

O reator de câmara é feito de madeira com as seguintes medidas 42 cm x 70 cm x 45 cm de comprimento, largura e altura, respectivamente. Utiliza-se fechado para que não haja o vazamento de radiação. Tem papel alumínio fixado nas portas e conta com 3 lâmpadas de 45 cm de comprimento, 15W de potência cada, que emite radiação no comprimento de onda de 254 nm e intensidade de 5,24 mW/cm<sup>2</sup> sendo as 3 lâmpadas ligadas. A Figura 3, a seguir, representa o reator de câmara.

**Figura 3** - Representação esquemática do reator de câmara

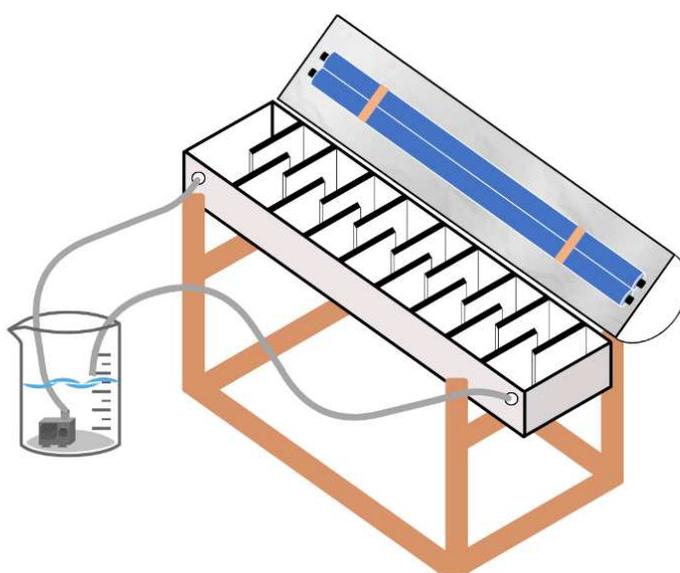


**Fonte:** Autoria própria, 2022.

### 4.1.2 Reator de Chicanas

O reator de chicanas é feito de placa de alumínio e tem as seguintes medidas 63 cm x 11 cm x 3,6 cm com a distância entre chicanas de 2 cm – 2,5 cm e alturas de 1,6 cm. A tampa é de PVC com papel alumínio fixado por trás da lâmpada e o suporte é de madeira. O referido reator conta com uma lâmpada de tubos de Quartzo com 4 pinos, 53,5 cm de comprimento, 95W de potência, com comprimento de onda de 254nm e intensidade de 144,1 mW/cm<sup>2</sup> UVC. E por fim, tem uma mangueira acoplada a uma bomba submersa Sp-500 (JAD) com 6W de potência e vazão de 60 L/h até 150 L/h com uma coluna de água de 40 cm, tendo as medidas 7 cm x 7 cm de comprimento e altura, respectivamente. A Figura 4, a seguir, representa o reator de chicanas.

**Figura 4** - Representação esquemática do reator de chicanas



Fonte: SANTOS, 2022.

### 4.2 Preparação do efluente sintético

A segunda etapa foi destinada a preparação das soluções que foram utilizadas nos experimentos. Nos pontos a seguir estão descritas as soluções: estoque, o efluente sintético e a solução inibidora.

A solução padrão estoque de ivermectina foi preparada por meio da pesagem de 0,1g de ivermectina pura adquirida na HEBEI VEYONG ANIMAL (VEYONG,

CHINA) com teor de 98,8%, diluída em 100mL de álcool etílico absoluto ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) P.A. (NEON, BRASIL) com pureza de 99,5% a uma temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ) e transferida para um balão volumétrico de 1000 mL para ser completado com água destilada, afim de obter uma concentração de  $100 \text{ mg.L}^{-1}$ . Compreendendo que, a solubilidade da ivermectina foi feita em etanol e água destilada. Por fim, a solução foi armazenada em um recipiente âmbar e conservado na geladeira.

Foram preparados efluentes sintéticos com volumes diferentes para ir de acordo com a capacidade dos fotoreatores. Para ambos reatores a concentração de IVM foi de  $20 \text{ mg.L}^{-1}$ .

Para preparar a solução empregada no reator de câmara, foi transferida 50 mL da solução estoque para um balão volumétrico de 250 mL e completou-se com água destilada. Logo em seguida, a solução foi colocada em um béquer de 500 mL para ser utilizada nesse fotoreator.

E para preparar a solução empregada no reator de chicanas, foi necessário transferir 200 mL da solução estoque para um balão volumétrico de 1000 mL e completa-lo com água destilada. Em seguida, a solução foi colocada em um béquer de 2000 mL para ser utilizada nesse fotoreator.

Afim de finalizar a reação do peróxido após a retirada de cada alíquota, se fez uso da solução inibidora que foi preparada a partir da pesagem de 0,2g de sulfito de sódio anidro ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) P.A (NEON, BRASIL) diluído com água destilada em um balão de 100mL.

#### **4.3 Varredura – espectro de absorção da ivermectina e construção da curva de calibração**

Para determinar o comprimento de onda ( $\lambda$ ) de maior absorção da ivermectina foi feita uma varredura utilizando o espectrofotômetro UV/VIS – modelo GTA 96 (GLOBAL ANALYZER, BRASIL), acoplado a um computador. Operando com cubetas de quartzo que dispõem de comprimento de onda na faixa de 190 nm a 1000 nm. Se fez uso de uma balança analítica modelo Mark 210 A (TECNAL, BRASIL) para a medição de massas.

