

UFSCar- UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CCET- CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

DQ- DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

*Trabalho de Conclusão de Curso*

Júlia Duarte Praxedes Silva

**ATIVIDADE FOTOCATALÍTICA DAS HETEROESTRUTURAS DE  
g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>:Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> NA DEGRADAÇÃO DE FÁRMACOS**

2025  
São Carlos- SP

JÚLIA DUARTE PRAXEDES SILVA

ATIVIDADE FOTOCATALÍTICA DAS HETEROESTRUTURAS DE  
g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>:Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> NA DEGRADAÇÃO DE FÁRMACOS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Química da Universidade Federal de São  
Carlos para obtenção do título de  
Bacharel em Química.

Orientador: Prof. Dr. Ernesto Chaves  
Pereira

Co-orientador: Dr. Kelvin Costa de Araújo

2025  
São Carlos- SP

## RESUMO

Nos últimos anos, a detecção frequente de contaminantes emergentes em matrizes aquáticas tem levantado preocupações, pois são substâncias difíceis de serem removidas, que podem apresentar diversos riscos à saúde humana e na vida aquática, uma vez que não há controle sobre elas. Esses poluentes são de diversas classes, como resíduos industriais, produtos de higiene pessoal e compostos químicos, destacando-se os fármacos, como a fluoxetina (FLX), um antidepressivo utilizado mundialmente, que vem sendo detectado em estações de tratamento de água e esgoto, as quais não foram planejadas para remoção eficiente de compostos desse tipo, resultando em sua persistência nas águas mesmo após os tratamentos convencionais. Dessa forma, a criação de técnicas para remoção desses contaminantes foi necessária, e os Processos Oxidativos Avançados (POAs) são um exemplo. É um método sustentável e eficaz na remoção dessas substâncias, por meio da fotocatalise há a geração de radicais livres, como hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ), que promovem a degradação de poluentes, transformando-os em espécies menos tóxicas e mais simples, como dióxido de carbono, água ou outros compostos de fácil remoção. O desenvolvimento de fotocatalisadores com materiais de baixo custo e que utilizam a radiação visível, é uma forma de tornar a técnica mais acessível e promissora. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar na literatura a degradação da FLX a partir da fotocatalise heterogênea, utilizando a heteroestrutura de Nitreto de Carbono ( $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ) e Pentóxido de Nióbio ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), que pode ser sintetizada pelo método hidrotérmico assistido por microondas, ambos os materiais abundantes e de baixo custo. Os resultados obtidos dos trabalhos pesquisados na literatura, mostraram que o método foi eficiente para a degradação do fármaco e, conseqüentemente, para remoção em águas residuais, indicando possibilidade de aplicação em tratamento de efluentes contaminados por medicamentos. Diante disso, nota-se a importância de monitorar contaminantes emergentes e seus efeitos, além de alternativas de remediação ambiental, visando portanto, a preservação do meio ambiente.

Palavras-chave: Fotocatálise heterogênea. Remediação Ambiental. Fluoxetina. Contaminantes Emergentes.  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ .  $\text{g-C}_3\text{N}_4$ .

## ABSTRACT

In recent years, the frequent detection of emerging contaminants in aquatic matrices has raised concerns, as these substances are difficult to remove and may pose various risks to human health and aquatic life, especially because there is no effective control over them. These pollutants belong to different classes, such as industrial residues, personal care products, and chemical compounds, with pharmaceuticals standing out such as fluoxetine (FLX), an antidepressant used worldwide that has been detected in water and wastewater treatment plants. These facilities were not designed for the efficient removal of such compounds, resulting in their persistence in water even after conventional treatments. Therefore, the development of techniques for the removal of these contaminants has become necessary, and Advanced Oxidation Processes (AOPs) are an example. This is a sustainable and effective method for removing these substances: through photocatalysis, free radicals such as hydroxyl radicals ( $\bullet\text{OH}$ ) are generated, promoting pollutant degradation and transforming them into less toxic and simpler species, such as carbon dioxide, water, or other easily removable compounds. The development of photocatalysts using low-cost materials that operate under visible light is a way to make the technique more accessible and promising. Thus, the aim of this study was to evaluate, in the literature, the degradation of FLX through heterogeneous photocatalysis using the heterostructure of Carbon Nitride (g- $\text{C}_3\text{N}_4$ ) and Niobium Pentoxide ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), which can be synthesized using the microwave-assisted hydrothermal method, with both materials being abundant and low-cost. The results obtained from the literature showed that the method was effective for the degradation of the drug and, consequently, for its removal from wastewater, indicating the potential for application in the treatment of effluents contaminated by pharmaceuticals. In light of this, the importance of monitoring emerging contaminants and their effects becomes evident, as well as the need for environmental remediation alternatives, thus aiming at the preservation of the environment.

**Keywords:** Heterogeneous photocatalysis. Environmental remediation. Fluoxetine. Emerging contaminants.  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ . g- $\text{C}_3\text{N}_4$ .

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Índice de atendimento total de esgoto.....	9
Figura 2: Esquema do processo fotocatalítico atuando no fotocatalisador semiconductor.....	13
Figura 3: Fórmula química estrutural da Fluoxetina.....	16
Figura 4: Gráfico que ilustra a porcentagem (%) de moradores em domicílios, por regiões, com esgotamento sanitário por rede coletora, pluvial ou fossa séptica.....	19
Figura 5: Esquema do tratamento convencional da água.....	20
Figura 6: Rotas de contaminação por fármacos no meio ambiente.....	22
Figura 7: Principais estruturas do Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	25
Figura 8: Estrutura do g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	26
Figura 9: Diferença entre aquecimento convencional e por microondas.....	28
Figura 10: Estrutura química do TFMP.....	29
Figura 11: Esquema da degradação da FLX em TFMP.....	30
Figura 12: Degradação de FLX e formação do TFMP durante o processo de degradação sob luz UV.....	31
Figura 13: Esquema representativo da partícula de um semiconductor.....	32
Figura 14: Esquema do mecanismo de fotocatalise, com o fotocatalisador atuando na degradação de um poluente.....	36
Figura 15: Taxa de remoção em porcentagem, do corante em 5 ciclos de aplicação do material fotocatalítico.....	37
Figura 16: No gráfico (a) mostra a curva de concentração por tempo, da degradação da Rodamina, enquanto (b) está a curva de degradação do fármaco Amilorida. Em ambos estão os resultados ao usar semicondutores isolados, e a heteroestrutura.....	39
Figura 17: Mecanismo da fotocatalise.....	41

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ANA	Agência Nacional de Água e Saneamento Básico
BC	Banda de Condução
BRM	Biorreator de Membrana
BV	Banda de Valência
CAG	Carvão Ativado Granular
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DATASUS	Departamento de Informação e Informática do Sistema Único de Saúde (SUS)
$e^-$	Elétron
EPAR	Estação Produtora de Água de Reuso
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FLX	Fluoxetina
$g-C_3N_4$	Nitreto de Carbono
GM	Gabinete do Ministro
$h^+$	Buraco (lacuna positiva)
$K_{oc}$	Coefficiente de Sorção
MS	Ministério da Saúde
$Nb_2O_5$	Pentóxido de Nióbio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
$\bullet OH$	Radical Hidroxila
PBT	Persistência-Bioacumulação-Toxicidade
POAs	Processos Oxidativos Avançados
SINISA	Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
$TiO_2$	Dióxido de Titânio
TFMP	4-(trifluorometil)fenol
UV	Ultravioleta

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>13</b>
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>13</b>
3.1. Contaminantes no Brasil.....	14
3.1.1 Fluoxetina.....	15
3.2. Leis CONAMAS.....	17
3.3. Estações de tratamento de esgoto e água.....	18
3.3.1 Estação de Tratamento de Água (ETA).....	19
3.3.2 Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).....	20
3.3.3 Presença de fármacos nas Estações de Tratamento.....	20
3.4. Materiais utilizados.....	23
3.4.1 Pentóxido de Nióbio ( $Nb_2O_5$ ).....	23
3.4.2 Oxalato amoniacal de nióbio.....	25
3.4.3 Hidróxido de amônio.....	25
3.4.4 Nitreto de Carbono ( $g-C_3N_4$ ).....	26
3.4.5 Nióbio.....	26
3.4.6 Heteroestrutura $Nb_2O_5 + g-C_3N_4$ (Fotocatalisador).....	27
3.5. Síntese Hidrotermal.....	28
3.6. Métodos Analíticos.....	29
3.6.1 Degradação.....	29
3.6.2 Fotocatálise Heterogênea.....	32
3.6.3. Processo Fotocatalítico.....	34
3.7 Trabalhos Atuais.....	35
3.7.1 Síntese hidrotermal assistida por micro-ondas de nanopartículas de pentóxido de nióbio e sua dopagem com lantânio.....	35
3.7.2 Impactos de óxidos metálicos nas propriedades estruturais, ópticas, dielétricas e fotocatalíticas de compósitos ternários sintetizados ( $Nb_2O_5/MoS_2/Grafeno$ ).....	35
3.7.3 Degradação de fármacos por fotocatalise heterogênea em efluente modelo sintético (Santos, 2023).....	36
3.7.4 Produção de fotocatalisadores de $Nb_2O_5$ imobilizado em suporte cerâmico para fotodegradação de corante sintético em efluentes líquidos (Falcão Filho, 2023).....	37
3.7.5 Heteroestruturas de $g-C_3N_4/Nb_2O_5$ ajustadas por síntese sonoquímica: Desempenho fotocatalítico aprimorado na oxidação de poluentes emergentes sob radiação visível (Silva et al, 2017).....	39
3.7.6 Estudo por fotólise de laser flash de heteroestruturas $Nb_2O_5/g-C_3N_4$ como fotocatalisadores eficientes para a evolução de $H_2$ molecular (Tariq et al., 2023).....	41
3.7.7 Remoção fotocatalítica do antidepressivo fluoxetina de meios aquosos utilizando os catalisadores $TiO_2$ P25 e $g-C_3N_4$ (Fotiou; Lykos; Konstantinou, 2024).....	42
3.7.8 Comparação dos principais resultados dos trabalhos que envolveram a fotocatalise.....	43
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>44</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>45</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, aliado à expansão industrial e ao avanço tecnológico, trouxe benefícios sociais e econômicos, porém, resultou em preocupações referentes à geração de resíduos e ao descarte incorreto de substâncias químicas no meio ambiente, que mesmo após tratamentos convencionais de água e esgoto, não são completamente removidos permanecendo nas matrizes aquáticas, implicando na contaminação da água, tal fato que evidencia a necessidade de cuidados, uma vez que a escassez hídrica é um problema atual. Dessa forma, essas substâncias consideradas contaminantes emergentes são detectadas nas águas em diversas concentrações, o que reforça a importância de pesquisas, monitoramento e legislações, para assim, haver um controle dessa situação e conter impactos ambientais.

No Brasil, de acordo com o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA), 55,2% da população é atendida com rede de coleta de esgotos sanitários (Trata Brasil, 2023), e apenas 50,8% do esgoto gerado é tratado (SNIS) (ANA, 2025). Cerca de 90 milhões de brasileiros (44,8%) não têm acesso à coleta de esgoto, sendo a maior parte no Norte e Nordeste do país, como mostra a figura 1, o que resulta em média, mais de 5,2 mil piscinas olímpicas de esgoto sem tratamento despejadas na natureza diariamente (Trata Brasil, 2024). Esses fatos contribuem diretamente para a contaminação dos recursos hídricos, uma vez que representam uma das causas mais significativas de poluição da água, além de afetarem a saúde humana, uma vez que de acordo com dados do Ministério da Saúde (DATASUS), o Brasil registrou mais de 197.470 internações por doenças de veiculação hídrica (Trata Brasil, 2023), fora o impacto no desenvolvimento socioeconômico do país. O saneamento é necessário para que a população tenha água de qualidade, destinação segura para os resíduos sólidos, e limpeza urbana, ou seja, é essencial para uma cidade limpa e sem alagamentos (ANA, 2025).

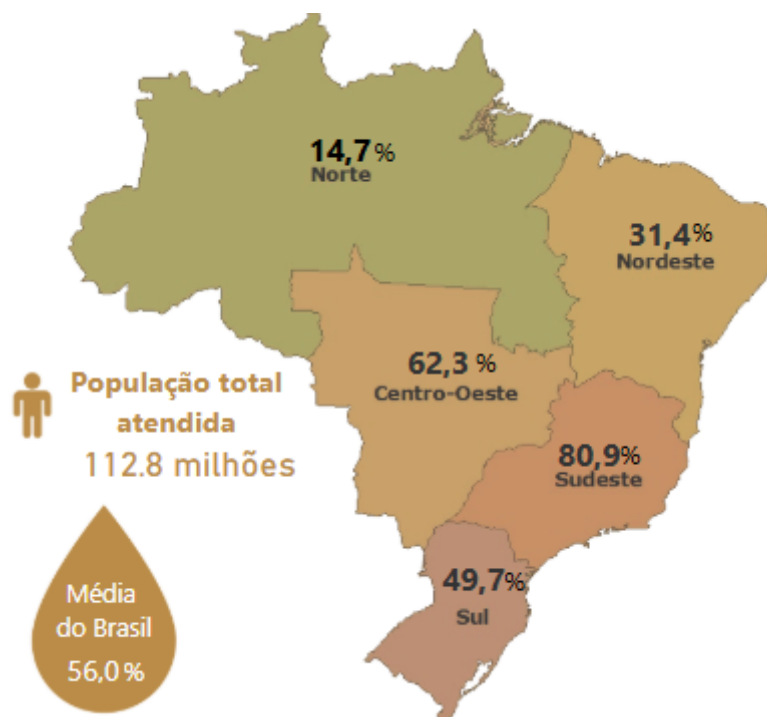


Figura 1: Índice de atendimento total de esgoto.

Fonte: Brasil, Ministério das Cidades, 2025.

Os contaminantes emergentes, abrangem diversas substâncias como produtos industriais, agrotóxicos, microplásticos, produtos de higiene pessoal, hospitalares, e um dos principais, os fármacos, como azitromicina, FLX, ivermectina, entre outros, descritos na Tabela 1.

Medicamento	2019		2020		2021		ação
	Quantidade excretada por dia (mg/dia)	Concentração Excreção Estimada (µg/litro)	Quantidade excretada por dia (mg/dia)	Concentração Excreção Estimada (µg/litro)	Quantidade excretada por dia (mg/dia)	Concentração Excreção Estimada (µg/litro)	
Azitromicina	64.324	0,1091	146.808	0,2490	95.151	0,1614	.1614
Dexclorfeniramina	2.330	0,040	1.996	0,0034	2.863	0,0049	.0049
Diazepam	10.720	0,0182	14.289	0,0242	15.085	0,0256	.0256
Fluoxetina	634.837	1,0770	429.998	0,7295	646.557	1,0968	.0968
Ivermectina	15	0,0000	26	0,0000	0	0,0000	.0000
Etinilestradiol	264	0,0004	130	0,0002	114	0,0002	.0002

Tabela 1: Tabela referente a quantidade e concentração por medicamento de 2019 a 2021.

Fonte: Souza et al., 2023.

