

Leandro SILVA* 

Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, Brasil
leandro.silva3@aluno.uepb.edu.br

Geralda DE LIMA* 

Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, Brasil
gihvania@servidor.uepb.edu.br

Carlos Antônio DE LIMA* 

Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, Brasil
caplima@servidor.uepb.edu.br



GEOGRAPHIA
OPPORTUNO
TEMPORE



TRATAMENTO DE EFLUENTE CONTAMINADO POR FARMACOS, UTILIZANDO FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA ATIVADA POR TiO₂/ RADIAÇÃO SOLAR

Treatment of Effluent Contaminated by Drugs, using Heterogeneous Photocatalysis Activated by TiO₂/ solar Radiation

Tratamento de Efluente Contaminado por Fármacos, utilizando Fotocatálise Heterogênea Ativada por TiO₂/Radiação Solar

RESUMO

Os Processos fotocatalíticos são muito importantes, pois podem tratar contaminantes emergentes presentes no meio ambiente. Devido a sua eficiência, à aplicação associando semicondutores pode catalisar a reação para degradar contaminantes de estruturas complexas. Os fármacos são considerados contaminantes emergentes, e mesmo em pequenas quantidades podem trazer sérios riscos à saúde humana, aos animais e ao meio ambiente. O objetivo deste artigo foi elaborar um estudo para tratar efluentes do fármaco oxitetraciclina, através de fotocatalise heterogênea, ativada por dióxido de titânio, assistido por UV natural, em meios oxigenados (por processos de agitação e aeração), considerando aspectos ambientais fundamentais de lançamento no meio ambiente. O efluente de oxitetraciclina foi caracterizado e quantificado através de observações no espectrofotômetro UV Vis Pro 700, onde foi delimitado à área do espectro da oxitetraciclina, as observações que quantificam a degradação do efluente, foram ajustadas para $\lambda = 370$, do espectro de absorbância. O reator fotocatalítico foi abastecido com 1 litro do efluente de oxitetraciclina, equivalente a 20 mg/l, variando em ensaios com pH-5, pH-9, pH-7. Concluindo que o processo de fotocatalise heterogênea (TiO₂/UV-natural) em meios aquosos oxigenados é muito eficiente em degradar efluentes de oxitetraciclina, degradando 20 mg/l de oxitetraciclina (100% do efluente) no intervalo de tempo de 1 hora de reação fotocatalítica; apresentando-se como uma alternativa promissora para a degradação deste tipo de contaminante.

Palavras-chave: riscos ambientais; contaminante emergente; fotodegradação.

ABSTRACT

Photocatalytic Processes are very important as they can treat emerging contaminants present in the environment. Due to their efficiency, the associated application of semiconductors can catalyze the occurrence of degradation of contaminants in complex structures. Medicines are considered emerging contaminants, and even in small quantities can pose serious risks to human health, animals, and the environment. The objective of this article was to develop a study to treat effluents of the drug oxytetracycline through heterogeneous photocatalysis, activated by titanium dioxide, assisted by natural UV, in oxygenated media (through improvement and aeration processes), considering fundamental environmental aspects of promoting the environment. The oxytetracycline effluent was characterized and quantified through observations on the UV Vis Pro 700 Instrument, where it was limited to the area of the oxytetracycline spectrum, the observations that quantify the degradation of the effluent were adjusted to = 370 of the absorbance spectrum, admitted as per. The photocatalytic reactor was filled with 1 liter of oxytetracycline effluent, equivalent to 20 mg/l, varying in tests with pH-5, pH-9, pH-7. Concluding that the heterogeneous photocatalysis process (TiO₂/UV-natural) in oxygenated aqueous media is very efficient in degrading oxytetracycline effluents, degrading 20 mg/l of oxytetracycline (100% of the effluent) in 1 hour of photocatalytic reaction. It proved to be an efficient method, presenting results that classify it as a very promising process for the degradation of this type of contaminant.

Keywords: environmental risks; emerging contaminant; photodegradation.