Utilizou-se a solução com concentrações já conhecidas de IVM para fazer uma varredura espectral na faixa de 200 nm a 500 nm, tendo intervalos (passos) de 1 nm e utilizado o solvente de dissolução da IVM como referência (Branco).

Para construir a curva de calibração, foram utilizadas variadas concentrações de IVM no comprimento de onda encontrado na varredura.

#### **4.4 Ensaio H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV**

O ensaio H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV foi realizado em dois fotoreatores diferentes para que fosse possível analisar alguns fatores como a influência do pH e a qual a melhor concentração de peróxido a ser utilizada. Em todos os experimentos foram coletadas alíquotas em tempos de reação de 30min, 105min e 180min. E para finalizar a reação, foi utilizada a solução de 2g/L de sulfito de sódio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), descrita no item 4.2, tendo como base os estudos feitos por Liu *et al* (2003) e por Andrade *et al* (2016).

##### **4.4.1 Reator de câmara**

Os ensaios realizados nesse reator utilizaram a solução de trabalho com concentrações de 150 mg.L<sup>-1</sup>, 200 mg.L<sup>-1</sup> e 250 mg.L<sup>-1</sup> de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 35% P.A (NEON, BRASIL) afim de avaliar qual a melhor concentração para realizar os experimentos.

Foi medido o pH original de cada solução que foi trabalhada variando as concentrações de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no processo para encontrar a que apresentou melhor desempenho. A que se mostrou melhor foi utilizada para analisar a influência do pH, variando o pH entre 5, 7 e 9. Para fazer o ajuste dessas variações, foram utilizadas as soluções de ácido clorídrico (HCl) 1M e hidróxido de sódio (NaOH) 0,1M.

Cada béquer contendo uma barra magnética foi colocado dentro da câmara em cima de agitadores magnéticos para que ficasse em agitação contínua durante o processo.

#### **4.4.2 Reator de chicanas**

Os ensaios realizados nesse reator utilizaram a solução de trabalho com a melhor condição de  $H_2O_2$  e de pH avaliada nos experimentos do reator de câmara. Em seguida, a bomba com a mangueira acoplada foi colocada em um béquer contendo 1000 mL dessa solução para o experimento no reator de chicanas.

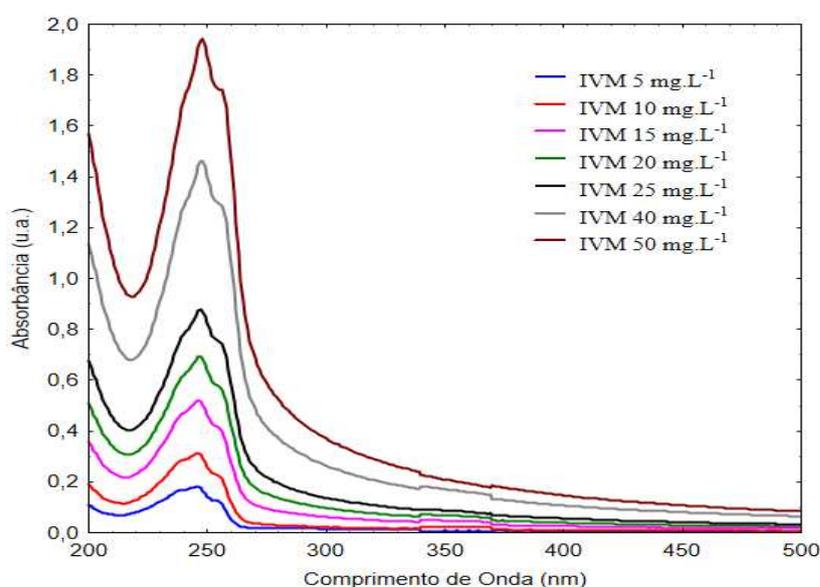
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Determinação da Ivermectina

Com base em estudos, foram utilizadas diferentes concentrações de IVM e os espectros de absorção das soluções foram obtidos entre os comprimentos de onda na faixa de 200 a 500 nm. A partir disso, foi possível observar na Figura 5 que a banda de máxima absorção foi em 246 nm ( $\lambda_{\text{máx}}$ ), sendo possível confirmar que os resultados são consistentes com o que foi encontrado na literatura. Logo, por apresentar maior absorbância da IVM, o comprimento de onda de 246 nm foi utilizado para a determinação espectrofotométrica nos experimentos.

Costa e Netto (2012) e Figueiredo e Estrela (2021) utilizaram em sua pesquisa o comprimento de onda na faixa de 190 a 800 nm e encontraram a máxima absorção em 246 nm. Já Barros *et al* (2018) trabalhou com o comprimento de onda na faixa de 200 nm a 340 nm, encontrando a máxima absorção em 245 nm. É possível notar que mesmo variando a faixa, a máxima absorção encontra-se próxima.

**Figura 5** - Espectro de absorção da IVM em diferentes concentrações ( $\lambda_{\text{máx}} = 246$  nm)



Fonte: Autoria própria, 2022.

A técnica é fundamentada na lei de Lambert-Beer, que trabalha com amostras no estado sólido, líquido ou gasoso e é a base matemática para medidas de absorção

de radiação empregada nas regiões ultravioleta, visível e infravermelho do espectro eletromagnético.

### 5.1.1 Curva de calibração da IVM

A curva de calibração da ivermectina foi determinada a partir da interpolação dos dados de concentração e absorvância descritos na Tabela 2, de forma linear com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) encontrado de 0,998.