O aumento da população, e mudanças nos padrões de saúde e comportamento da sociedade, contribui para o aumento do consumo de medicamentos, em 2020, 8,7% dos adultos no Brasil utilizavam pelo menos um medicamento psicotrópico, porém, entre 2020 e 2023 as vendas de antidepressivos aumentaram em 32%, e conseqüentemente, devido a excreção natural e ao descarte inadequado, esses compostos estão presentes no ambiente (Gomes & Gomes, 2024). São identificados em quase todos os continentes, como Europa, Ásia, América do Norte, Oceania e América do Sul, e apresentam resistência antimicrobiana, resultante de resíduos de antibióticos no ambiente, mesmo que em baixas concentrações (ng/L) (Souza et al., 2023). Os fármacos possuem alto poder de contaminação, por serem persistentes no meio ambiente e bioacumulativos (Gomes & Gomes, 2024), sendo que, em sua maioria, não são totalmente removidos nas estações de tratamento de água (ETA) e esgoto (ETE), já que esses sistemas não foram projetados para remoção de compostos dessa natureza (Farto, 2024).

Entre os fármacos mais estudados, destacam-se analgésicos, anti-inflamatórios e antidepressivos, como a FLX, ingrediente ativo de uma série de drogas psicotrópicas. É um inibidor seletivo da recaptação de serotonina, sendo um

dos antidepressivos mais consumidos mundialmente em quase todas as faixas etárias, e é detectado em diferentes matrizes aquáticas, incluindo água potável, em concentrações de µg/L a ng/L (Souza et al., 2023).

A excreção natural da FLX ocorre por meio da norfluoxetina, principal metabólito do medicamento, sendo 80% eliminado pela urina, e aproximadamente 15% nas fezes (Souza et al., 2023). Esse composto no meio ambiente é preocupante, já que não se conhece completamente seus efeitos em organismos, e nem quais as concentrações mínimas necessárias para haver alterações biológicas. Contudo, de acordo com o Environmental Classified Pharmaceuticals, esse fármaco e seus metabólitos apresentam valor 6, na escala de 0 a 9 do índice de Persistência-Bioacumulação-Toxicidade (PBT), indicando potencial de impacto ambiental (Souza et al., 2023). Estudos apontam alterações bioquímicas e comportamentais em espécies aquáticas e em humanos, como efeitos no sistema endócrino, e neurológico. Pesquisas concluíram que uma concentração de 0,51 mg/L é letal para *Ceriodaphnia dubi* (Pereira et al., 2025). Após a pandemia, houve um aumento de 20% na concentração total de FLX em rios, apresentando riscos para a vida aquática, já que pode atravessar membranas celulares e bioacumular, sendo detectado em tecidos de peixes (Gomes & Gomes, 2024).

Devido a esses fatos, o desenvolvimento de métodos para remoção de poluentes emergentes tornou-se necessário, dessa forma, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) têm se destacado, por ser eficiente na degradação de compostos persistentes em água e solo, transformando-os em substâncias menos tóxicas ou até mesmo inofensivas, a partir de espécies reativas de oxigênio que oxidam e degradam poluentes presentes em água e efluentes (Lima, 2021; Santos, 2023; Silva, 2025).

Além disso, são processos economicamente viáveis, consomem menos energia, ou seja, causam efeitos negativos mínimos no meio ambiente. Esses processos são divididos em fotoquímicos e não fotoquímicos, os quais influenciam no consumo de energia e requisitos operacionais.

Os não fotoquímicos conseguem gerar radicais sem a necessidade de luz, como a oxidação eletroquímica, ozonização e reação de Fenton. Contudo, há limitações, como tratar efluentes turvos ou coloridos, nos quais a penetração de luz é uma barreira, podendo não oxidar completamente os poluentes (Flora et al, 2018; Fidelis et al., 2025). Já os fotoquímicos utilizam fótons de lâmpadas artificiais ou

radiação solar para geração das espécies reativas, mesmo em reações não espontâneas, em que na catálise não ocorreria, mas, com a energia adicional dos fótons no sistema reacional é permitido que a reação ocorra (Falcão Filho, 2023). Em larga escala, esses processos ainda podem enfrentar desafios, como alto custo energético, complexidade operacional e monitoramento avançado. No entanto, podem ser utilizados como mecanismos terciários nas estações de tratamento, a fim de remover contaminantes mais persistentes, sejam eles mais complexos e desafiadores de remoção. Isso se deve a capacidade dos radicais em reagir com diversas moléculas, além dos avanços contínuos das técnicas de POAs. (Silva, 2025).

A fotocatalise heterogênea é um exemplo fotoquímico, que utilizando materiais de baixo custo e de fácil acesso, como o  $\text{TiO}_2$  e  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , é capaz de degradar moléculas orgânicas através do uso da luz, ou seja, um recurso natural, que quando comparada a tratamentos convencionais como a separação por membrana, sedimentação química e bioprocessos apresenta uma taxa de reação rápida e baixo consumo de energia (Santos, 2023). Atualmente, é muito utilizada em pesquisas sobre remediação ambiental, nas quais, a partir de radiação ultravioleta (UV) ou visível, e semicondutores, ocorre a geração de radicais hidroxila, e em seguida a degradação. Esse processo ocorre inicialmente pela absorção da luz com energia superior ao bandgap do fotocatalisador sólido, o que ocasiona a transferência de elétrons da banda de valência (BV) para a banda de condução (BC) resultando em portadores de carga, e reações de oxidação e redução, produzindo os radicais de oxigênio, responsáveis pela degradação dos contaminantes, ilustrada pelo esquema da figura 2. (Santos de Araújo, et al., 2014).

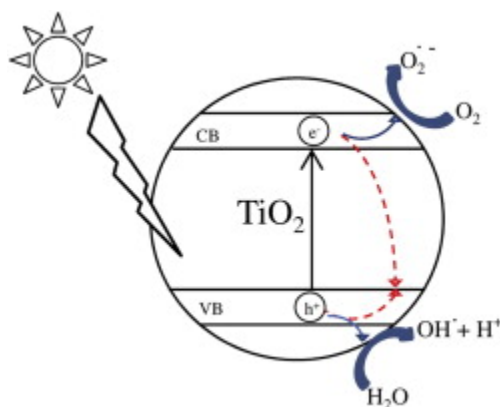


Figura 2: Esquema do processo fotocatalítico atuando no fotocatalisador semicondutor.

Fonte: Adaptado de Angelo et al., 2013.

Os fotocatalisadores podem ser combinados, a fim de aumentar a atividade fotocatalítica, como a heterojunção entre materiais com potenciais de bandas diferentes (Falcão Filho, 2023). Entre os materiais acessíveis, estão o nitreto de carbono (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) e o pentóxido de nióbio (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), são materiais estáveis, que quando em uma heteroestrutura, apresentam maior eficiência sob radiação na região do visível, sendo uma alternativa de fotocatalisador adequada, já que com junção, há aumento de sítios ativos e conseqüentemente, aumento da absorção de luz e atividade fotocatalítica. O Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> apresenta estabilidade química, robustez, e devido a acidez superficial, os fortes sítios ácidos de Lewis e Bronsted interagem com os poluentes. O g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, também robusto, não tóxico e com boa atividade fotocatalítica (Khan, et al., 2019). Quando em conjunto com o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, aumenta e melhora a absorção de luz visível, além de facilitar a transferência de carga, dessa forma, apresenta maior potencial de degradação, comparado a atuação dos compostos separados (Fidelis et al., 2025).

Diante da importância e preocupação com o meio ambiente e saúde dos seres vivos, neste trabalho o objetivo foi discutir a presença de contaminantes emergentes, como fármacos antidepressivos na natureza, destacando a FLX, e avaliar com base na literatura o potencial da fotocatalise, juntamente com a eficiência dos semicondutores, obtidos por síntese hidrotermal assistida por microondas, metodologia eficiente e simples, muito utilizada para formação de heteroestruturas que contêm boa atividade fotocatalítica, visando a degradação da FLX.

## **2. OBJETIVO**

Avaliar na literatura a atividade fotocatalítica da heteroestrutura g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>:Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, obtida por síntese hidrotermal assistida por microondas, aplicada à remediação ambiental, através da degradação de fármacos, como a FLX.

## **3. REVISÃO DA LITERATURA**

### 3.1. Contaminantes no Brasil

O uso crescente de compostos químicos e a inexistência de políticas de controle ocasionaram o aparecimento de contaminantes emergentes, em que mesmo em concentrações extremamente baixas podem causar efeitos à saúde humana e ao meio ambiente, já que não se sabe ao certo as concentrações máximas e mínimas dos poluentes que podem causar danos (Leão Gil et al., 2023). São compostos que há décadas são utilizados e foram identificados e monitorados recentemente, em razão dos possíveis riscos ao meio ambiente, tendo um crescimento exponencial devido o aumento da utilização pela população, sendo representados por diversas classes, como fármacos, produtos de beleza, químicos industriais, hormônios e pesticidas (Abreu, 2023). Apesar de essenciais no cotidiano, esses compostos no meio ambiente geram preocupação devido aos seus impactos negativos (Viancelli & Michelon, 2023).

Na década de 1970, os Estados Unidos detectaram medicamentos cardiovasculares, analgésicos e anticoncepcionais em águas residuárias, por meio dos avanços de técnicas analíticas sensíveis e mais complexas, como cromatografia líquida e gasosa (Farto, 2024). Pouco tempo depois, em 1990, foram publicados no Brasil os primeiros trabalhos, sendo sobre pesticidas, em 1999 os fármacos foram monitorados nas ETE e em águas naturais. Atualmente, há dados de monitoramento de diversos contaminantes nas matrizes aquáticas (Farto, 2024) e também no solo e no ar. Esses compostos não são legislados, portanto, não monitorados, sendo candidatos a regulamentação, a depender de resultados de ecotoxicidade, efeitos à saúde humana e potencial de bioacumulação. Assim, conhecer os riscos dessas substâncias permite antecipar e reduzir danos para gerações futuras (Montagner et al., 2017), uma vez que fazem parte do cotidiano, e o aumento populacional colabora para o crescimento e intensifica a presença de diversas substâncias como os fármacos, em ETE e ETA, em que não são completamente removidos, chegando então em rios, lagos, oceanos, solo e sedimento, além de haver o descarte incorreto dos contaminantes, como medicamentos em pias ou vasos sanitários (Costa et al., 2023).

A dispersão de resíduos em solo e água ocorre por meio de disposição, escoamento superficial de efluentes não tratados ou que não foram tratados de forma adequada, e sendo eles de alta solubilidade, podem permanecer bioativos e

persistentes em matrizes ambientais, em que mesmo em concentrações baixas, podem causar alterações hormonais e metabólicas em animais e humanos, além da formação de subprodutos ocasionados por radiações UV, fotólise, oxidação e biodegradação, agravando ainda mais o problema, já que seus efeitos também não são conhecidos (Viancelli & Michelon, 2023).

### 3.1.2 Fluoxetina

Os fármacos pertencem a uma das classes de contaminantes emergentes mais estudados em todo o mundo, sendo a segunda mais pesquisada no Brasil. Na Suíça antidepressivos são compostos prioritários a serem monitorados antes do lançamento em águas residuais, sendo feitos estudos da cinética de oxidação por fotólise direta e indireta para compreender o comportamento e analisar a degradação nas águas, ocasionado pela exposição à luz solar (Souza et al., 2022). Tais fatos são explicados pelo lançamento contínuo dessa substância no ambiente, além de seus efeitos biológicos, o que eleva o impacto ambiental. São compostos persistentes, lipofílicos e capazes de se bioacumular, e alguns medicamentos são parcialmente metabolizados pelo organismo, dessa forma, os metabólitos são excretados pela urina, indo para o meio ambiente. Os estudos confirmaram a presença dos contaminantes nas matrizes aquáticas, inclusive na água tratada, evidenciando a falha do saneamento básico (Montagner et al., 2017).

Com o aumento de transtornos psicológicos, como a depressão, nos últimos anos, principalmente após a pandemia da Covid-19, o uso de antidepressivos foi intensificado. A fluoxetina (cloridrato de N-metil-y-[4-(trifluorometil)fenoxi]-benzenopropanamina) (figura 3), primeiro medicamento desenvolvido para atuar nas fendas sinápticas entre neurônios, inibe a recaptação de serotonina, ou seja, altera o comportamento e a neurofisiologia do organismo alvo, sendo muito utilizado no mundo todo, nos Estados Unidos ocupa a 20ª posição na lista de 200 medicamentos mais prescritos (Souza et al., 2022), em 2019 e 2021 foi considerado um composto de alto risco, já em 2020 apresentou uma queda, podendo ser justificado pelo desabastecimento ocasionado pela alta demanda. Diante disso, é possível concluir que é um fármaco bastante utilizado, e por não haver regulamentação quanto à segurança ao meio ambiente, se ressalta a

importância da investigação dos seus efeitos na biota aquática, além das interações toxicológicas de misturas de medicamentos, já que vários deles, como a FLX, possuem baixa degradabilidade, tendo em vista seu propósito terapêutico (Laranjeira 2019; Zhao et al., 2021; Souza, et al., 2023).

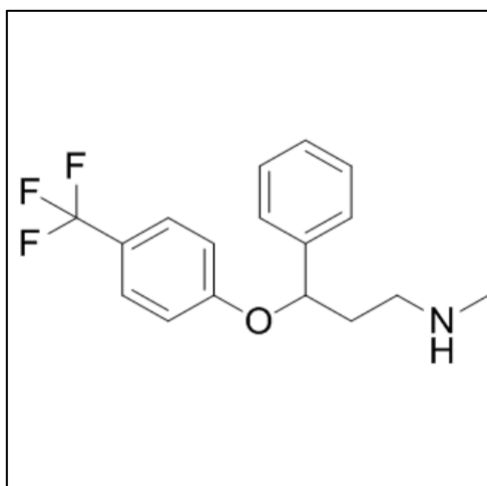


Figura 3: Fórmula química estrutural da Fluoxetina.

Fonte: Laranjeira, 2019.

O tempo de meia vida da FLX pode ser de até 7 dias a depender do ambiente que se encontra, em mamíferos é de 2 a 4 dias, e no ambiente aquático, por conta da adsorção ao sedimento, é de até 7 dias. Composto esse, que apresenta baixa degradação em ETEs, e seu coeficiente de sorção ( $K_{oc}$ ), o qual quantifica a tendência do contaminante ser retido ou adsorvido no solo ou sedimento, é de 3,82 a 5,63, ou seja, é uma substância persistente no ambiente (Laranjeira, 2019). E quando se fala sobre a vida aquática, há dados que mostram efeitos negativos sobre o crescimento, reprodução e comportamento de invertebrados e vertebrados, portanto, além da possibilidade de afetar o sistema imunológico e endócrino, há também efeitos tóxicos nessas condições, então, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) apresentam grande importância, devido à sua eficácia na degradação de contaminantes, no entanto, a formação de subprodutos durante esses processos gera preocupação, sendo necessária a ecotoxicidade dessas substâncias (Laranjeira, 2019; Zhao et al., 2021, Pan et al., 2022). A concentração da FLX no sistema hídrico pode ser estimada a partir do consumo populacional, pelo

grau de metabolização e pela excreção do medicamento, além da possibilidade de remoção ou degradação nas ETEs. (Souza et al., 2023)

Biólogos das universidades de Monash e de Tuscia investigaram durante 5 anos, guppies expostos ao Prozac (FLX), chegando a conclusão de que mesmo em baixas concentrações, o poluente alterou o comportamento dos peixes, além das características reprodutivas, como a condição corporal, aumento do tamanho do gonopódio, e vitalidade dos espermatozóides. Os guppies quando expostos à FLX, tiveram a ligação entre os níveis de atividade e condição corporal alterada, influenciando a sobrevivência e reprodução dos peixes (Monash University, 2024).