RESUMEN

Los procesos fotocatalíticos son muy importantes ya que pueden tratar contaminantes emergentes presente en medio ambiente. Debido a su eficiencia, la aplicación que combina semiconductores puede catalizar la reacción para degradar contaminantes de estructuras complejas. Los productos farmacéuticos se consideran contaminantes emergentes e incluso en pequeñas cantidades pueden suponer graves riesgos para la salud humana, los animales y el medio ambiente. El objetivo de este artículo fue desarrollar un estudio para tratar efluentes del fármaco oxitetraciclina mediante fotocatalisis heterogênea, activada por dióxido de titanio, asistida por UV natural, en medios oxigenados (mediante procesos de agitación y aireación), considerando aspectos ambientales fundamentales para la promoción del medio ambiente. El efluente de oxitetraciclina se caracterizó y cuantificó mediante observaciones en el instrumento UV Vis Pro 700, donde se delimitó al área del espectro de oxitetraciclina, las observaciones que cuantifican la degradación del efluente se ajustaron a = 370, del espectro de absorbancia. El reactor fotocatalítico se llenó con 1 litro de efluente de oxitetraciclina, equivalente a 20 mg/l, variando en las pruebas con pH-5, pH-9, pH-7. Concluyendo que el proceso de fotocatalisis heterogênea (TiO₂/UV-natural) en medios acuosos oxigenados es muy eficiente en la degradación de efluentes de oxitetraciclina, degradando 20 mg/l de oxitetraciclina (100% del efluente) en un intervalo de tiempo de 1 hora de reacción fotocatalítica; presentándose como una alternativa prometedora para la degradación de este tipo de contaminante.

Palabras clave: riesgos ambientales; envenenamiento emergente; fotodegradación.

INTRODUÇÃO

A água é um bem essencial para manutenção da vida no planeta terra, esse bem atravessa um período de risco iminente devido às contaminações de seus corpos hídricos através de interferências antropogênicas como: desmatamento de áreas, eutrofização de aquíferos, contaminação de efluentes em mananciais. Essas contaminações dos leitos podem ser agravadas por fatores como a falta de conscientização, a precariedade da manutenção de ambientes naturais e frágeis legislações quanto ao uso desse recurso (Varsha; Senthil Kumar; Senthil Rathi, 2022) e (Eskandari Damaneh *et al.*, 2022).

No Brasil fatores como: uso indiscriminado de medicamento; falta de fiscalização dos órgãos públicos; falta de conscientização da população, uso indiscriminado de resíduos farmacológicos; tendem, a longo prazo, agravar a contaminação desses corpos hídricos (Gabriels; Willems; Van Orshoven, 2022) e (Aguera; Plaza-Bolaños; Ación Fernández, 2020). Esses resíduos podem ser carregados para corpos hídricos, dentre eles, substâncias consideradas contaminantes emergentes que, de acordo com suas composições, podem comprometer às superfícies aquáticas, vida marinha e lençóis freáticos. Devido à complexidade de mitigação de seus efeitos contaminantes; muitas pesquisas demonstram resultados preocupantes da contaminação destes agentes no solo, na água e no ar. Existem vários registros desses resíduos detectados em estações de tratamento (ETE's e ETA's) (Tong *et al.*, 2021) e (Rudke *et al.*, 2022).

Os processos convencionais (floculação, coagulação, desinfecção) muitas vezes não removem os contaminantes emergentes. Essas substâncias podem retornar ao meio ambiente, ou se acumular, e em longo prazo pode desestabilizar o solo, rios, aquíferos, entre outros (Sotelo-Cornejo, 2021).

A comunidade científica debruça-se sobre o tema, apresentando novas técnicas que indiquem a detecção desses interferentes farmacológicos em estações de tratamento de água, esgoto e no meio ambiente conforme (Senthil Rathi; Senthil Kumar; Show, 2021). Os antibióticos são substâncias pertencem a essa classe de contaminantes (Emergentes) e é estudado em diversas pesquisas as quais relacionam suas concentrações com os potenciais danos ao meio ambiente (Azam *et al.*, 2020).