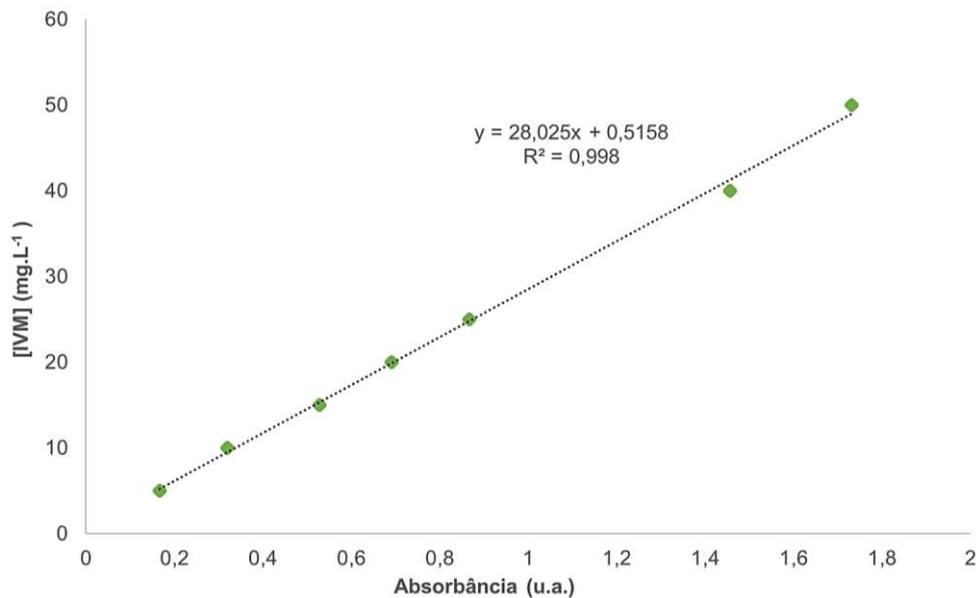
**Tabela 2** - Dados para a curva analítica padrão para análise da IVM

Conc. IVM (mg.L <sup>-1</sup> )	Absorvância (246 nm)			Absorvância média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
	1º	2º	3º			
5	0,149	0,181	0,171	0,167	0,013	8,003
10	0,308	0,313	0,339	0,320	0,014	4,341
15	0,537	0,522	0,523	0,527	0,007	1,341
20	0,666	0,692	0,715	0,691	0,020	2,915
25	0,851	0,874	0,874	0,866	0,011	1,268
40	1,421	1,443	1,505	1,456	0,035	2,433
50	1,432	1,910	1,851	1,731	0,213	12,286

Fonte: Autoria própria, 2022.

Para obter a curva de calibração para a análise da IVM, foi utilizada a média de três curvas padrão descritas na Tabela 2, onde os dados foram ajustados por meio da análise de regressão linear. A equação da reta foi: [IVM] (mg.L<sup>-1</sup>) = 28,025x (abs) + 0,5158. Como o coeficiente de correlação foi de 0,998, quer dizer que 99,8% dos valores da concentração de IVM podem ser explicados pela variação nos valores de absorvância obtidos, considerando um erro (resíduo) de 0,2%. A Figura 6 mostra o comportamento desses dados.

**Figura 6** - Curva da concentração de ivermectina versus absorbância



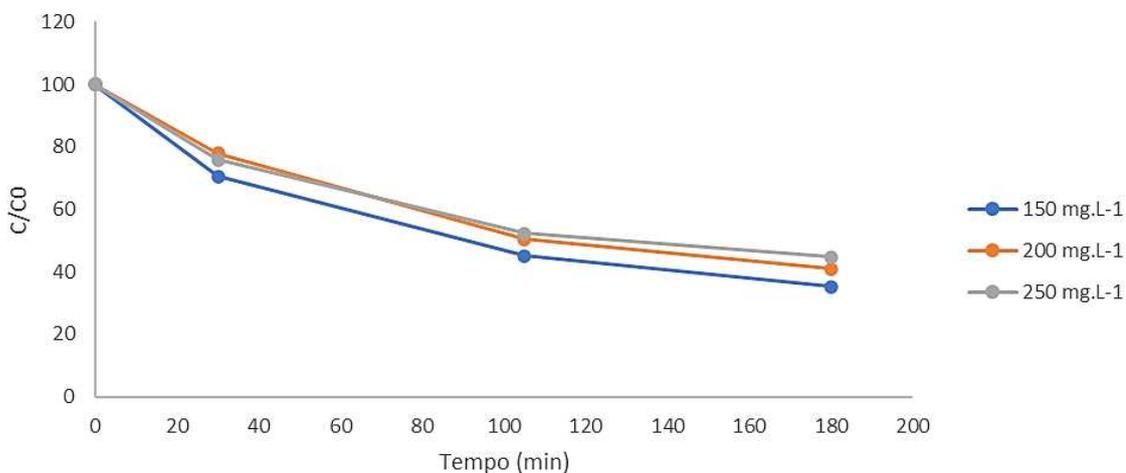
Fonte: Autoria própria, 2022.

## 5.2 Avaliação da influência da concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Verificando a influência da concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, o Apêndice A mostra os resultados para as três concentrações que foram escolhidas para se trabalhar a partir de testes realizados. Para a concentração de 150 mg.L<sup>-1</sup> é possível notar a degradação de 29,44% nos primeiros 30min, de 54,82% em 105min de reação e 64,79% em 180min. Para a concentração de 200 mg.L<sup>-1</sup> a degradação é de 22,05% nos primeiros 30min, de 49,67% em 105min de reação e 59,12% em 180min. E por fim, para a concentração de 250 mg.L<sup>-1</sup> a degradação é de 24,15% nos primeiros 30min, de 47,65% em 105min de reação e 55,19% em 180min.