### 3.2. Leis CONAMAS

São considerados contaminantes quaisquer substâncias que possam produzir alteração qualitativa ou quantitativa, que afetem negativamente o ecossistema e provoque modificações na estrutura e funcionamento dos organismos vivos (Gabriel, 2022), surgindo a necessidade de discutir e estabelecer parâmetros que permitam o controle e avaliação dos poluentes no meio ambiente. A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 430/2011 foi instituída com o objetivo de estabelecer condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos d'água. Apesar disso, o meio aquático não fica completamente protegido de contaminação, sendo assim, os órgãos ambientais podem exigir tecnologia adequada e economicamente viável para o tratamento de efluentes. A legislação estabelece condições para que efluentes de qualquer fonte poluidora só sejam lançados diretamente em corpos hídricos se atenderem critérios específicos, como o pH entre 5 a 9, temperatura inferior a 40°C com variação de 3°C em relação ao corpo receptor, ausência de materiais flutuantes, além de parâmetros de diversos compostos como fluoreto total (10,0 mg/L), manganês dissolvido (1,0 mg/L), fenóis totais (0,5 mg/L), entre outros. Nos Sistemas de Tratamento de Esgotos Sanitários as condições são as mesmas descritas anteriormente (CONAMA, 2011).

Há diversas normativas que estabelecem padrões de qualidade de água, como a Resolução CONAMA nº 396/2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas; a Resolução

CONAMA nº 357/2005, que classifica corpos d'água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como, estabelece condições e padrões de lançamento de efluentes; e a Portaria GM/MS nº 888, que define os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, aborda agrotóxicos, e adota técnicas de tratamento para melhoria da água, como análise de clorofila-a mensalmente, se superior a 10 µg/L, análise de fitoplâncton, e caso contagem de bactérias representar 10% ou mais de fitoplâncton, é feito tratamento semanal de cianobactérias na entrada e saída das ETAs (BRASIL, Ministério da Saúde, 2021). Porém, nenhuma delas estabelece limite de concentração permitido para fármacos, nem frequência e obrigatoriedade de monitoramento desses compostos em matrizes aquáticas, mesmo com diversos estudos comprovando a presença dessas substâncias nos ambientes aquáticos (Gabriel, 2022).

### 3.3. Estações de tratamento de esgoto e água

A necessidade de soluções ambientais para tratamentos de água e descartes industriais fez surgir as ETE e ETA, uma vez que a escassez e contaminação da água atinge grande parte da população. Uma vez que o saneamento básico não está presente na vida de milhares de pessoas, algumas delas vivendo em condições sub-humanas, ocasionando a poluição da água devido a contaminação dos recursos hídricos.

No Brasil, a média para tratamento de esgotos gerados foi de 51,8%, em que apenas 8 dos 100 maiores municípios tratam 100% do esgoto, sendo a maioria localizados na região sul e sudeste, além disso, 44,8% dos brasileiros não possuem coleta de esgoto. Municípios do Sul e Sudeste apresentam bons desempenhos, enquanto Norte e Nordeste estão nas últimas posições no Ranking do Saneamento, indicando que a universalização do saneamento básico sofre com as disparidades regionais (Trata Brasil, 2025), o que também pode ser visto no gráfico da figura 4.

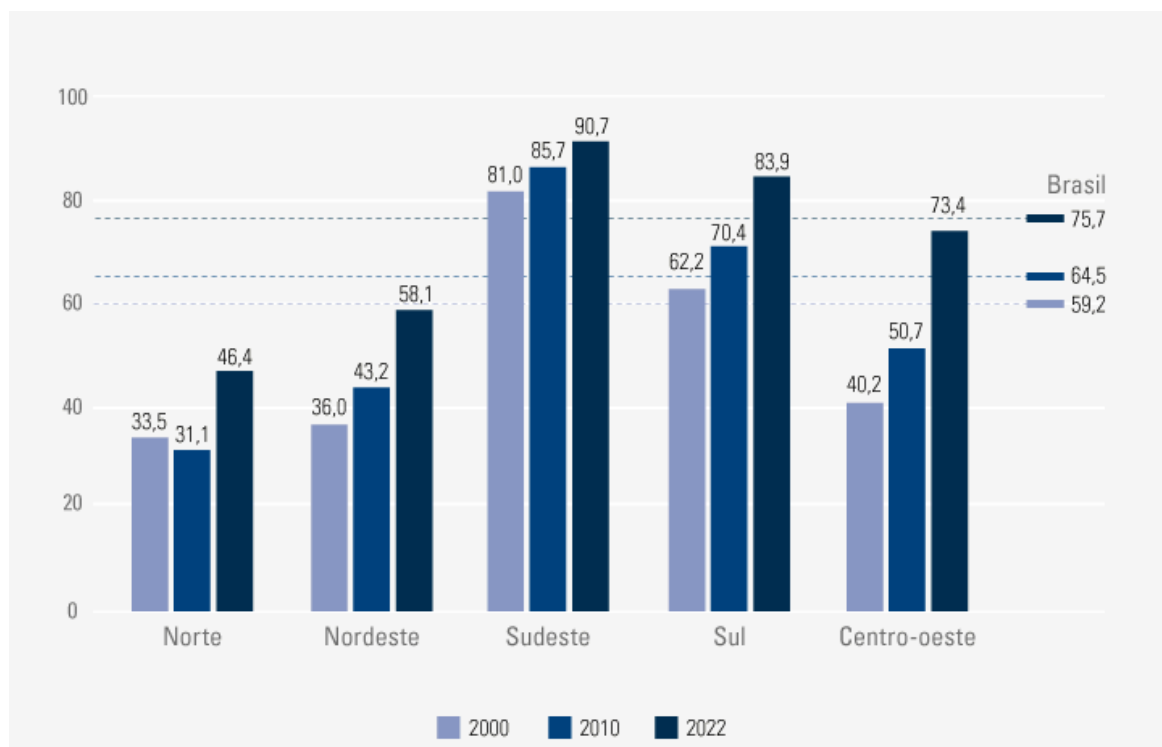


Figura 4: Gráfico que ilustra a porcentagem (%) de moradores em domicílios, por regiões, com esgotamento sanitário por rede coletora, pluvial ou fossa séptica.

Fonte: IBGE, Censo Demográfico 2022.

### 3.3.1 Estação de Tratamento de Água (ETA)

A ETA, tem como função tratar a água bruta, tornando-a potável e segura para consumo humano, garantindo padrões de potabilidade como, turbidez, pH, cloro residual, parâmetros orgânicos, inorgânicos e microbiológicos (BRASIL, Ministério da Saúde, 2021).

O tratamento se inicia na captação da água bruta, sendo superficial ou subterrânea, e segue para a ETA, passando por tratamentos físico-químicos como coagulação e floculação, em que pequenas partículas se aglomeram e são removidas por decantação e filtração. Em seguida, a cloração e fluoretação atuam eliminando microrganismos e melhorando a qualidade da água, para que, enfim, seja armazenada em reservatório e distribuída nas residências, como ilustrado na figura 5 (Santos, 2023).

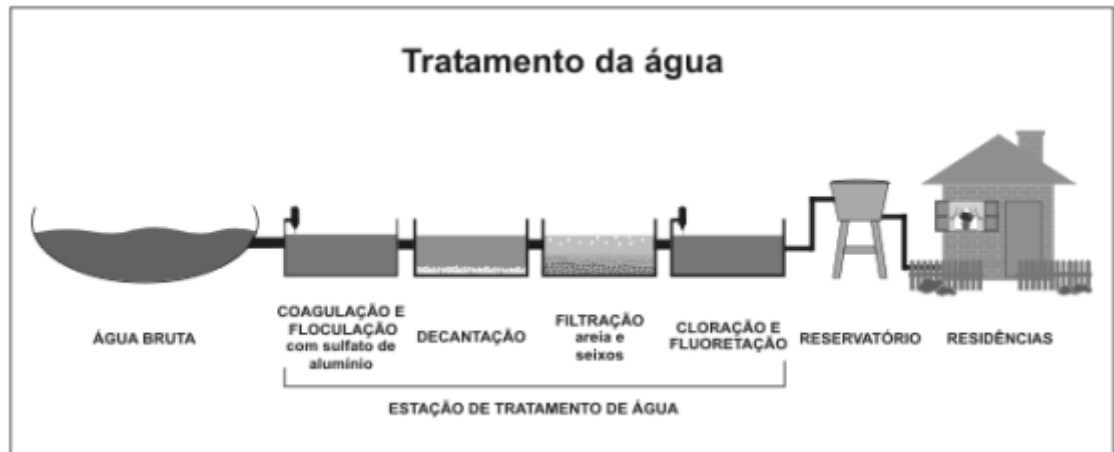


Figura 5: Esquema do tratamento convencional da água.

Fonte: Santos, 2023.

Portanto, o tratamento é focado em remover carbono, nitrogênio, fósforo e organismos microbiológicos biodegradáveis (Santos, 2023).

### 3.3.2 Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)

A ETE, responsável por tratar o esgoto doméstico antes de lançá-lo em corpos hídricos, reduzindo impactos ambientais sem causar poluição, além de que, a água também pode ser destinada ao reuso, como atividades agrícola e industrial (BRASIL, Ministério da Saúde, 2021).

### 3.3.3 Presença de fármacos nas Estações de Tratamento

Devido ao descarte incorreto, fármacos, destacando, sertralina, FLX e carbamazepina, são introduzidos no meio ambiente. Já foram observados concentrações de antidepressivos em ETAs no Canadá (7,6-20 ng/L), Costa Rica (600-100 ng/L), Bélgica (7,5-750 ng/L) e Brasil (0,58 ng/L) (Souza, 2022). Na China, estudo realizado analisou seus pontos de amostragem, e em quatro deles foi identificado antidepressivos (venlafaxina, citalopram, sertralina e fluvoxamina), no Reino Unido, citalopram e FLX foram detectados nas matrizes aquáticas, incluindo

água potável, tendo concentrações entre 2,26-2,80 ng/L e 0,27 ng/L, respectivamente. (Chen et al., 2022). A modernização de técnicas analíticas permitiu que contaminantes fossem detectados, através de cromatografia gasosa ou líquida, como medicamentos em baixas concentrações, na ordem de µg/L, sendo eles disruptores endócrinos, estrogênios e androgênios. O crescimento exponencial desses poluentes nos recursos hídricos, pode ser explicado pela urbanização de grandes centros, impactando o meio ambiente (Farto, 2024).

Nos últimos anos, os estudos sobre a presença de fármacos no meio ambiente aumentaram significativamente, sendo diversos trabalhos sobre matrizes hídricas. Nas águas superficiais, essenciais para o abastecimento humano, foram detectados diclofenaco, ibuprofeno, paracetamol, losartana e nimesulida. Já nas águas costeiras, próximas a áreas urbanas, são afetadas por efluentes domésticos, em Santos e Guarujá foram detectados cerca de 33 contaminantes emergentes, comprometendo ecossistemas marinhos. Poluentes, quando dispostos no meio ambiente de forma inadequada afeta também água subterrânea, uma fonte de contaminação são aterros sanitários, pela lixiviação, e também a atividade agropecuária, já que muitas vezes entram em contato com o solo. Por fim, uma das maiores preocupações é a falta de legislação nacional que estabelece limites para fármacos nas normas de potabilidade, uma vez que, em diversos estudos foram detectados esses contaminantes em água potável, como foi o caso em Brasília, em que encontrou carbamazepina, atenolol, sulfametoxazol, ibuprofeno e diclofenaco, e em Campinas, FLX foi detectada em águas superficiais e em efluentes (Gabriel, 2024).

Se tratando de medicamentos orais, esses passam pelo corpo humano e ocorre excreção através de fezes ou urina, indo para o efluente doméstico. Fármacos são persistentes no meio ambiente, portanto, as ETE não contém tratamento eficaz na remoção completa dessas substâncias, sendo lançadas em corpos d'água, principal via de entrada dos contaminantes no meio ambiente, sendo essa poluição através de uso humano, veterinário ou de indústria farmacêutica (figura 6). No Brasil, o descarte de remédios vencidos ou em desuso é feito de forma incorreta, muitas vezes em lixo comum, pias ou vasos sanitários, e a falta de conhecimento sobre os impactos ambientais referente a essa prática a torna mais complexa. Pelas substâncias biologicamente ativas dos fármacos, problemas toxicológicos em organismos não alvos e seres humanos podem ser causados,

estudos apontam mortalidade de pequenos crustáceos pelo paracetamol, e mudanças comportamentais em peixes-zebra por diazepam (Gabriel, 2024).

Devido a preocupação sobre qualidade dos recursos hídricos, foram criados 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) a serem alcançados até 2030, destaca-se o ODS 6, que tem como objetivo “Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água consumida e saneamento para todos”, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos. Além dele, o ODS 3 trata de fármacontaminação em questões voltadas à saúde, e o ODS 14 apresenta metas referente a contaminação da vida aquática (Gabriel, 2024).

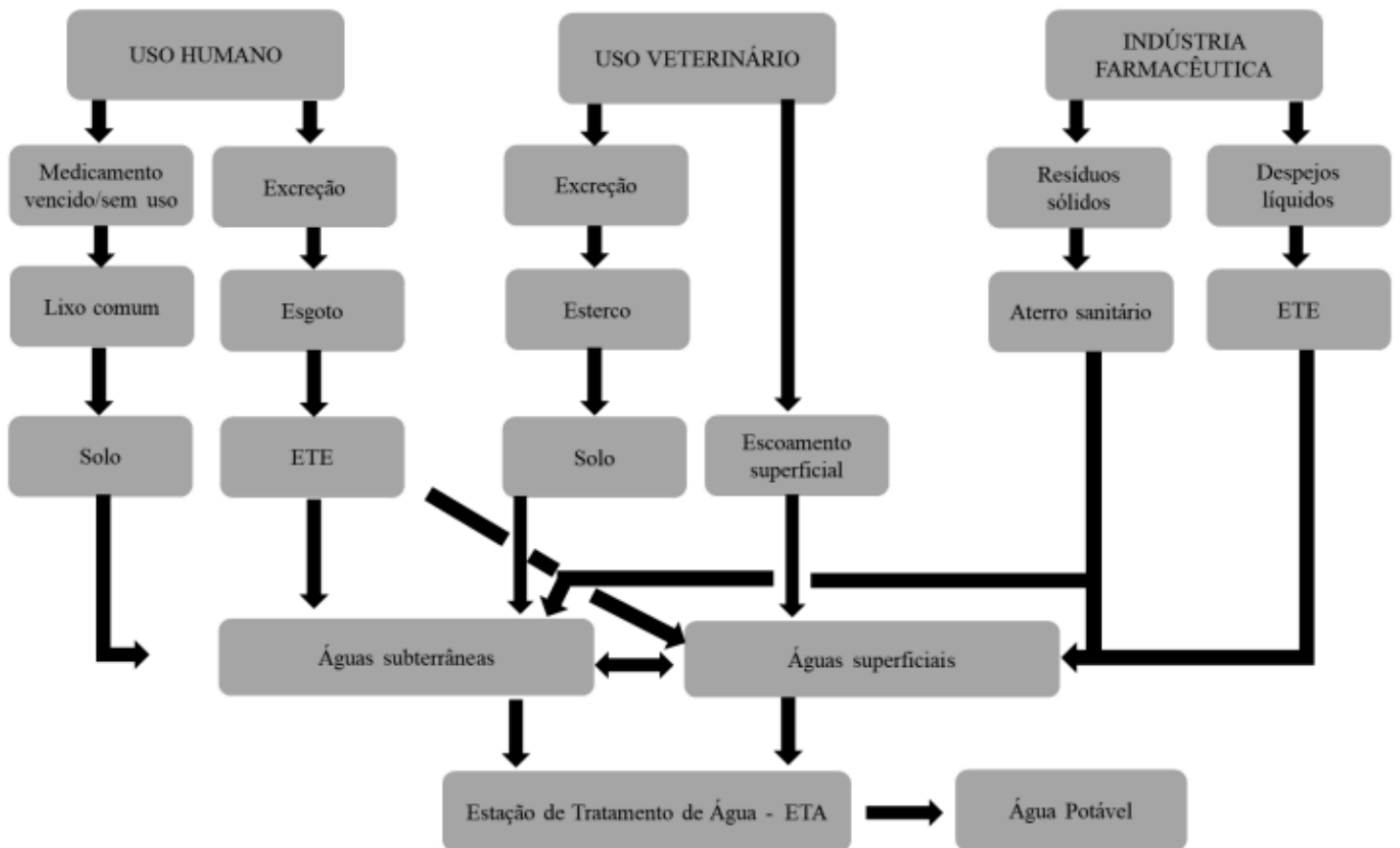


Figura 6: Rotas de contaminação por fármacos no meio ambiente.