Dessa forma, é possível observar o comportamento das três concentrações e conseqüentemente, a influência de sua quantidade no processo.

De posse dos dados foi possível construir o gráfico disposto na Figura 7. Nele conseguimos observar que a concentração de 150 mg.L<sup>-1</sup> se mostra com melhor desempenho em relação as outras concentrações.

**Figura 7 - Verificação da melhor concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

**Fonte:** Autoria própria, 2022.

Observando o comportamento do gráfico, nota-se que a menor concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> resulta numa melhor degradação do analito. Isso pode ser explicado por Ferreira *et al* (2015) que afirma que quando há o excesso de peróxido de hidrogênio no meio reacional, pode ocorrer o sequestro dos radicais hidroxila ( $\bullet$ OH) formados, e com isso a degradação do analito desacelera em decorrência das reações competitivas nesse meio.

Paniagua (2018) afirma ainda, que também pode ocorrer reações de recombinação entre estes radicais que leva a formação do radical que possui um potencial de redução inferior ao do radical hidroxila, chamado de radical hidroperoxila (HO<sub>2</sub> $\bullet$ ) afetando negativamente o processo e, conseqüentemente, diminuindo a eficiência de degradação.

Wang, Li e Irini (2013) enfatizam que pode existir interferência do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> residual após o tempo de reação fotocatalítica, implicando nos resultados de quantificação da degradação real do fármaco em questão pelo processo H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV. Sendo assim, é compreendida a necessidade de parar a reação com a adição de um inibidor. Além disso, todos os experimentos foram feitos em triplicata afim de conseguir resultados confiáveis.

### 5.3 Avaliação da influência do pH

Para analisar a influência do pH foi utilizada a melhor condição de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> encontrada, variando os pH's entre 5, 7 e 9. Os ensaios também foram feitos no reator

de câmara e os dados obtidos estão dispostos nas Tabelas a seguir. Na Tabela 3 pode-se observar as condições A, B e C com a concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> fixada e o pH variando. Os resultados dessa tabela dizem sobre a leitura de absorvância que foi realizada para cada condição apresentada.

**Tabela 3** - Condições de verificação da influência do pH

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	Condição	Ensaio	pH	Abs inicial	30min	105min	180min
150	A	1º	5	0,603	0,521	0,474	0,336
		2º		0,621	0,534	0,361	0,304
		3º		0,648	0,568	0,365	0,279
	B	1º	7	0,624	0,510	0,320	0,277
		2º		0,646	0,598	0,462	0,368
		3º		0,622	0,518	0,306	0,243
	C	1º	9	0,642	0,489	0,478	0,348
		2º		0,674	0,538	0,355	0,322
		3º		0,648	0,512	0,329	0,285

Fonte: Autoria própria, 2022.

Com os dados da Tabela 4, foi possível fazer uma média para analisar melhor os resultados. Portanto, na Tabela 4, a seguir, estão dispostos esses valores. Nota-se que na condição A para 180min de reação a absorvância é de 0,306. Na condição B, é de 0,296 e na condição C é de 0,318 que implicam numa variação mínima.

**Tabela 4** - Média dos valores de absorvância em diferentes condições de pH

CONDIÇÃO	MÉDIA			
	Abs inicial	30min	105min	180min
A	0,624	0,541	0,400	0,306
B	0,631	0,542	0,363	0,296
C	0,655	0,513	0,387	0,318

Fonte: Autoria própria, 2022.

Por fim, na Tabela 5, pode-se observar a taxa de degradação de IVM para a faixa de pH utilizada nos ensaios, mostra que a influência do pH tem uma pequena variação.

Sendo confirmada a observação feita por Dal Bosco (2012) onde afirma que o pH não se mostra como um parâmetro importante de influência na taxa da reação.

Nos dois ensaios realizados por ela, foi observado apenas uma pequena diferença nas taxas de reação. Diante disso, o pH escolhido para ser fixado nos experimentos foi o pH 7, neutro.

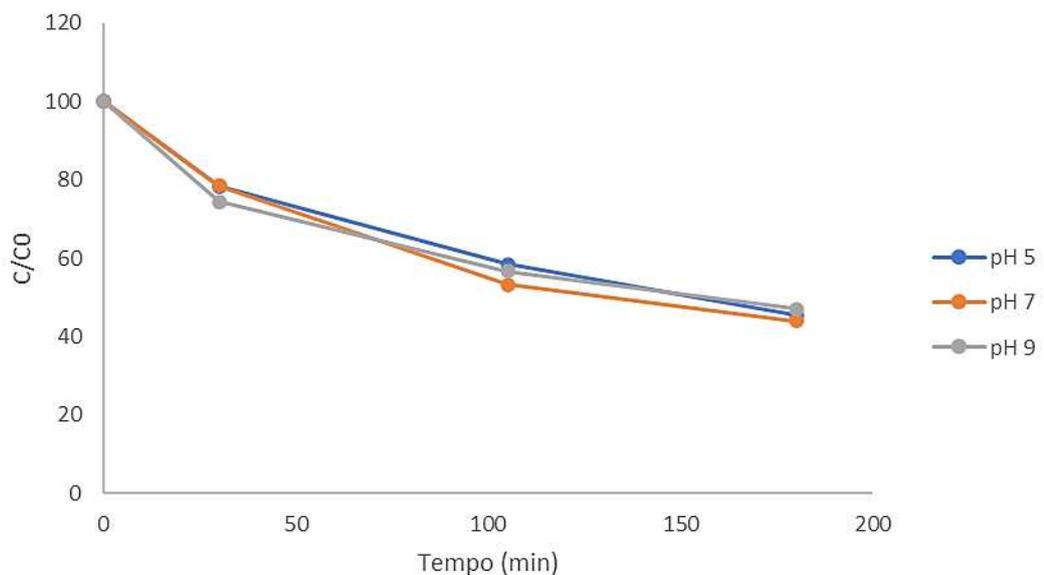
**Tabela 5** - Análise e verificação da melhor condição de remoção da IVM

pH	Tempo	Abs	Conc. IVM	TD (%)	Taxa IVM (%)
5	0	0,624	20,00	0	100
	30	0,541	15,67	21,67	78,33
	105	0,400	11,71	41,47	58,53
	180	0,306	9,07	54,63	45,37
7	0	0,631	20,00	0	100
	30	0,542	15,69	21,53	78,47
	105	0,363	10,66	46,72	53,28
	180	0,296	8,78	56,08	43,92
9	0	0,655	20,00	0	100
	30	0,513	14,88	25,60	74,40
	105	0,387	11,35	43,25	56,75
	180	0,318	9,41	52,94	47,06

Fonte: Autoria própria, 2022.

A Figura 8 representa a influência do pH tendo como base os dados descritos nas Tabelas 3, 4 e 5.

**Figura 8** - Influência do pH



Fonte: Autoria própria, 2022.

#### 5.4 Otimização do sistema operacional

Como foi visto anteriormente, as análises foram feitas no fotoreator de câmara (I) e a melhor condição encontrada foi reproduzida no fotoreator de chicanas (II), objetivando analisar se os resultados seriam otimizados com a utilização de um fotoreator diferente.

Nas Tabelas 7 e 8, a seguir, estão dispostos os dados iniciais obtidos no fotoreator I, em termos de leitura de absorvância e dados complementares que dizem respeito a taxa de degradação.

**Tabela 6** - Ensaio da remoção da IVM com o fotoreator de câmara

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	Ensaio	pH	Abs inicial	30min	105min	180min
150	1º	7	0,624	0,510	0,320	0,277
	2º		0,646	0,598	0,462	0,368
	3º		0,622	0,518	0,306	0,243

Fonte: Autoria própria, 2022.

**Tabela 7** - Dados complementares do reator de câmara

pH	Tempo	Absorvância	Conc. IVM	TD (%)	Taxa IVM (%)
7	0	0,631	20,00	0	100
	30	0,542	15,69	21,53	78,47
	105	0,363	10,67	46,67	53,33
	180	0,296	8,78	56,08	43,92

Fonte: Autoria própria, 2022.

Com isso, pode-se observar que a taxa de degradação do fotoreator I foi de 21,53% nos primeiros 30min de reação, seguido de 46,67% em 105min de reação e 56,08% em 180min de reação. Ao reproduzir a melhor condição, as Tabelas 8 e 9, a seguir, mostram os dados iniciais obtidos no fotoreator II.

**Tabela 8** - Ensaio da remoção da IVM com o fotoreator de chicanas

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	Ensaio	pH	Abs inicial	30min	105min	180min
150	1º	7	0,692	0,325	0,206	0,131
	2º		0,642	0,340	0,181	0,136
	3º		0,648	0,296	0,180	0,140

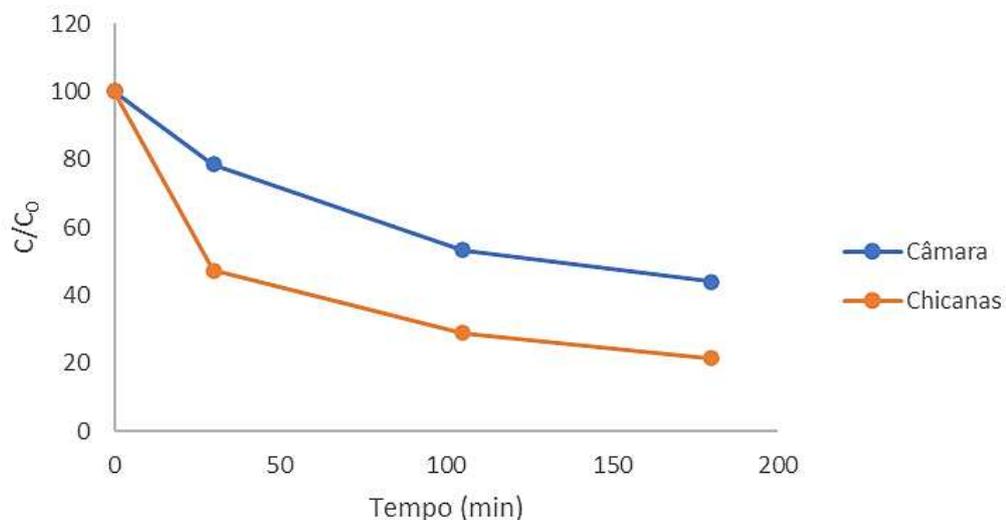
Fonte: Autoria própria, 2022.

**Tabela 9** - Dados complementares do reator de chicanas

pH	Tempo	Absorbância	Conc. IVM	TD (%)	Taxa IVM (%)
7	0	0,661	20,00	0	100
	30	0,320	9,47	52,66	47,34
	105	0,189	5,78	71,11	28,89
	180	0,136	4,28	78,60	21,40

Fonte: Autoria própria, 2022.