Fonte: Gabriel, 2024.

Resultados obtidos em pesquisas realizadas em diferentes estações de tratamentos evidenciam que, a ETE Anhumas apresentou taxas de remoção de

32,40% para bisfenol A e 93,80% para estriol e na Estação Produtora de Água de Reuso (EPAR), a remoção do estriol foi de aproximadamente 57%, indicando a variação de contaminante e estação de tratamento, porém, ambos reforçam a necessidade de tratamentos complementares (Farto, 2024). O sistema de Biorreator de Membrana (BRM) combinado com Carvão Ativado Granular (CAG), obteve eficiência superior a 94,5% em remoção de agrotóxicos, e destaca-se também na remoção de fármacos, uma vez que não apenas por adsorção, mas por fornecer superfície que possibilita formação de biofilmes microbianos que metabolizam compostos farmacológicos. Além dessa metodologia, há estudos sobre os Processos Oxidativos Avançados (POAs), o qual gera radicais hidroxilas, usando radiação UV ou visível e peróxido de hidrogênio, em que a alta eficiência de remoção de microcontaminantes chama a atenção, mesmo não sendo totalmente economicamente viável, no trabalho de Santos et al. (2015), obteve como resultado remoção >90% de bisfenol A e ibuprofeno, em tempo de contato de 2h (Farto, 2024).

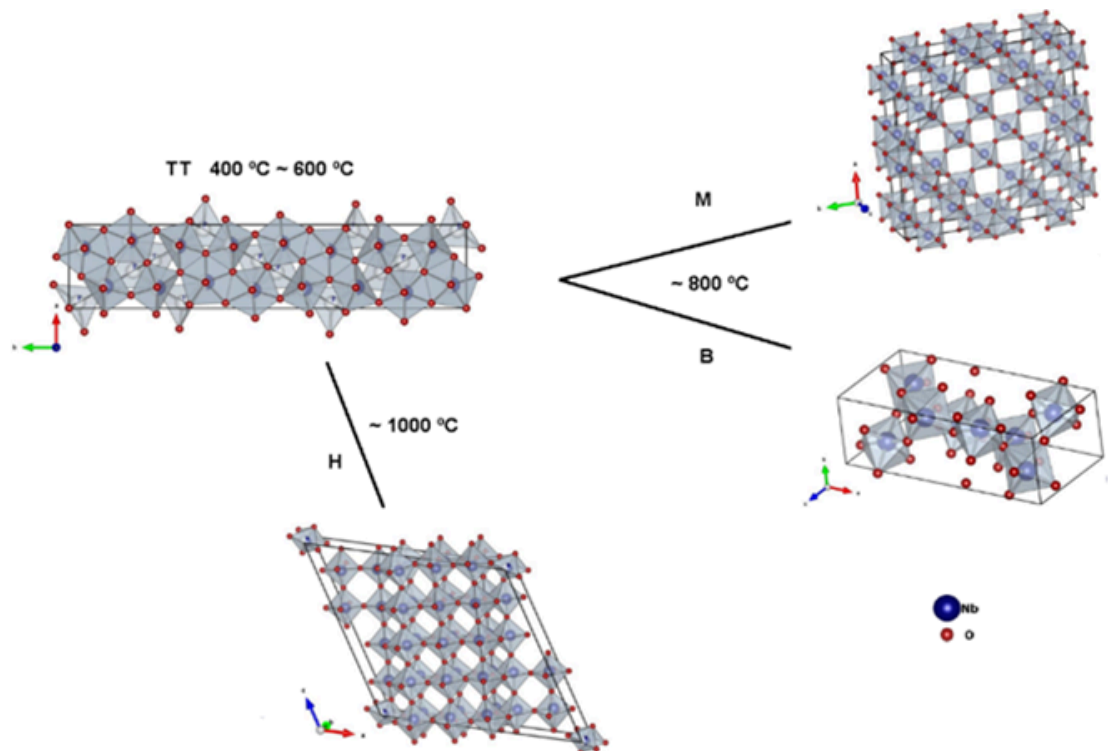
### 3.4. Materiais utilizados

#### 3.4.1 Pentóxido de Nióbio ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ )

Um material dielétrico de várias aplicações, muito utilizado em Processos Oxidativos Avançados (POAs), apresenta bons resultados, melhorando os processos de degradação de corantes e agrotóxicos, além de suas boas propriedades fotoluminescentes e fotocatalíticas, devido ao seus potenciais redox de banda de valência e condução. O pentóxido de nióbio é um semicondutor do tipo n, tem alta área superficial, boa fotoatividade e estabilidade química, explicada pela diferença de alcalinidade, solubilidade e acidez. Seu band gap varia de 3,1 a 4,0 eV, é um sólido branco, estável ao ar e insolúvel em água, possui diferentes fases e estruturas polifórmicas, as quais influenciam nas propriedades e aplicações do material. As diferentes morfologias dependem da temperatura e tempo de tratamento térmico, assim como, método da síntese, níveis de impurezas e interações com outros componentes. Dessa forma, é possível ver a riqueza estrutural do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ . Por ser semicondutor do tipo n, a absorção de luz pode ser deslocada para a região do visível, por isso, pode ser excitado na faixa de radiação eletromagnética ultravioleta

e no visível (Lima, 2021; Nico et al 2016; Du, et al., 2018; Stojadinović, et al., 2015; Da Silva et al., 2017; Idrees et al., 2019; Falcão Filho, 2023).

Óxidos que contém nióbio apresentam propriedades eletroquímicas favoráveis, aumentam a atividade catalítica e prolongam a vida do catalisador, pelo fato de absorver energia na região do ultravioleta se torna bom para fotocatalise heterogênea. As estruturas cristalinas do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  são classificadas de acordo com o estudo de Brauer (1941) e Schäfer, Gruehn e Schulte (1966), classificação que muda de acordo com a temperatura. À medida que a temperatura aumenta o  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  amorfo passa para a fase TT- $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (TT temperatura muito baixa Tief-Tief), em seguida fase T- $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (T temperatura baixa) quando atinge 400-600 °C. Ao aumentar em 800°C resulta na fase M- $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (M de média Mittel) e B- $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (B devido a aparência e características semelhantes a folhas ou Blatter). A fase H- $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (H alta temperatura Hoch) é o produto final a 1000°C (figura 7). A fase TT se forma em temperaturas inferiores a fase T, sendo essas duas semelhantes em padrões de difração de raios X, a estrutura TT nem sempre é formada a partir de componentes puros, portanto, é estabilizada por impurezas, tem menor cristalinidade e é uma fase metaestável da fase T (Lima, 2021; Uekawa et al., 2003; Nico et al., 2016; Pinto et al. 2017).



## Figura 7: Principais estruturas do Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Fonte:Nico et al, 2016.

### 3.4.2 Oxalato amoniaco de nióbio

Fonte de nióbio e precursor da síntese de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, incorpora o nióbio às superfícies, possibilitando a formação de fases cristalinas, além da formação de amostras que apresentam menor tamanho de partícula, uma maior área superficial específica, e maior concentração de grupos hidroxila na superfície (Arpini, 2016; Souza, 2023).

### 3.4.3 Hidróxido de amônio

O hidróxido de amônio é amplamente utilizado em sínteses para aumentar ou ajustar o pH da solução precursora, agindo na hidrólise dos complexos de nióbio para ocorrer a precipitação e obtenção de hidróxido de nióbio, muito importante para formação do Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Deblonde et al., 2019).

### 3.4.4 Nitreto de Carbono (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

Há promissoras aplicações em fotoquímica e fotocatalise, sendo semicondutor com faixa de banda média, respondendo bem a luz visível, além de baixo custo, facilidade de preparo, alta estabilidade química e natureza livre de poluição, se torna adequado para degradação fotocatalítica de poluentes, redução de CO<sub>2</sub> e síntese orgânica sob luz visível. Há diversos métodos para se preparar o nitreto de carbono, como deposição química a vapor, nitridação, solvotermal, e em destaque, condensação térmica de precursores ricos em nitrogênio, por sua simplicidade e acessibilidade dos precursores, sua estrutura é mostrada na figura 8. (Ong 2016; Yang 2017; Wang 2009; Schwinghammer 2014).

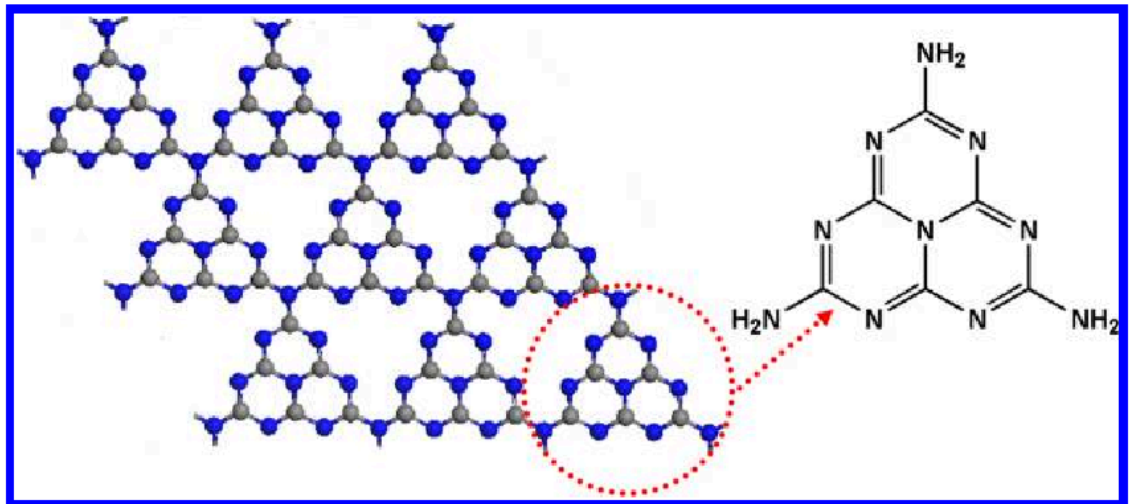


Figura 8: Estrutura do  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ .

Fonte: Cao; Yu, 2014.

#### 3.4.5 Nióbio

Pela alta temperatura de fusão, uma camada natural de óxido é formada em presença de oxigênio. No Brasil está presente a maior parte das reservas mundiais de nióbio, sendo ela 98,53%. Além disso, o país é responsável por cerca de 97% da produção mundial do metal (Santos Júnior, 2021).

#### 3.4.6 Heteroestrutura $\text{Nb}_2\text{O}_5 + g\text{-C}_3\text{N}_4$ (Fotocatalisador)

O  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  tem band gap de aproximadamente 2,7 eV, sendo favorável para reações fotocatalíticas, seja de redução ou oxidação, porém, há baixa área superficial e recombinação das cargas  $e^-/h^+$ , sendo essas limitações responsáveis por reduzir a eficiência fotocatalítica. Portanto, buscando formas de melhoria, ocorre a junção desse material com outro semicondutor, como o  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , melhorando a absorção de luz e inibindo a recombinação dos pares elétron ( $e^-$ )/buraco ( $h^+$ ) (Khan, et al., 2018).

O  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  é reconhecido como um eficiente fotocatalisador, embora apresente limitada absorção na região do visível, e tendo em vista que o  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  apresenta elevada capacidade de absorção de luz visível, ele quando incorporado ao  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , atua transferindo essa energia para o óxido, promovendo e intensificando os

processos fotocatalíticos, uma vez que a diferença entre os potenciais de condução e valência promove a transferência de carga de pares  $e^-/h^+$ , acelera a separação das cargas fotoinduzidas, diminuindo a recombinação, aumentando a atividade fotocatalítica (Da Silva, 2017; Wang et al., 2024; Fidelis, et al., 2025).

Da combinação desses compostos se origina um material com ampla aplicabilidade na degradação de compostos orgânicos, sendo a heterojunção, a combinação de materiais semicondutores cristalinos distintos, ocorrendo formação de lacuna de banda na interface dos materiais, resultando em um band-gap diferente, quando comparado os materiais isolados (Vattikutti, 2018). Essa heterojunção é do tipo II, são eficientes para fotocátalise. Nela o potencial da BC e BV de um material é menor que do material que está sendo combinado, dessa forma, o transporte de carga fotogerada entre os semicondutores é facilitado, as cargas migram em direções opostas, os  $e^-$  migram para o semicondutor com o potencial de BC mais baixo, e os buracos para a BV mais alto, o que simplifica a separação das cargas, resultando em tempo de vida mais longo, evita a recombinação e aumenta sua eficiência (Fidélis, et al., 2025; Khan, et al., 2018).

### 3.5. Síntese Hidrotermal

Processo hidrotermal que reduz o tempo de reações químicas através do aceleração das partículas, essas reações são utilizadas para formação e crescimento de cristais, como a síntese de nanomateriais. Esse método ocorre em reator fechado, podendo ser utilizado um microondas, em que a pressão e temperatura variam, as partículas se movimentam intensamente em um curto espaço, fazendo com que o choque entre elas ocorra facilmente, ocasionando a diminuição do tempo de reação. Além disso, o microondas é uma boa opção, devido ao aquecimento de maneira eficiente, as ondas eletromagnéticas geram energia de aquecimento aumentando a temperatura do sistema (entalpia), direcionando a energia diretamente para a solução, ao contrário de um forno convencional, que o calor se dissipa do forno para o reator, e então, para a solução (figura 9).

O controle de homogeneidade, tamanho da partícula, composição química e fases morfológicas também são vantagens desse método, que além dos pontos positivos descritos, é simples, contando com poucas variáveis, sendo alguma delas a temperatura, tempo, pureza do material e composição química. No processo de síntese de nanoestruturas, diferentes tipos de óxidos de nióbio, como o pentóxido de nióbio ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), são utilizados, sendo necessário também uma solução aquosa polar, como água ou soluções ácidas. (Agência de Inovação- UFSCar, 2017; Erhardt, 2018; Araújo et al., 2020; Lima, 2021; Santos Júnior, 2021; Erhardt, 2022).