No fotoreator II foi de 52,66% já nos primeiros 30min de reação, seguido de 71,11% em 105min de reação e 78,60% em 180min de reação. Pode-se observar, portanto, que o processo pode ter sido otimizado dadas as condições que o fotoreator II apresenta em termos operacionais. Isso pode ser explicado visto que um dos fatores colaboradores para essa otimização é a potência da lâmpada.

**Figura 9** - Análise da degradação de IVM nos reatores de câmara e de chicanas

Fonte: Autoria própria, 2022.

Paniagua (2018) enfatiza que a utilização de irradiação com lâmpada UV-C é aplicada no tratamento de efluentes por ter alta capacidade de realizar quebra de moléculas dos contaminantes em estudo. Compreendendo que, no primeiro reator a intensidade é de 5,24 mW/cm<sup>2</sup> e no segundo é de 144,1 mW/cm<sup>2</sup>, o que pode ter ocorrido é que por este ser maior, a irradiação é mais intensa e conseqüentemente, a eficiência é mais significativa. A Figura 9 apresenta o comportamento dos dados.

### **5.5 Tempo de irradiação**

Testes foram feitos antes de fixar a metodologia para avaliar quais seriam os tempos de irradiação a serem utilizados, e nesses testes foi possível observar que ia ocorrendo uma estabilização na degradação do fármaco. Indo de acordo com Monteiro (2017) que afirma que é indicado um tempo entre 1 e 3 horas de reação para a degradação de fármacos.

A degradação foi maior no tempo de reação de 30min, logo em seguida, foi diminuindo aos poucos, e por assim ser, foi escolhido o tempo de reação de até 180min, haja vista que não houve variação significativa na taxa de degradação para os demais tempos.

Nesse tempo escolhido foram coletadas alíquotas em 30min, 105min e 180min, para que fosse possível observar a degradação nos minutos iniciais, na metade do tempo de reação e no tempo final.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nessa pesquisa foi estudada a degradação de ivermectina através da fotocatalise homogênea com peróxido de hidrogênio em dois fotoreatores distintos, objetivando alcançar bons resultados por meio da análise da influência do pH e da concentração de peróxido.

Em termos de variáveis estudadas, foi visto que a influência do pH é bem pequena, com base nos ensaios realizados variando entre ácido, neutro e básico. Já a concentração de peróxido de hidrogênio se mostrou influenciar no processo, pois, em concentrações mais baixas a degradação foi melhor. O tempo de reação foi um fator proporcional a degradação, haja vista que a degradação foi ocorrendo à medida que o tempo foi passando, até se chegar a uma estabilização.

Por fim, foi possível verificar que no fotoreator de câmara o resultado de degradação do fármaco no tempo final da reação foi de 56,08% enquanto no reator de chicanas foi de 78,60%, compreendendo que, de fato, o processo foi otimizado.

Como sugestões para próximas pesquisas, é que sejam analisados outros parâmetros como diferentes concentrações do fármaco, a determinação de subprodutos, e os ensaios de biotoxicidade. Além de verificar a viabilidade do processo para que o estudo possa agregar mais dados, contribuindo para o aperfeiçoamento de tratamentos avançados em matrizes aquosas e, conseqüentemente, a redução dos impactos ambientais e melhoria de qualidade de vida da população.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. A. *et al.* **Perfil de uso de medicamentos e automedicação, em uma população universitária, frente a pandemia da COVID-19.** Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 7, p. 73772-73784, 2021.

AQUINO, S.F., BRANDT, E.M.F., CHERNICHARO, C.A., **Remoção de fármacos e desreguladores endócrinos em estações de tratamento de esgoto: revisão da literatura.** Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol.18, n.3. jul/set 2013. p.187-204.

ARAÚJO, Karla Santos de et al. **Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais e efluentes industriais.** Revista Ambiente & Água, v. 11, p. 387-401, 2016.

AYOUB, H., ROQUES-CARMES, T., POTIER, O., KOUBAISSY, B., PONTVIANNE, S., LENOUEVEL, A., GUIGNARD, C., MOUSSET, E., POIROT, H., TOUFAILY, J., HAMIEH, T. **Comparison of the removal of 21 micropollutants at actual concentration from river water using photocatalysis and photo-Fenton.** SN Applied Sciences, 2019.

BARROS, A. P. R.; BARBOSA, A. S.; LIMA, E. D.; SÁTIRO, J. R.; DA CONCEIÇÃO ALBUQUERQUE, M. V.; LOPES, W. S. **Utilização de esferas de TiO<sub>2</sub>/alumina para degradação de ivermectina em um reator fotocatalítico.** In: 48º Congresso Nacional de Saneamento Básico. 2018.

BOHRER, Jaqueline Klem. **Uso de processos oxidativos avançados no tratamento dos resíduos líquidos oriundos da estação de tratamento de esgoto do município de Marmeleiro – PR.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Guia de Vigilância em Saúde.** Brasília, 2014. 812 p

BRASIL. **Portaria da Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017.** Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro, Brasília, DF.

BRITO, N. N. De.; SILVA, V. B. M. **Processos Oxidativos Avançados e sua aplicação ambiental.** Revista Eletrônica de Engenharia Civil, n.3, v.1, p.36-47, 2012.

CHEN, Y.; XIE, Q.; WAN, J.; YANG, S.; WANG, Y.; FAN, H. **Occurrence and risk assessment of antibiotics in multifunctional reservoirs in Dongguan, China.** Environmental Science and Pollution Research, v.27, n.12, p.13565-13574, 2020.