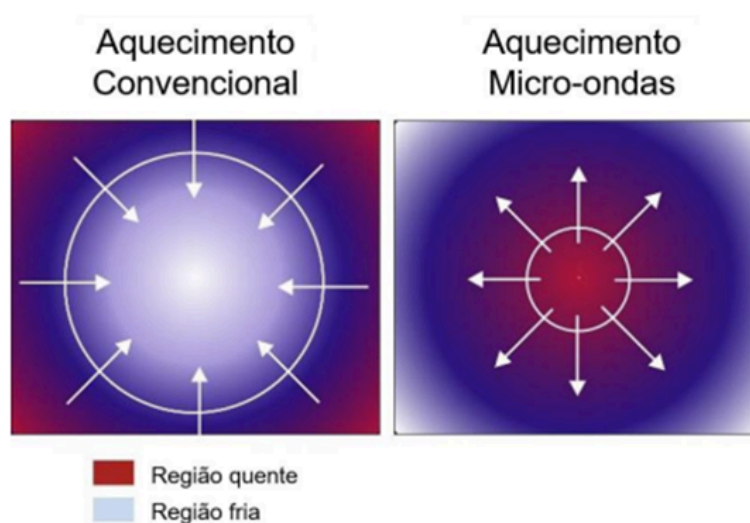


Figura 9: Diferença entre aquecimento convencional e por microondas.

Fonte: Erhardt, 2022.

A síntese hidrotérmal ocorre em reator fechado, que contém solução aquosa aquecida acima da temperatura de ebulição, resultando em pressões superiores que 1 atm, dessa forma, a água sofre alterações nas suas propriedades como sua constante dielétrica, densidade e viscosidade, favorecendo o processo cinético de hidrólise. O aumento de temperatura e de solubilidade de espécies iônicas, fazem a viscosidade baixar, ocasionando maior mobilidade, e com isso, há formação de núcleos com alta uniformidade. Essa técnica modifica o band-gap, ao haver redução dele, o funcionamento em região do espectro de luz visível é possível, sendo assim, a ativação do nanomaterial na fotocatalise não necessita de luz ultravioleta, já que apresenta atividade fotocatalítica na região de luz visível (Lima, 2021; Erhardt, 2022).

### 3.6. Métodos Análíticos

#### 3.6.1 Degradação

A remoção de fármacos em ETAs é complexo, uma vez que os mesmos são altamente solúveis e apresentam alta mobilidade neste meio, portanto, os Processos Oxidativos Avançados são explorados. Dentre eles, destaca a fotocatalise heterogênea, esse método depende de propriedades morfológicas, fotoquímicas, ópticas e de superfície do material, se destacando por sua eficiência.

Desde 2002 a FLX é observada em águas superficiais nos Estados Unidos e Canadá, em concentrações de 0,12 e 0,99 mg/L, respectivamente. Em águas residuais terciárias, 0,30-0,82 mg/L e em água potável 0,014 mg/L. Esse fármaco é estável em solução aquosa na ausência de luz, dessa forma, métodos como hidrólise não são eficientes, contudo, quando há incidência de luz, ocorre formação dos radicais que promovem a degradação (Moreira et al., 2018).

A FLX, sob fotocatalise, é degradada formando 4-(trifluorometil)fenol (TFMP) (figura 10), o qual pode ser identificado por espectrometria de massa e de fluorescência, ele apresenta certa toxicidade para organismos vivos, além da possibilidade de influenciar na degradação.

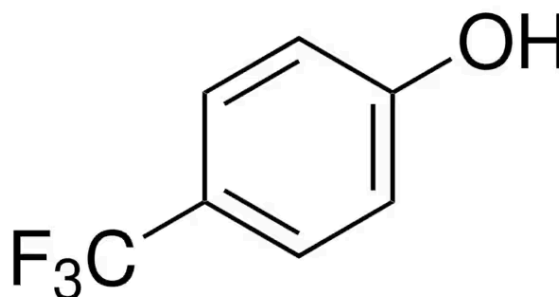


Figura 10: Estrutura química do TFMP.

Fonte: Sigma-Aldrich, 2025.

Diante disso, a busca pela mineralização completa da FLX tem se intensificado, já que com a sua degradação, é formado o TFMP (figura 11), subproduto que pode apresentar menor toxicidade após ocorrer a desalogenação. (Becerra et al., 2025; Malafatti et al., 2021).

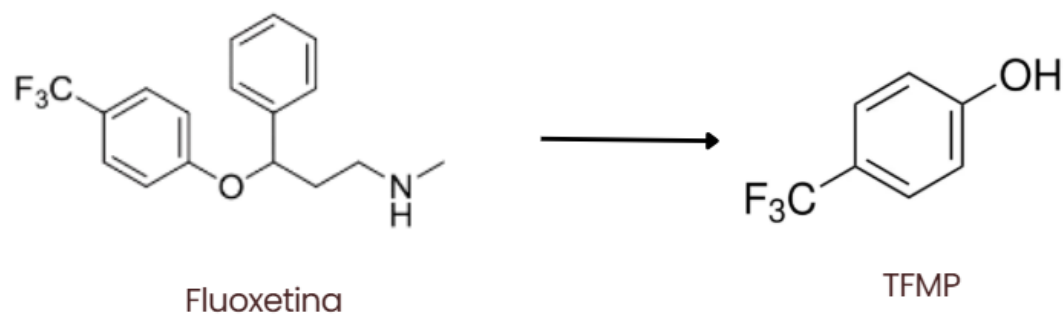


Figura 11: Esquema da degradação da FLX em TFMP.

Fonte: De autoria própria.

A degradação da FLX pode ser influenciada pelo pH. Nos estudos de Moreira et al. (2018), seus resultados mostraram uma taxa de remoção de 39% quando o pH era 11, 2% quando em pH 2 e aproximadamente 20% para demais valores (figura 12). Fato que pode ser explicado pela quantidade de moléculas neutras que favorecem e aumentam a taxa de degradação. Em pH 11, a FLX sofre desprotonação e, conforme variação de pH, varia também as taxas de absorção de luz, o que influencia na atividade fotocatalítica. Além disso, foi possível notar a formação do TFMP logo nos primeiros 20 minutos de experimento, indicando que, à medida que a FLX começa a degradar, inicia a formação dos produtos de transformações trihalogenados, sendo na maioria dos casos o TFMP (Moreira et al., 2018).

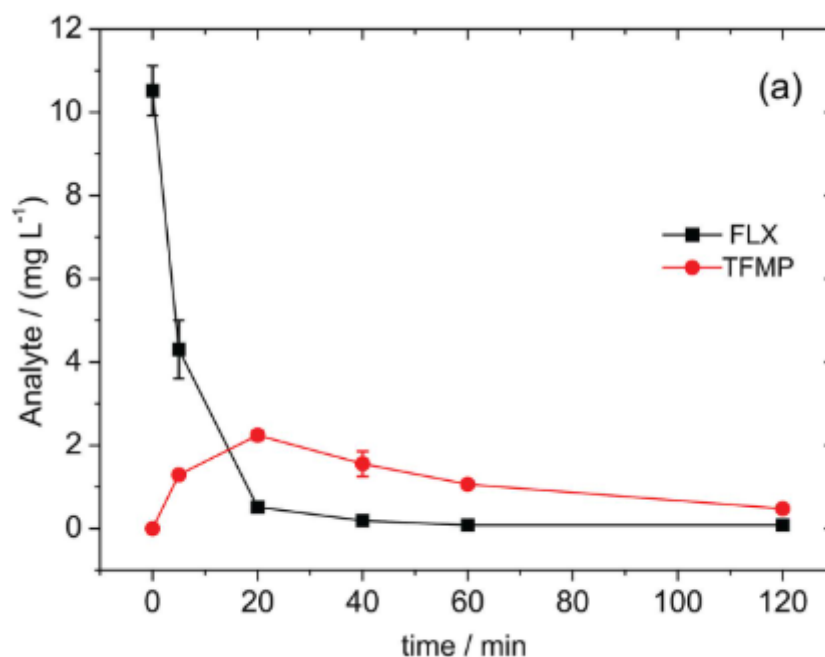


Figura 12: Degradação de FLX e formação do TFMP durante o processo de degradação sob luz UV.

Fonte: Moreira et al., 2018.

### 3.6.2 Fotocatálise Heterogênea

A fotocatalise heterogênea é um dos POAs, um método ecologicamente correto e de baixo custo, produz radicais livres reativos ( $e^-$ ,  $h^+$ ,  $OH^-$  e  $O_2$ ), na superfície do semicondutor através da absorção de luz na faixa UV/Visível, podendo ser uma técnica complementar ao utilizar óxidos metálicos semicondutores, para ocorrer a remoção de contaminantes emergentes e tratamento de efluentes antes de chegar ao esgoto ou ambiente aquático. Nesse método, os semicondutores otimizam a produção de radicais hidroxilas, absorvendo fótons em diferentes comprimentos de onda, promovendo a transição energética, e assim ocorre reações de oxidação ( $h^+$ ) e redução ( $e^-$ ) nos sítios da superfície, gerando os radicais e então, ocorre a degradação (Malafatti et al., 2021). Há relatos de descobertas desse método em 1972, e desde então é muito utilizado devido sua taxa de reação rápida,

baixo custo energético, se tornando um recurso sustentável. (Becerra et al., 2025; Santos, 2023).

Esse processo fundamentado pela absorção de luz irradiada com energia igual ou superior ao band gap do fotocatalisador, em que pela excitação de elétrons da banda de valência para a banda de condução, forma na região de energia mais baixa, portadores de carga, “buracos” ( $h^+$ ). Por fim, através das reações de oxirredução, seja direta, quando o contaminante é adsorvido no semicondutor e é oxidado pelo  $h^+$ , ou indireta, em que o par de elétrons é formado e o  $h^+$  migra para a superfície do semicondutor e ocorre oxidação de grupos superficiais formando os radicais de oxigênio, responsáveis pela degradação de poluentes orgânicos, inativando os microorganismos nocivos, ilustrado pelo esquema da figura 13. Os semicondutores absorvem luz ultravioleta foto estimulando elétrons para a banda de valência, gerando então elétrons foto gerados (Santos de Araújo, 2014; Santos, 2023).

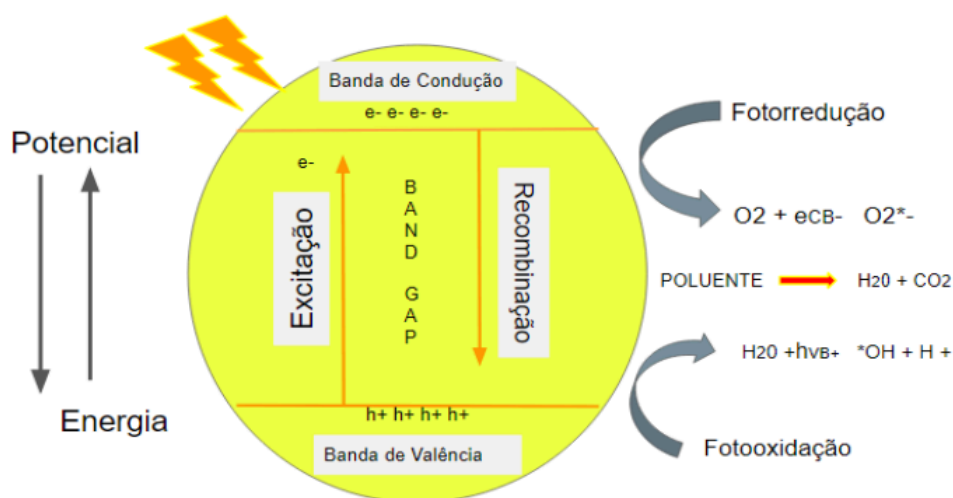


Figura 13: Esquema representativo da partícula de um semicondutor.

Fonte: Santos, 2023.

Para a reação ocorrer é necessário ter potencial de redução adequado, dessa forma, o semicondutor utilizado é selecionado com base em sua energia de band gap, para que haja transferência dos elétrons da banda de valência e banda de condução. Muitos estudos apontam o Dióxido de Titânio ( $TiO_2$ ) como um semicondutor que apresenta bons resultados, porém, novas alternativas, como o uso

do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  ou  $\text{g-C}_3\text{N}_4$ , vem sendo investigada com a intenção de ser alternativas de baixo custo, aplicações ambientalmente corretas e que tenha alta atividade de redução (Malafatti et al., 2021). O  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  tem banda de valência que possui potencial de redução adequado para que a reação ocorra e gera radicais livres para oxidar poluentes, além disso, a heterojunção de dois semicondutores, como o  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  e o  $\text{g-C}_3\text{N}_4$ , pode ser feita para que os elétrons foto gerados na banda de condução de um material seja transferido para a banda de condução de um outro material. Enquanto os  $\text{h}^+$  permanecem na banda de valência do material inicial, o que resulta na separação entre o par elétron/buraco, aumentando a atividade fotocatalítica (Lima, 2021; Falcão Filho, 2023).

### 3.6.3. Processo Fotocatalítico

As reações fotocatalíticas ocorrem nos sítios oxidantes e redutores do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , sítios que são criados pela migração de cargas do par elétron/buraco para a superfície da partícula. As etapas do processo envolvem a transferência do reagente para o fotocatalisador, seguida de adsorção do reagente na superfície, ativação e excitação fotônica, produzindo elétrons e vacâncias fotoinduzidas que promovem degradação, por fim, ocorre dessorção e remoção do produto da superfície do catalisador.

Nesse contexto, a teoria mais aceita propõe que a geração dos radicais livres que promovem a degradação, ocorre pelo semicondutor que é submetido à radiação, e permite a passagem dos elétrons da banda de valência para a banda de condução, formando os buracos ( $\text{h}^+$ ) na banda de valência, esses que oxidam o poluente ou água, produzindo radicais hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ), e o elétron na banda de condução reduz o oxigênio adsorvido no fotocatalisador. Entre as bandas, há os intervalos de energia, lacunas que não tem estados eletrônicos permitidos, sendo bandas de energia proibida, ou gap, assim, band gap, que é a energia mínima que o fóton deve fornecer ao fotocatalisador para o elétron passar da banda de valência para a banda de condução, e é o parâmetro para escolha da radiação no sistema (Falcão Filho, 2023).

### 3.7 Trabalhos Atuais

#### 3.7.1 Síntese hidrotermal assistida por micro-ondas de nanopartículas de pentóxido de nióbio e sua dopagem com lantânio.

O trabalho de Lima, 2021, teve como objetivo a síntese de pentóxido de nióbio nanoparticulado puro e dopado com lantânio, pelo método hidrotermal assistida por micro-ondas. As propriedades fotocatalíticas foram avaliadas pela degradação do azo-corante RR141, por emissão no ultravioleta. Os resultados obtidos foram positivos, uma curva constante de degradação foi alcançada, até aproximadamente 50% do corante foi degradado em 150 minutos, ao continuar até 240 minutos, pode-se notar a capacidade de degradar mais de 80% do composto. A fim de explorar resultados, foi feita a dopagem do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  com lantânio, em que observou-se uma alteração estrutural do material sintetizado, aumento da fase desordenada e porcentagem cristalina.

Dessa forma, o autor pôde concluir que nanoestruturas de pentóxido de nióbio podem ser sintetizadas de maneira rápida, simples e eficiente. A temperatura e tempo da síntese influenciam nos resultados, como rendimento, tamanho final do material e área superficial, porém, não alteram a fase cristalina (Lima, 2021).

#### 3.7.2 Impactos de óxidos metálicos nas propriedades estruturais, ópticas, dielétricas e fotocatalíticas de compósitos ternários sintetizados ( $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{MoS}_2/\text{Grafeno}$ )

O objetivo do trabalho de Ghrouri; Ahmed, 2019, foi a síntese pelo método hidrotérmico de fotocatalisadores ativos de luz visível para explorar a evolução do hidrogênio a partir da divisão da água. As heterojunções apresentam atividade fotocatalítica melhorada sob luz visível, esses fatores foram analisados pelas características das amostras preparadas e pela degradação do alaranjado de metila.

Pela espectroscopia de fotoluminescência foi observada a emissão em 450 nm, na faixa do visível, mostrando que os compósitos quando dopados com óxidos metálicos inibem consideravelmente a recombinação de pares de elétrons e lacunas, ocorrendo a separação de carga, indicando a melhor atividade fotocatalítica. Nos espectros de reflectância difusa ultravioleta-visível foi visto que o band gap das

amostras dopadas com óxidos metálicos ficaram entre 2,40-2,85 eV, dessa forma, é preciso menor potência de irradiação para excitação, sendo outro fator positivo da atividade fotocatalítica. Na degradação do alaranjado de metila, foi observado que a taxa de fotodegradação dos nanocompósitos dopados com óxidos metálicos é muito maior que os nanocompósitos não dopados, porém essa taxa muda a depender da amostra, devido ao tamanho das partículas, lacunas de banda e interrupção na recombinação de elétrons e lacunas, quando se tem partículas menores e lacuna de banda estreita ocorre maior atividade fotocatalítica, devido a faixa de absorção expandida na faixa visível.

Conclui-se então que os tamanhos de cristalito dos nanocompósitos diminuíram com diferentes tipos de óxidos metálicos como dopantes, assim como o bandgap também diminuiu após a dopagem, indo de 3,08 para 2,40 eV, além dos óxidos metálicos também aumentarem a taxa de degradação fotocatalítica do alaranjado, assim como taxa de produção fotocatalítica de H<sub>2</sub> de luz visível. (Ghourri; Ahmed, 2019)

3.7.3 Degradação de fármacos por fotocatalise heterogênea em efluente modelo sintético (Santos, 2023).

O objetivo de Santos, 2023, foi avaliar a degradação do fármaco cloridrato de propranolol pelo emprego da fotocatalise heterogênea utilizando dióxido de titânio e material carbonáceo obtido da semente de manga, e a formação de subprodutos através da espectroscopia UV-Vis e cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC). Os testes da atividade fotocatalítica foram feitos em triplicata .

Os teste iniciaram apenas com dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), tendo resultados negativos, devido ao TiO<sub>2</sub> ser um pó fino que não foi favorável para o processo de separação das partículas, após a centrifugação o pó não sedimentou e não ocorreu separação eficiente, inviabilizando as análises no UV-Vis. Em seguida os testes foram feitos com heteroestruturas, os quais apresentaram até 91% de taxa de conversão, partindo de 52% a depender do material. Pelo cromatograma de HPLC foi possível ver que em 60 minutos houve formação de subprodutos, porém, após 120 minutos diminuíram, indicando que foram degradados depois desse tempo (Santos, 2023).

3.7.4 Produção de fotocatalisadores de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  imobilizado em suporte cerâmico para fotodegradação de corante sintético em efluentes líquidos (Falcão Filho, 2023).

O intuito do trabalho foi produzir materiais cerâmicos de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  imobilizado em suporte de cerâmica vermelha de baixo custo, de fácil recuperação, quimicamente resistente e com boas propriedades fotocatalíticas, as quais foram avaliadas pela degradação do corante azul de metileno, incluindo seus ciclos de reciclagem. Pela fotocatalise ser uma tecnologia verde, é muito empregada nos tratamentos de água e efluentes, seu mecanismo é ilustrado na figura 14.

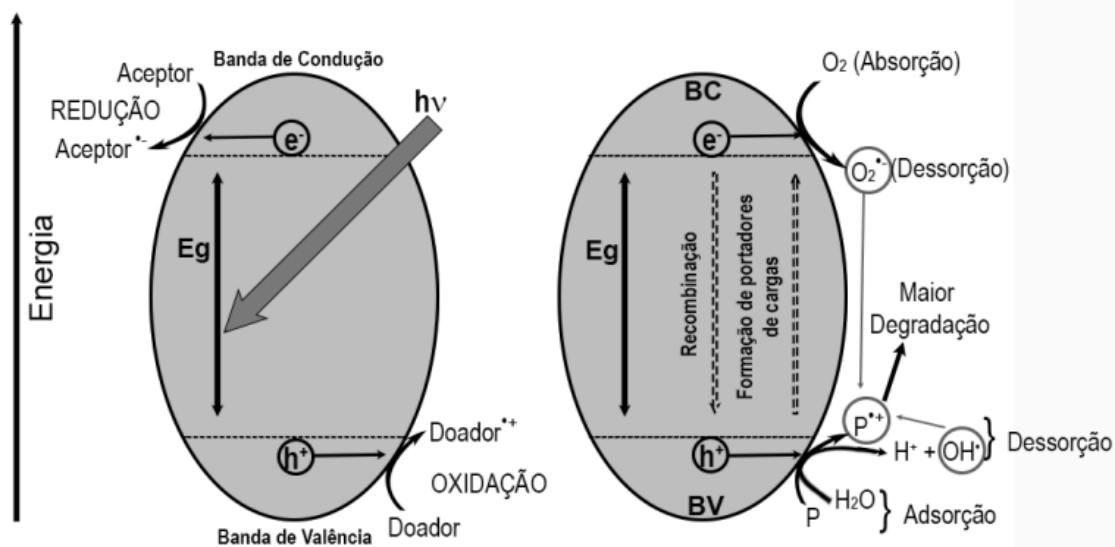


Figura 14: Esquema do mecanismo de fotocatalise, com o fotocatalisador atuando na degradação de um poluente.

Fonte: Falcão Filho, 2023.

As absorvâncias do azul de metileno em 664 nm foram medidas, a fim de obter a porcentagem de remoção e avaliar o efeito fotocatalítico. As condições das sínteses influenciam diretamente na sua atividade fotocatalítica, o aumento das

concentrações e da temperatura de queima provoca diminuição na capacidade de degradação.

O estudo cinético apontou que aproximadamente 97% do corante foi removido em 240 minutos utilizando luz artificial que simula luz solar, e em 120 minutos a degradação estava em 90%.

A eficiência do fotocatalisador foi avaliada, e chegou a conclusão de que pode ser utilizado até 5 vezes sem que haja perda de eficiência, sendo de 97,85 - 97,10 a taxa de remoção em porcentagem (figura 15).

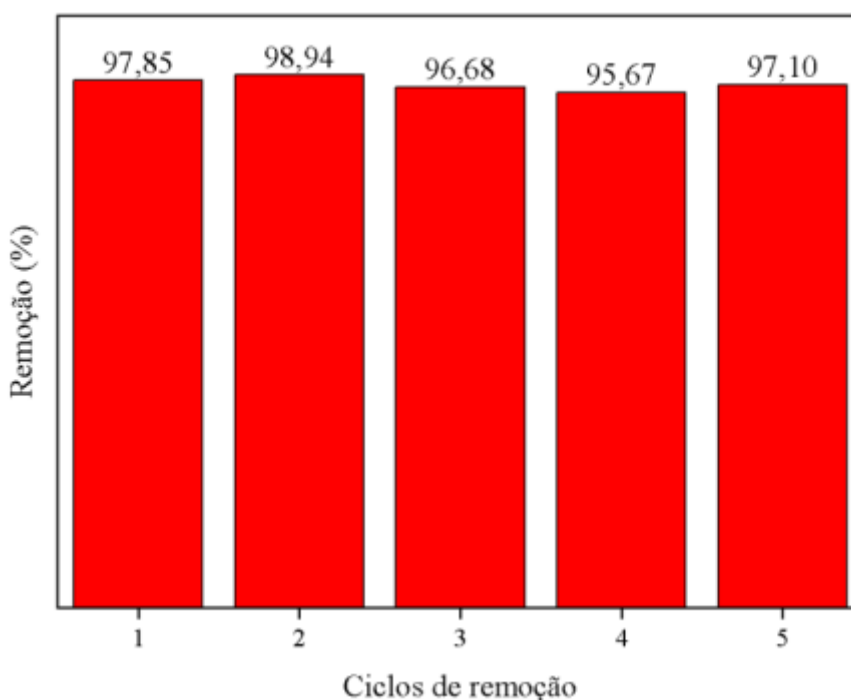


Figura 15: Taxa de remoção em porcentagem, do corante em 5 ciclos de aplicação do material fotocatalítico.

Fonte: Falcão Filho, 2023.

Portanto, a combinação da temperatura de queima e concentração de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  é importante para o bom desempenho do fotocatalisador, já que a temperatura elevada faz com que os materiais apresentem características vítreas e a concentração também elevada, forma aglomerados por conta do óxido (Falcão Filho, 2023).

3.7.5 Heteroestruturas de g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ajustadas por síntese sonoquímica: Desempenho fotocatalítico aprimorado na oxidação de poluentes emergentes sob radiação visível (Silva et al, 2017).

Como dito nesse trabalho, o g-c3n4 é um semicondutor promissor para a fotocatalise, tendo em vista seu band gap e facilidade em obter esse composto, porém, há limitações, como baixa área superficial e alta taxa de recombinação de cargas, reduzindo a eficiência fotocatalítica. Devido a esses fatos, a heterojunção é uma alternativa para melhorar a atividade fotocatalítica.

Na heterojunção do tipo II, as BC e BV estão posicionadas energeticamente abaixo das bandas do outro semicondutor, favorecendo a transferência de carga entre eles, prolongando a vida útil dos pares elétron/buraco, e consequentemente, aumentando a eficiência.

Para essa junção, usou-se o Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, que se destaca pela sua alta área superficial e boa fotoatividade para degradação de poluentes. A síntese dessa heteroestrutura foi feita por método sonoquímico baseado na junção induzida por carga superficial.

Sob irradiação visível, a heteroestrutura apresentou melhores resultados na degradação do fármaco amilorida e corante rodamina, quando comparado com os compostos isolados. Os experimentos usando g-c3n4 resultou em eficiência de 54% de degradação do corante, ao usar Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> obteve 17% após 90 minutos sob irradiação visível, já nos testes da heteroestrutura os resultados de eficiência foram 67%, 79% e 81%, como mostrado no gráfico da figura 16, confirmando a melhor atividade fotocatalítica ao juntar os semicondutores (Silva et al, 2017).

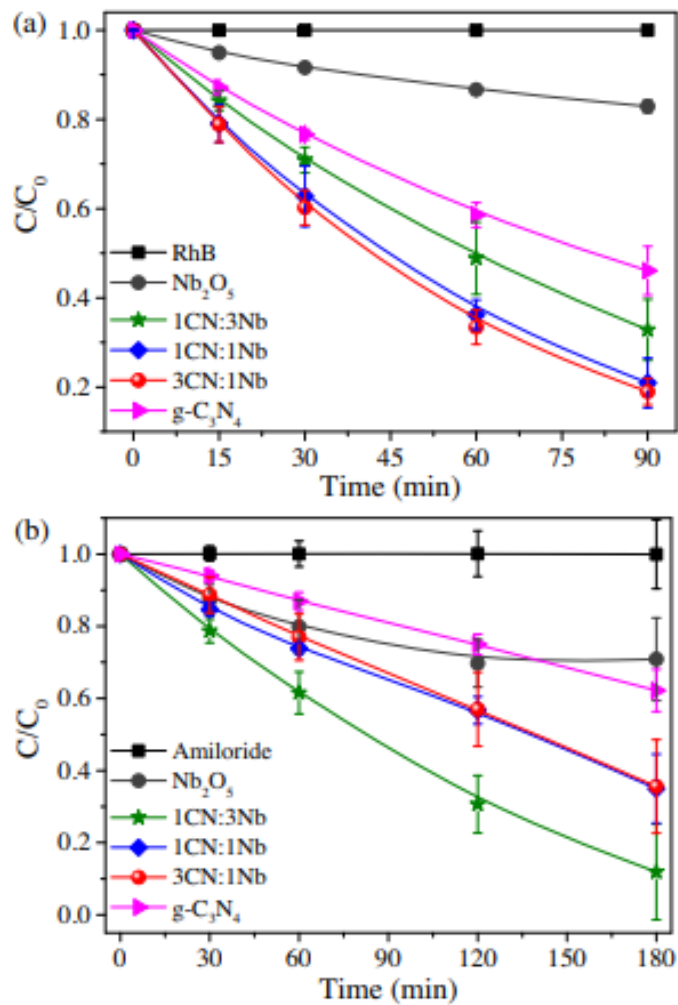


Figura 16: No gráfico (a) mostra a curva de concentração por tempo, da degradação da Rodamina, enquanto (b) está a curva de degradação do fármaco Amilorida. Em ambos estão os resultados ao usar semicondutores isolados, e a heteroestrutura.

Fonte: Silva et al, 2017

O que também foi possível observar no artigo de Leite et al, 2025, em que utilizando heteroestrutura  $gC_3N_4 : Nb_2O_5$  para degradar bisfenol A, os resultados obtidos foram satisfatórios, reforçando o uso da luz visível e a melhor separação de cargas facilitando a formação de radicais.

Ao usar o  $Nb_2O_5$  puro foi obtido 19% de remoção, enquanto com  $g-c_3n_4$  a remoção foi de 93% após 2 horas, e ao utilizar os dois semicondutores em uma só estrutura, foi obtido 69% de remoção após 1 hora, e 99% após 2 horas, sendo em pH3. Já quando o pH sobe para 10, a taxa de remoção ao se usar  $g-c_3n_4$  após 2

horas vai para 44,6 , e utilizando a heteroestrutura foi obtido 67%, confirmando também a influência do pH na degradação.

Além disso, foi avaliado sua eficiência com base nos ciclos, e o que concluiu com base na análise de difração de raios X, é que a heteroestrutura não sofre alterações na estrutura, mantendo a integridade e força sob exposição a radiação solar, sofrendo perda apenas de massa durante etapas de recuperação e reutilização (Leite et al, 2025).

3.7.6 Estudo por fotólise de laser flash de heteroestruturas  $Nb_2O_5/g-C_3N_4$  como fotocatalisadores eficientes para a evolução de  $H_2$  molecular (Tariq et al., 2023).

Estudo pensado em melhorar a atividade sob luz visível, a baixa taxa de recombinação, estabilidade e eficiência, para evolução molecular de  $H_2$ . O fotocatalisador foi sintetizado por método hidrotérmico, e para o experimento utilizou-se pulsos de laser como fonte de irradiação.

Foi testado a heteroestrutura, porém, também foram feitos experimentos com  $g-c_3n_4$  puro, e os resultados obtidos mostraram que a junção entre os dois compostos apresentou baixa recombinação de cargas, ou seja, houve melhor separação de cargas, favorecendo a vida útil de elétrons e buracos, que foi calculado através de Espectroscopia de Absorção Transiente a Laser.

Na figura 17, ilustra a migração dos elétrons da superfície da BC para a BV, e em seguida a recombinação com as lacunas (Tariq et al., 2023).