COSTA, F.M.; NETTO, A.D.P. **Desenvolvimento e Aplicação de Métodos para Determinação de Ivermectina em Medicamentos de uso Veterinário.** Química Nova, v. 35, n. 3, PP. 616-622, 2012.

CROUBELS, S., DE BAERE, S., CHERLET, M., DE BACKER, P., 2002.

**Determination of ivermectin B-1a in animal plasma by liquid chromatography combined with electrospray ionization mass spectrometry.** J. Mass Spectrom. 37, 840–847.

CUPP, E., SAUER, M., BREY, M., RICHARDS, F. **Elimination of human onchocerciasis: history of progress and current feasibility using ivermectin.** Acta Trop. V. 120. P. 100-108. 2011.

DAL BOSCO, S. M. **Degradação de ivermectina por peroxidação, fotólise e processos oxidativos avançados.** Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura Urbanismo. Campinas, SP: [s.n.], 2012.

DAUGHTON, C. G. **"Pharmaceuticals in the environment: Sources and their management"**. 2. ed. Elsevier B.V., 2013. v. 62

DE ANDRADE, M. M. A., CAHINO, A. M., ROCHA, E. M. R., LUCENA, L. G., & dos Anjos Junior, R. H. **Utilização de inibidores da reação de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para o tratamento de lixiviados de aterro sanitário através da fotocatalise solar homogênea por UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.** VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Campina Grande - PB. 2016.

DE FIGUEIREDO, Jasmine Garcia; ESTRELA, Maria Amélia Albergaria. **Comparação do teor de ivermectina industrializados e manipulados por espectrofotometria de absorção.** RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar- ISSN 2675-6218, v. 2, n. 5, p. e25321-e25321, 2021.

**Descontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recente overview and trends.** Catal. Today. V147. P.1-59. 2009.

FERREIRA, G.F.; MANIERO, M.G.; GUIMARÃES, J.R. **Degradation of sucralose by peroxidation assisted with ultraviolet radiation and photo-Fenton.** LACSIT International Journal of Engineering and Technology, V.7, n.5, 2015.

GROSSELI, Guilherme Martins. **Contaminantes emergentes em estações de tratamento de esgoto aeróbia e anaeróbia.** Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2016.

HORVART, A.J.M., PETROVICK, M., BABIC, S., PAVLOVIC, D.M., ASPERGER, D., PELKO, S., MANCE, A.D., KASTELAN-MACAN, M. **Analysis occurrence and fate**

**of anthelmintics and their transformation products in the environment.** Trac Trends Anal. Chem. V.31. p.61-84.2012.

LIU, L. L.; Wu, W.; Zhang, J. Y.; Lv, P.; Xu, L.; Yan, Y, C. 2018. **Progress of research on the toxicology of antibiotic pollution in aquatic organisms.** Acta Ecologica Sinica, 38, 36–41

LIU, Wenjun et al. **Optimal methods for quenching H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> residuals prior to UFC testing.** Water Research, v. 37, n. 15, pág. 3697-3703, 2003.

MALATO, S., FERNANDEZ-ILBANEZ, P., MALDONADO, M.I., GERNJAK, W. **Descontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recente overview and trends.** Catal. Today. V147. P.1-59. 2009.

MALATO, S., FERNANDEZ-ILBANEZ, P., MALDONADO, M.I., GERNJAK, W. MANCINI, L. et al. **Need for a sustainable use of medicinal products: environmental impacts of ivermectin.** Annali Istituto Superiore di Sanità, [s.l.], v. 56, p. 492-496, 2020.

Melo, J. R. R., Duarte, E. C., Moraes, M. V. D., Fleck, K., & Arrais, P. S. D et al. **Automedicação e uso indiscriminado de medicamentos durante a pandemia da COVID-19.** Cadernos de Saúde Pública, v. 37, 2021.

MESA, L. et al. **Concentration and environmental fate of ivermectin in floodplain wetlands: An ecological approach.** Science of the Total Environment, [s.l.], v. 706, 135692, 2020.

MOLENTO, M. B. **Covid-19 and the rush for self-medication and self-dosing with ivermectin: a word of caution.** One Health, [s.l.], v. 10, 2020.

MOLENTO, M. B. **Ivermectina e Saúde Única: reposicionamento e a preocupação com o meio ambiente.** Revista de Educação Continuada em Medicina Veterinária e Zootecnia do CRMV-SP, v. 19, n. 1, 1 out. 2021.

MOLENTO, M. B. **Parasite control in the age of drug resistance and changing agricultural practices.** Veterinary Parasitology, [s.l.], v. 163, p. 229-234, 2009.

MONTEIRO, Rubens Teles. **Tratamento dos fármacos nimesulida e ibuprofeno em meio aquoso empregando UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e foto-Fenton.** 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

NOGUEIRA, R. F. P.; TROVÓ, A. G.; SILVA, M. R. A. Da; VILLA, R. D. **Fundamentos e aplicações ambientais dos processos fenton e foto-fenton.** Química Nova, v.30, n.2, p.400-408, 2007.