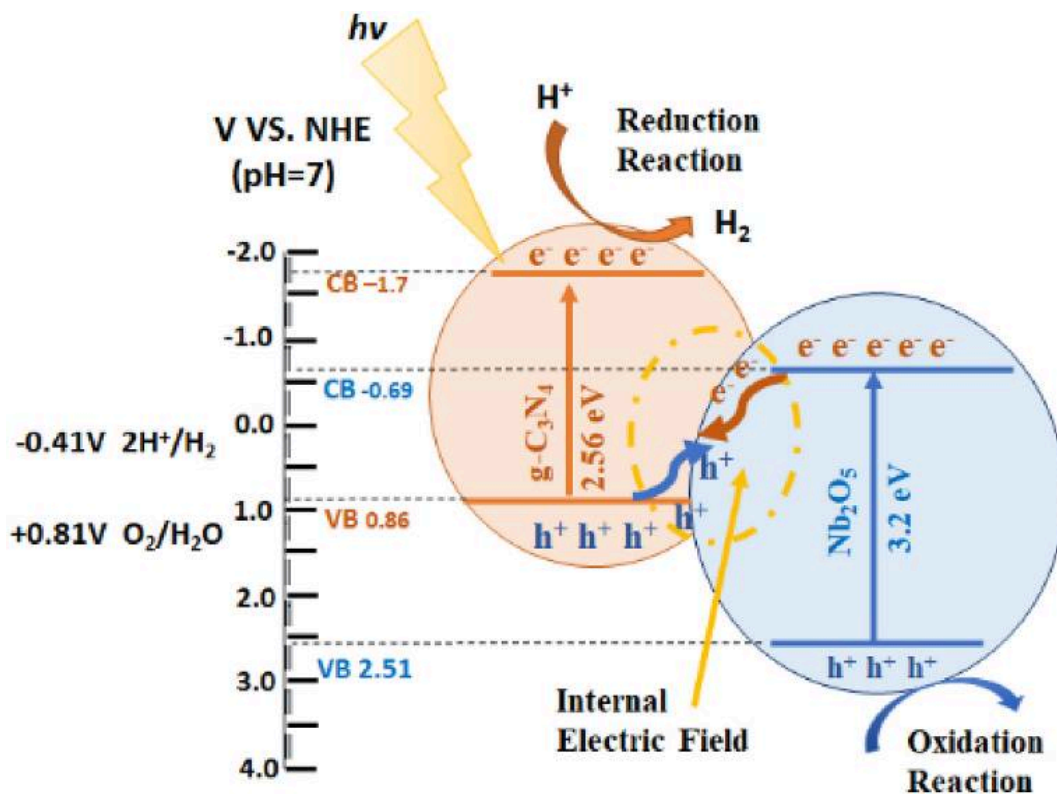


Figura 17: Mecanismo da fotocatalise.

Fonte: Tariq et al., 2023.

3.7.7 Remoção fotocatalítica do antidepressivo fluoxetina de meios aquosos utilizando os catalisadores TiO<sub>2</sub> P25 e g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Fotiou; Lykos; Konstantinou, 2024).

A fotocatalise foi feita utilizando TiO<sub>2</sub> P25 e g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> a fim de degradar FLX. Para os experimentos utilizou-se água ultrapura em escala laboratorial, e efluente hospitalar em escala piloto.

Inicialmente, houve experimentos fotolíticos que mostraram que após 240 minutos de irradiação solar houve 84% de remoção da concentração inicial de FLX.

Em escala laboratorial, os experimentos com TiO<sub>2</sub> P25 tiveram duração de 240 minutos. Foi observado que em 120 minutos os níveis de toxicidade gerados por subprodutos eram baixos e houve completa remoção de FLX. Ao utilizar o g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ativado por uv-visível, ao final do processo, aproximadamente 91% da concentração inicial foi removida. Assim como o processo anterior, nesse caso também ocorreu a

transformação da FLX em subprodutos, porém, esses são menos propensos a se acumularem em organismos.

Dessa forma, os resultados mostraram que o TiO<sub>2</sub> P25 apresentou melhores resultados que o g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, sendo mais eficiente, e rápida devido a alta geração de radicais hidroxila, responsáveis pela degradação completa do fármaco.

Já na escala piloto, a remoção completa de FLX ocorreu em 180 minutos usando TiO<sub>2</sub> P25, já ao usar g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, obteve-se 90% de remoção ao final do processo. Ambos, resultaram em subprodutos com toxicidade menor que o produto inicial.

Portanto, o TiO<sub>2</sub> P25 resultou em melhores resultados em ambas escalas, podendo alcançar degradação completa do fármaco (Fotiu; Lykos; Konstantinou, 2024).

### 3.7.8 Comparação dos principais resultados dos trabalhos que envolveram a fotocatalise.

Autor/ Ano	Objetivo	Síntese / Material	Poluente Avaliado	Principais Resultados	Observações Importantes
Lima (2021)	Sintetizar Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> puro e dopado com La; avaliar atividade	Hidrotermal assistida por micro-ondas	Corante RR141	~50% em 150 min; >80% em 240 min	Dopagem com La aumentou fase desordenada e cristalinidade; síntese rápida e simples
Ghrouri & Ahmed (2019)	Sintetizar compósitos Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /MoS <sub>2</sub> /Grafeno para H <sub>2</sub>	Hidrotermal	Alaranjado de Metila	Alteração do band gap (3.08 → 2.40–2.85 eV); maior taxa de degradação	Alteração do band gap reduziu recombinação, aumentou absorção visível e eficiência
Santos (2023)	Degradar propranolol usando TiO <sub>2</sub> e material carbonáceo	Fotocatalise heterogênea	Propranolol	TiO <sub>2</sub> puro não foi eficiente (não sedimentou); heteroestruturas: 52–91% de remoção	Formação de subprodutos até 60 min, degradados após 120 min (HPLC)
Falcão Filho (2023)	Produzir Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> imobilizado em cerâmica para fácil recuperação	Imobilização em suporte cerâmico	Azul de metileno	90% em 120 min; 97% em 240 min; 5 ciclos mantendo eficiência	Concentração e temperatura de queima influenciam; temperaturas altas → fase vítrea
Silva et al. (2017)	Criar heteroestruturas g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> via síntese sonoquímica	Sonoquímica	Rodamina e Amilorida	g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> : 54%; Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : 17%; heteroestruturas: 67–81%	Heterojunção tipo II melhora separação de cargas
Leite et al. (2025)	Avaliar g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> na degradação de BPA	Heteroestrutura g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Bisfenol A	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> puro: 19%; g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> : 93% (2 h); heteroestrutura: 99% (2 h)	pH influencia: em pH 10 remoção cai; estrutura mantém integridade ao longo dos ciclos
Tariq et al. (2023)	Estudar heteroestruturas Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> para produção de H <sub>2</sub>	Hidrotermal + laser flash	— (Produção de H <sub>2</sub> )	Separação de cargas muito melhor na heterojunção	Laser flash mostrou maior tempo de vida de e <sup>-</sup> /h <sup>+</sup>
Fotiu; Lykos; Konstantinou (2024)	Degradar fluoxetina em escala lab. e piloto com TiO <sub>2</sub> P25 e g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Fotocatalise com luz solar	Fluoxetina	Lab: TiO <sub>2</sub> removeu 100% em 120 min; g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> : 91%. Piloto: TiO <sub>2</sub> : 100% em 180 min; g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> : 90%	Fotólise atingiu 84% em 240 min; TiO <sub>2</sub> superior devido à maior formação de •OH

Tabela 2: Comparação de resultados dos trabalhos analisados da literatura.

Fonte: Autoria própria.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presença de contaminantes emergentes no meio ambiente, especialmente em matrizes aquáticas, tem despertado crescente preocupação em todo o mundo, o que torna necessário o desenvolvimento de métodos eficientes para a remoção desses compostos em águas superficiais e efluentes. A FLX, fármaco amplamente discutido na literatura, apresenta elevada persistência e resistência aos métodos convencionais de tratamento, além de baixa biodegradabilidade. Tal comportamento é preocupante, uma vez que tanto a substância quanto seus subprodutos, podem ocasionar efeitos tóxicos à vida aquática e aos seres humanos.

Diante disso, os POAs, como a fotocatalise heterogênea, têm se destacado pela elevada eficiência na degradação de poluentes orgânicos, além da viabilidade econômica e baixo impacto ambiental. A fotocatalise, por meio dos semicondutores e por radiação ultravioleta ou visível, é capaz de promover a degradação da FLX, uma vez que o fármaco é estável na ausência de luz e depende da irradiação para gerar espécies oxidantes responsáveis pela degradação.

Semicondutores como  $\text{TiO}_2$  e  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  apresentam alta atividade fotocatalítica, contudo, quando o  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  combinado em uma heteroestrutura com o  $\text{g-C}_3\text{N}_4$ , observa-se aumento significativo na eficiência do processo, explicado pela melhor separação das cargas fotoinduzidas e da ampliação do espectro de absorção de luz, assim, a taxa de remoção do fármaco aumenta. A formação dessa heteroestrutura pode ser realizada por meio da síntese hidrotermal assistida por micro-ondas, em que possibilita maior controle sobre a estrutura, morfologia e fases do material, resultando em produtos com alta atividade fotocatalítica.

A degradação da FLX leva à formação do subproduto TFMP, em menos de 1 hora. Esse intermediário apresenta toxicidade considerável para organismos aquáticos, portanto, após oxidação completa, seu potencial tóxico é reduzido pela desalogenação, seguida da mineralização. Além disso, diversos fatores influenciam a taxa de degradação, como o pH, o tipo de semicondutor, o tempo e a intensidade de irradiação. A heteroestrutura  $\text{Nb}_2\text{O}_5:\text{g-C}_3\text{N}_4$  permite absorção de luz na região

visível, contribuindo para o aumento da eficiência fotocatalítica e redução dos custos energéticos, visto que pode ser aplicada em ambientes naturalmente iluminados. Logo, essas variáveis podem ser analisadas a fim de otimizar e melhorar o processo de degradação, com o intuito de se tornar um tratamento possível em estações de tratamento, seja desenvolvendo novas metodologias, ou integrando as já existentes.

Até a finalização deste trabalho, não havia relatos de estudos que investiguem a degradação da FLX por meio da heteroestrutura  $g\text{-C}_3\text{N}_4\text{:Nb}_2\text{O}_5$ , evidenciando a oportunidade para pesquisas futuras, já que por resultados de trabalhos publicados foi possível ver a eficiência da junção de semicondutores, incluindo do  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  e do  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , tanto para fármacos quanto para corantes.

Por fim, a importância do monitoramento, não apenas dos contaminantes, mas também de seus subprodutos é evidenciada, assim como, pesquisas que avaliem a toxicidade dessas substâncias, cada vez mais detectadas em recursos hídricos, e seus possíveis impactos sobre os organismos vivos. Além disso, é essencial promover a conscientização da população quanto aos riscos associados ao descarte inadequado de contaminantes, principalmente fármacos, no meio ambiente.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, F. G. D. Impactos e desafios futuros no monitoramento dos contaminantes emergentes. Em *Open Science Research X* (p. 1660–1670). Editora Científica Digital, 2023. <https://doi.org/10.37885/230111742>

Agência de Inovação- UFSCar – Universidade Federal de São Carlos. *Síntese hidrotérmica: aparato assistido por micro-ondas para síntese hidrotérmica de óxidos nanoestruturados (patente)*. São Carlos, 2017. Disponível em: <https://www.inovacao.ufscar.br/pt-br/news/patentes/148-sintese-hidrotermica>. Acesso em: 13 set. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Saneamento Básico*. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/saneamento/>. Acesso em: 8 out. 2025.

ARAÚJO, M. N. P.; VIEIRA, W. E. da S.; CARVALHO, L. P. de; MELO, H. D. F. de; SOUZA, T. C. de; BERENQUER, R. A. Obtenção e caracterização de hidroxiapatita obtida por síntese hidrotermal e caracterização. *Research, Society and*

*Development*, v. 9, n. 11, p. e535911100247, 2020.  
<https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.10247>

ARPINI, B. H. *Estudo da preparação de biodiesel utilizando diferentes compostos de nióbio como catalisadores na transesterificação de óleos vegetais e álcoois de cadeia curta*. 2016. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016. Disponível em: [https://sappg.ufes.br/tese\\_drupal/tese\\_9761\\_Disserta%E7%E3o%20Bruno%20Final%20%282%29%20%281%29.pdf](https://sappg.ufes.br/tese_drupal/tese_9761_Disserta%E7%E3o%20Bruno%20Final%20%282%29%20%281%29.pdf). Acesso em 04 set. 2025

ANGELO, J.; ANDRADE, L.; MADEIRA, L. M.; MENDES, A. An overview of photocatalysis phenomena applied to NOx abatement. *Journal of Environmental Management*, v. 129, p. 522-539, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.006>

BECERRA, L. C. I. F.; MALAFATTI, J. O. D.; PARIS, E. C.; JOYA, M. R.; MOREIRA, A. J.; REIS, R. Y. N.; LIMA, J. B.; VARGAS, C. A. P.; PÁEZ, A. M. R. Photocatalytic degradation of fluoxetine mediated by CuO/CuWO<sub>4</sub> nanostructures. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 174, n. 106215, p. 106215, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2025.106215>

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n.º 430, de 13 de maio de 2011: dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores, complementa e altera a Resolução n.º 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial da União*: n. 92, p. 89, 16 mai. 2011. Disponível em: [https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/CONAMA\\_n.430.2011.pdf](https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/CONAMA_n.430.2011.pdf). Acesso em: 10 set. 2025.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo 2022: rede de esgoto alcança 62,5% da população, mas desigualdades regionais e por cor e raça persistem. *Agência IBGE de Notícias*, 23 fev. 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/39237-censo-2022-rede-de-esgoto-alcanca-62-5-da-populacao-mas-desigualdad-es-regionais-e-por-cor-e-raca-persistem>. Acesso em: 01 out. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n.º 888, de 7 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS n.º 5, de 28 de setembro de 2017, 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*. Disponível em: [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888\\_07\\_05\\_2021.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html). Acesso em: 29 set. 2025.

BRASIL. Ministério das Cidades. *Painel de Esgotamento Sanitário 2022*. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/es>. Acesso em: 16 set. 2025.

CAO, Shaowen; YU, Jiaguo. G-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-based photocatalysts for hydrogen generation.

The journal of physical chemistry letters, v. 5, n. 12, p. 2101–2107, 2014. <https://doi.org/10.1021/jz500546b>

CHEN, Y.; WANG, J.; XU, P.; XIANG, J.; XU, D.; CHENG, P.; WANG, X.; WU, L.; ZHANG, N.; CHEN, Z. Antidepressants as emerging contaminants: Occurrence in wastewater treatment plants and surface waters in Hangzhou, China. *Frontiers in public health*, v. 10, p. 963257, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.963257>

COSTA, R. DOS S., MEDEIROS, A. N., AMARAL, V. S. DO, & NAVONI, J. A. (2023). Contaminantes emergentes: O que sabemos dessa temática sob a perspectiva da divulgação científica brasileira? *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 13(8), 304–316. <https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2022.008.0024>

DA SILVA, G. T. S. T.; CARVALHO, K.T.G; LOPES, O.F.; RIBEIRO, C. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> heterostructures tailored by sonochemical synthesis: Enhanced photocatalytic performance in oxidation of emerging pollutants driven by visible radiation. *Applied catalysis. B, Environmental*, v. 216, p. 70–79, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.05.038>

DEBLONDE, G. J. P.; BENGIO, D.; BELTRAMI, D.; BÉLAIR, S.; COTE, G.; CHAGNES, A. Niobium and tantalum processing in oxalic-nitric media: Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·nH<sub>2</sub>O and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·nH<sub>2</sub>O precipitation with oxalates and nitrates recycling. *Separation and purification technology*, v. 226, p. 209–217, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.05.087>

DU, Y.; ZHANG, S.; WANG, J.; WU, J.; DAI, H. Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Nanowires In-Situ Grown on Carbon Fiber: A High-Efficiency Material for the Photocatalytic Reduction of Cr(VI). *J. Environ. Sci.* 2018, 66, 358–367. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.04.019>.

ERHARDT, Camila Stockey. *Obtenção de Ga-ZnO por síntese hidrotermal assistida por micro-ondas e sua caracterização microestrutural e de propriedades fotofísicas*. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia – Ciência e Tecnologia dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/257509/001165847.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 07 set. 2025.

ERHARDT, Camila Stockey. *Síntese hidrotermal assistida por microondas do óxido de zinco dopado com bismuto e sua caracterização microestrutural, de propriedades físicas e atividade fotocatalítica*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/180125/001069491.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 02 set. 2025.

FALCÃO FILHO, R. Dos S. *Produção de fotocatalisadores de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> imobilizado em suporte cerâmico para fotodegradação de corante sintético em efluentes líquidos*. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/server/api/core/bitstreams/e65f677b-7445-43e1-ac76-a124daab4efe/content>. Acesso em: 02 out. 2025.

FARTO, C. D. *Contaminantes emergentes em coleções hídricas na região da grande João Pessoa -PB: Avaliação da presença e eficiência de remoção nas estações de tratamento de água e esgotos*. 2024. 125f, Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil E Ambiental, Universidade Federal Da Paraíba, Joao Pessoa, 2024. Disponível em: [https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/32676/1/CindyDeinaFarto\\_Tese.pdf](https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/32676/1/CindyDeinaFarto_Tese.pdf). Acesso em: 25 set. 2025

FIDELIS, M. Z; FARIA, J.; SANTACRUZ, W.; LIMA, T. S.; LENZI, G. G.; MOTHEO A. J. Niobium-based catalysts in advanced oxidation processes: A systematic review of mechanisms, material engineering, and environmental applications. *Environments*, v. 12, n. 9, p. 311, 2025. <https://doi.org/10.3390/environments12090311>

FOTIOU, D.; LYKOS, C.; KONSTANTINO, I.. Photocatalytic removal of the antidepressant fluoxetine from aqueous media using TiO<sub>2</sub> P25 and g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> catalysts. *Journal of environmental chemical engineering*, v. 12, n. 1, p. 111677, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111677>

GABRIEL, F. G. *Contaminantes Emergentes No Brasil: Ocorrência De Fármacos Em Matrizes Aquáticas E Educação Ambiental. O Que Sabemos Sobre Esta Temática?*. 2022. 105f Tese (Mestrado) –Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal, 2022. Disponível em: <https://memoria.ifrn.edu.br/bitstream/handle/1044/2492/FI%C3%A1via%20Gomes%0Gabriel.pdf?sequence=3>. Acesso em: 16 set. 2025.

GHOURI, M. I.; AHMED, E. Impacts of metal oxides on the structural, optical, dielectric and photocatalytic properties of synthesized ternary composite (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/MoS<sub>2</sub>/Graphene). *Ceramics international*, v. 45, n. 17, p. 23196–23202, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.08.015>

GOMES, M. P., & GOMES, L. P. (2024). Tracking the surge of psychiatric pharmaceuticals in urban rivers of Curitiba amidst and beyond the SARS-CoV-2 pandemic. *The Science of the Total Environment*, 954(176685), 176685. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176685>

IDREES, F.; DILLERT, R.; BAHNEMANN, D.; BUTT, F.B; TAHIR, M. In-situ synthesis of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> heterostructures as highly efficient photocatalysts for molecular H<sub>2</sub> evolution under solar illumination. *Catalysts (Basel, Switzerland)*, v. 9, n. 2, p. 169, 2019. <https://doi.org/10.3390/catal9020169>

KHAN, Ibrahim; BAIG, Nadeem; QURASHI, Ahsanulhaq. Graphitic carbon nitride impregnated niobium oxide (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) type (II) heterojunctions and its

synergetic solar-driven hydrogen generation. *ACS applied energy materials*, v. 2, n. 1, p. 607–615, 2019. <https://doi.org/10.1021/acsaem.8b01633>

LARANJEIRA, D. R. A. S. *Avaliação do risco ambiental da fluoxetina em sedimentos marinhos para invertebrados aquáticos*. 2019. 115f Tese (Doutorado em Ciências, área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-11042019-144512/publico/2019LaranjeiraAvaliacao.pdf>. Acesso em: 9 out. 2025.

LEÃO GIL, M., MELGAÇO, S., LIMA DA CUNHA, D., MAIA BILA, D., & MONTEIRO DA FONSECA, E. (2023). Contaminantes emergentes e indicadores de contaminação em ambientes costeiros brasileiros: ocorrência, distribuição geográfica e procedimentos analíticos utilizados. *Pesquisas Em Geociências*, 50(2), e131523. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.131523>

LEITE, A.; SILVA, R. M; SOUZA, F. G. de; SILVA, G. T. S. T. da; AQUINO, J. M; JUNIOR, A. C. R; CARDOSO, D. R.; AZEVEDO, E. B.; SOUZA, F. L. de; RIBEIRO, C. Enhancing visible light photocatalytic degradation of bisphenol A with g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>:Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> heterojunction. *Applied surface science*, v. 711, n. 164085, p. 164085, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.164085>

LIMA, G. A. De. *Síntese hidrotermal assistida por micro-ondas de nanopartículas de pentóxido de nióbio e sua dopagem com lantânio*. 2021. 67f Tese (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) Programa de Pós- Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Santa Catarina, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/229913/PCEM0582-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: 6 out. 2025.

MALAFATTI, João O. D; MOREIRA, A. J.; SCIENA, C. R.; SILVA, T. E. M. S; FRESCHI, G. P. G; PEREIRA, E. C.; PARIS, E. C. Prozac® removal promoted by HAP:Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanoparticles system: by-products, mechanism, and cytotoxicity assessment. *Journal of environmental chemical engineering*, v. 9, n. 2, p. 104820, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104820>

MONASH UNIVERSITY. *Antidepressant pollution is rewiring fish behaviour and reproduction, study finds*. Monash University, 2024. Disponível em: <https://www.monash.edu/science/news-events/news/2024/antidepressant-pollution-is-rewiring-fish-behaviour-and-reproduction%2C-study-finds>. Acesso em: 7 out. 2025.

MONTAGNER, C. C., VIDAL, C., & ACAYABA, R. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. *Química nova*, 2017. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170091>

MOREIRA, A. J.; BORGES, A. C.; SOUSA, B. B. de; MENDONÇA, V. R. de; FRESCHI, C. D.; FRESCHI, G. P. G. Photodegradation of fluoxetine applying different photolytic reactors: Evaluation of the process efficiency and mechanism. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2018. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20180250>

NICO, C.; MONTEIRO, T.; GRAÇA, M. P. F. Niobium Oxides and Niobates Physical Properties: *Review and Prospects. Prog. Mater. Sci.* 2016, 80, 1–37. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.02.001>

ONG, W.-J.; TAN, L.-L.; NG, Y. H.; YONG, S.-T.; CHAI, S.-P. Graphitic Carbon Nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)-Based Photocatalysts for Artificial Photosynthesis and Environmental Remediation: Are We a Step Closer To Achieving Sustainability? *Chem. Rev.* 2016, 116 (12), 7159–7329. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00075>.

PAN, C. ZHU, F.; WU, M; JIANG, L.; ZHAO, X; YANG, M. Degradation and toxicity of the antidepressant fluoxetine in an aqueous system by UV irradiation. *Chemosphere*, v. 287, n. Pt 4, p. 132434, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132434>

PEREIRA, O. A. P., MOREIRA, A. J., ARAÚJO, K. C., NOBREGA, E. T. D., SILVA, J. D. P., MALAFATTI, J. O. D., PARIS, E. C., PEREIRA, E. C., FRESCHI, G. P. G., GIRALDI, T. R., & BERTHOLDO, R. (2025). Evaluation of photocatalytic degradation of emerging contaminants and bacterial inhibition by silver tungstate synthesized by microwave-assisted hydrothermal method. *Water, Air, and Soil Pollution*, 236(14). <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08605-8>

PINTO, M. B.; SOARES, A. L.; MELLA ORELLANA, A.; DUARTE, H. A.; DE ABREU, H. A. Structural, Electronic, and Thermodynamic Properties of the T and B Phases of Niobia: First-Principle Calculations. *J. Phys. Chem. A* 2017, 121 (12), 2399–2409. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.6b11383>.

RABA, A. M.; BARBA-ORTEGA, J.; JOYA, M. R. The Effect of the Preparation Method of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Oxide Influences the Performance of the Photocatalytic Activity. *Appl. Phys. A* 2015, 119 (3), 923–928. <https://doi.org/10.1007/s00339-015-9041-3>

SANTOS JÚNIOR, A. G. Dos. *Óxidos nanoestruturados de nióbio obtidos por processo hidrotermal aplicados como eletrodo de capacitor eletroquímico*. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bhttps://www.ana.gov.br/saneamento/itstream/handle/10183/231560/001132616.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 02 set. 2025

SANTOS, L. V. S.; MEIRELES, A. M.; LANGE, L. C. Degradation of antibiotics norfloxacin by Fenton, UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Journal of Environmental Management*, v. 154, p. 8-12, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.021>

SANTOS, T. P. dos. *Degradação de fármacos por fotocatalise heterogênea em efluente modelo sintético*. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciências Farmacêuticas (PPGFARMA), Universidade do Estado da Bahia (UNEB), Salvador, 2023. Disponível em: <https://saberaberto.uneb.br/server/api/core/bitstreams/6eebed6a-1046-4cb1-b8de-4ab742cbfd4/content>. Acesso em: 29 ago. 2025

SANTOS DE ARAÚJO, K.; MALPASS, G., R., P.; URIAS, P., M.; CUNHA, P., C., R., da. *PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS E EFLUENTES INDUSTRIAIS*. 2014. Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2014/II-033.pdf>>. Acesso em: 03 out. 2025.

SCHWINGHAMMER, K.; MESCH, M. B.; DUPPEL, V.; ZIEGLER, C.; SENKER, J.; LOTSCH, B. V. Crystalline Carbon Nitride Nanosheets for Improved Visible-Light Hydrogen Evolution. *J. Am. Chem. Soc.* 2014, 136 (5), 1730–1733. <https://doi.org/10.1021/ja411321s>.

SHARMA, A.; AHMAD, J.; FLORA, S. J. S. Application of advanced oxidation processes and toxicity assessment of transformation products. *Environmental research*, v. 167, p. 223–233, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.07.010>

SIGMA-ALDRICH. *4-(Trifluoromethyl)phenol* 97%. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/aldrich/178470>. Acesso em: 03 nov. 2025.

SILVA, G. T. S. T. da; CARVALHO, K. T. G.; LOPES, O. F.; RIBEIRO, C. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> heterostructures tailored by sonochemical synthesis: Enhanced photocatalytic performance in oxidation of emerging pollutants driven by visible radiation. *Applied catalysis. B, Environmental*, v. 216, p. 70–79, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.05.038>

SILVA, J. A. Advanced oxidation process in the sustainable treatment of refractory wastewater: *A systematic literature review*. *Sustainability*, v. 17, n. 8, p. 3439, 2025. <https://doi.org/10.3390/su17083439>

SOUZA, C. P. F. A. DE, KLIGERMAN, D. C., BEZERRA, G. M., & OLIVEIRA, J. L. DA M. (2023). Environmental risk caused by drug waste in the city of Rio de Janeiro, Brazil, during the SARS-Cov19 pandemic. *Ciencia & saude coletiva*, 28(3), 711. <https://doi.org/10.1590/1413-81232023283.05722022>

SOUZA, L. P.; CARNEIRO, J. G. M.; LASTRE-ACOSTA, A. M.; RAMOS, B.; TEIXEIRA, A. C. S. C. Environmental persistence of the antidepressant fluoxetine and its pharmaceutical alternative: *Kinetics of oxidation and mathematical simulations*. *Water*, v. 14, n. 21, p. 3536, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14213536>

SOUZA, M.A. de. *Influência do método de síntese nas propriedades físico-químicas e no desempenho fotocatalítico do Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>*. Dissertação (Mestrado em Química)-Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/39230/1/Influ%C3%AanciaM%C3%A9todoS%C3%ADntese.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2025.

STOJADINOVIĆ, S.; TADIĆ, N.; RADIĆ, N.; STEFANOV, P.; GRBIĆ, B.; VASILIĆ, R. Anodic Luminescence, Structural, Photoluminescent, and Photocatalytic Properties of Anodic Oxide Films Grown on Niobium in Phosphoric Acid. *Appl. Surf. Sci.* 2015, 355, 912–920. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.07.174>.

TARIQ, Muhammad Umair *et al.* Laser flash photolysis study of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> heterostructures as efficient photocatalyst for molecular H<sub>2</sub> evolution. *Heliyon*, v. 9, n. 6, p. e16772, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16772>

TRATA BRASIL. *Índices de saneamento básico no Brasil. Trata Brasil*, 2023. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/>. Acesso em: 8 out. 2025.

TRATA BRASIL. *O que é saneamento?* Trata Brasil, 2023. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/o-que-e-saneamento/>. Acesso em: 04 dez. 2025.

TRATA BRASIL. Resumo Executivo – *Ranking do Saneamento 2025*. São Paulo, 2025. Disponível em: [https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2025/07/Resumo-Executivo\\_Ranking-Saneamento-2025-FINAL.pdf](https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2025/07/Resumo-Executivo_Ranking-Saneamento-2025-FINAL.pdf). Acesso em: 01 out. 2025.

TRATA BRASIL. *Resumo Executivo – Ranking do Saneamento de 2024*. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2024/04/Resumo-Executivo-Ranking-do-Saneamento-de-2024-TRATA-BRASIL-GO-ASSOCIADOS.pdf>. Acesso em: 8 out. 2025.

UEKAWA, N.; KUDO, T.; MORI, F.; WU, Y. J.; KAKEGAWA, K. Low-Temperature Synthesis of Niobium Oxide Nanoparticles from Peroxo Niobic Acid Sol. *J. Colloid Interface Sci.* 2003, 264 (2), 378–384. [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(03\)00460-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00460-0).

VATTIKUTI, S. V. P. Heterostructured Nanomaterials: Latest Trends in Formation of Inorganic Heterostructures. In *Synthesis of Inorganic Nanomaterials*; Elsevier, 2018; pp 89–120. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101975-7.00004-X>.

VIANCELLI, A., & MICHELON, W. (2023). CONTAMINANTES EMERGENTES: UM RISCO À SAÚDE. Em *QUALIDADE DE VIDA: da saúde humana à saúde ambiental* (p. 36–59). Instituto de Inteligência em Pesquisa e Consultoria Científica Ltda, 2023. <https://doi.org/10.56041/9786599841835-3>

WANG, X.; MAEDA, K.; THOMAS, A.; TAKANABE, K.; XIN, G.; CARLSSON, J. M.; DOMEN, K.; ANTONIETTI, M. A Metal-Free Polymeric Photocatalyst for Hydrogen Production from Water under Visible Light. *Nature Materials*. 2009, 8 (1), 76–80. <https://doi.org/10.1038/nmat2317>.

WANG, Xiaofeng *et al.* Efficient Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>@g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> heterostructures for enhanced photocatalytic CO<sub>2</sub> reduction with highly selective conversion to CH<sub>4</sub>. *Inorganic chemistry frontiers*, v. 11, n. 1, p. 123–132, 2024. <https://doi.org/10.1039/D3QI01333B>

YANG, P.; OU, H.; FANG, Y.; WANG, X. A Facile Steam Reforming Strategy to Delaminate Layered Carbon Nitride Semiconductors for Photoredox Catalysis. *Angew. Chemie Int. Ed.* 2017, 56 (14), 3992–3996. <https://doi.org/10.1002/anie.201700286>