PANIAGUA, C. E. S. **Degradação simultânea dos fármacos genfibrozila, hidroclorotiazida e naproxeno pelos processos TiO<sub>2</sub> /UV-A, TiO<sub>2</sub> /H<sub>2</sub> O<sub>2</sub> /UV-A e H<sub>2</sub> O<sub>2</sub> /UV-C em diferentes matrizes aquosas.** 2018. 159 f. Tese (Doutorado em

Química) – Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2018.799>

REIS, F. **Merck diz que não há eficácia da Ivermectina contra COVID-19**. Pfarma.com.br 2021; 6 fev. <https://pfarma.com.br/coronavirus/6213-merck-msd-ivermectinacovid19.html>

RODRIGUES, M. K. C. **Projeto, instalação e operação de reator de leito fixo para fotocatalise heterogênea**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2017.

RODRIGUES-SILVA, Caio et al. **Ocorrência e degradação de quinolonas por processos oxidativos avançados**. Química Nova, v. 37, n. 5, p. 868-885, 2014.

SOARES, A. F. S.; LEÃO, M. M. D. **Contaminação dos mananciais por micropoluentes e a precária remoção desses contaminantes nos tratamentos convencionais de água para potabilização**. Revista jurídica do Ministério Público do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, v.14, n.24, p.36-85, jan./jun., 2015.

SOUZA, Ana Gabriela Rodrigues de. **Ocorrência de Fármacos e compostos Desreguladores de Endócrinos na água tratada da ETA Jiqui, Natal/RN**. 2019. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SOUZA, Bianca Miguel de. **Avaliação de Processos Oxidativos Avançados Acoplados com Carvão Ativado Granulado com Biofilme para Reúso de Efluentes de Refinaria de Petróleo**. Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 160p. 2010.

TAMBOSI, J. L. **Remoção de Fármacos e Avaliação de seus Produtos de Degradação através de Tecnologias Avançadas de Tratamento**. Doutorado em Engenharia Química. Centro Tecnologia da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 141p. 2008.

TERAN, Francisco. **Aplicação de fotocatalise heterogênea e homogênea para a remoção de cor em efluentes provenientes de indústria de processamento de couro**. Revista Monografias Ambientais, v. 13, n. 3, p. 3316-3325, 2014.

WANG Y., LI W., IRINI A. **A novel and quick method to avoid H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> interference on COD measurement in Fenton system by Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> reduction and O<sub>2</sub> oxidation**. Water Sci Technol. 2013;68(7):1529-35. doi: 10.2166/wst.2013.396.

WU, D. L.; ZHANG, M.; HE, L. X.; ZOU, H. Y.; LIU, Y. S.; LI, B. B.; YANG, Y. Y.; LIU, C.; HE, L. Y. & YING, G. G. **Contamination profile of antibiotic resistance genes in ground water in comparasion with surface water**. Journal of Science of the Total Environment. n. 715. p. 1-9. 2020.

ZHAO-JUN, L.; WEI-NING, Q.; YAO, F.; YUAN-WANG, L.; SHEHATA, E. & JIAN, L.  
**Degradation mechanisms of oxytetracycline in the environment.** Journal of  
Integrative Agriculture. v. 18. n. 9. p. 1953-1960. 2019.

## APÊNDICE A - ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DA MELHOR CONCENTRAÇÃO DE H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	Ensaio	Tempo de reação (min)	pH original	Média do pH	Absorbância Inicial	Absorbância (t)	Conc. IVM inicial (mg.L <sup>-1</sup> )	Conc. IVM (t) (mg.L <sup>-1</sup> )	Taxa de degradação (%)	Taxa de IVM (%)	Média TD (%)
	1º	30	5,64		0,604	0,480	20	13,95	30,24	69,76	29,44
	2º		5,63		0,617	0,494	20	14,35	28,27	71,73	
	3º		5,70		0,612	0,483	20	14,04	29,82	70,18	
150	1º	105	5,64	5,66	0,604	0,284	20	8,45	57,77	42,23	54,82
	2º		5,63		0,617	0,322	20	9,51	52,43	47,57	
	3º		5,70		0,612	0,309	20	9,15	54,26	45,74	
	1º	180	5,64		0,604	0,218	20	6,59	67,04	32,96	64,79
	2º		5,63		0,617	0,23	20	6,93	65,35	34,65	
	3º		5,70		0,612	0,254	20	7,60	61,98	38,02	
	1º	30	5,64		0,605	0,537	20	15,55	22,23	77,77	22,05
	2º		5,42		0,599	0,513	20	14,88	25,60	74,40	
	3º		5,66		0,632	0,565	20	16,34	18,30	81,70	
200	1º	105	5,64	5,57	0,605	0,346	20	10,19	49,06	50,94	49,67
	2º		5,42		0,599	0,306	20	9,06	54,68	45,32	
	3º		5,66		0,632	0,373	20	10,95	45,27	54,73	
	1º	180	5,64		0,605	0,222	20	6,71	66,47	33,53	59,12
	2º		5,42		0,599	0,291	20	8,64	56,78	43,22	
	3º		5,66		0,632	0,31	20	9,18	54,12	45,88	
	1º	30	5,68		0,596	0,495	20	14,37	28,13	71,87	24,15
	2º		5,41		0,591	0,534	20	15,47	22,65	77,35	
	3º		5,60		0,616	0,541	20	15,67	21,67	78,33	
250	1º	105	5,68	5,56	0,596	0,307	20	9,09	54,54	45,46	47,65
	2º		5,41		0,591	0,379	20	11,12	44,42	55,58	
	3º		5,60		0,616	0,382	20	11,20	44,00	56,00	
	1º	180	5,68		0,596	0,273	20	8,14	59,31	40,69	55,19
	2º		5,41		0,591	0,303	20	8,98	55,10	44,90	
	3º		5,60		0,616	0,331	20	9,77	51,17	48,83	