Dentre os diversos tipos de POA's, a Fotocatalise heterogênea com o uso de TiO₂, destaca-se pelos resultados expressáveis, amplamente divulgada em trabalhos acadêmicos. Diante do exposto, essa técnica apresenta-se como um recurso tecnológico e meio de pesquisa que deve ser explorado, aprimorado e aplicado em diferentes ambientes de tratamento com estruturas de

pequeno e grande porte, a exemplo de estações de tratamento de águas e de esgotos (ETA's e ETE's) (Sivaranjane; Kumar, 2021).

Os processos fotocatalíticos vêm apresentando excelentes resultados na degradação desses poluentes, possuem diversas aplicações, por exemplo, em esgotos industriais, águas subterrâneas, solos contaminados, descoloração de efluentes, e emissões atmosféricas, entre outros. A fotocatalise heterogênea utilizando semicondutor dióxido de titânio, assistido por ultravioleta (natural/artificial); vem sendo aplicada em muitas pesquisas científicas, onde os resultados mostram-se eficientes em especial, na decomposição de compostos orgânicos de estruturas complexas (García-Garay; Franco-Herera; Machuca-Martínez, 2020). Pode degradar vários compostos por meio de um fotocatalisador e radiação ultravioleta. Alguns semicondutores, como dióxido de titânio, possuem a capacidade de converter luz em outro tipo de energia, resultando na formação de pares elétron/gap (e⁻ + h⁺) e conseqüentemente radicais. Esses radicais são do tipo hidroxila (^oOH) e podem oxidar e mineralizar compostos orgânicos (Zammit *et al.*, 2019).

As vantagens mais significativas deste tipo de procedimento são representadas pela grande eficiência na degradação de compostos orgânicos tóxicos sem a necessidade de recorrer ao uso de outros oxidantes químicos mais agressivos (Qian *et al.*, 2019).

O objetivo deste trabalho foi aplicar fotocatalise heterogênea (TiO₂/UV-Natural) para degradação do efluente farmacológico oxitetraciclina, sendo uma proposta promissora para remoção de contaminantes emergentes.

METODOLOGIA E MATERIAIS

O trabalho foi realizado no Campus I da Universidade Estadual da Paraíba, no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande – Bodocongó, possui as seguintes coordenadas geográficas: Latitude de 7° 13' 50" Sule Longitude de 35° 52' 52" W.GR. O reator foi direcionado para a posição leste, iniciando suas atividades às 10 horas da manhã.

Regentes químicos

Foram utilizados oxitetraciclina veterinária (Desvet produtos veterinários 82,5 g de oxitetraciclina em 100 g de produto) onde para produzir a solução estoque 1,21 gramas do fármaco foi diluído em 1 litro de água destilada. Para produção do reagente de Na₂CO₃ (1% m/v) 1 grama

foi diluída em 100ml de água destilada. Na produção do reagente Cloramina-T PA (6% m/v) 6 gramas diluído em 100ml de água destilada (Êxodo Científica).

A degradação da oxitetraciclina ocorreu no interior do reator, figura 1, o efluente é armazenado em um compartimento, chegando a chicana (por gravidade) recebe o contato da radiação solar, quando a bomba hidráulica lança o efluente ao compartimento, ocorrendo o processo por batelada.

Figura 1- reator de foto reação utilizando TiO₂ ativado por UV – natural



Fonte: Os autores (2023).

Procedimento experimental

Inicialmente foi feito um planejamento experimental do tipo fatorial 2³. As variáveis de estudo foram pH, carga do catalisador (TiO₂ = g/l) e concentração do efluente (Co = mg/l). Os níveis para cada fator foram: máximos (+1) e o outro mínimo (-1), com pontos centrais e três fatores (variáveis independentes).

Os experimentos foram feitos com radiação solar e um tempo de 2 horas em triplicata. Antes dos experimentos, foi preparada uma solução estoque aquosa de oxitetraciclina para obtenção da curva de calibração e para a retirada de alíquotas necessárias para se preparar a solução de oxitetraciclina (20 mg L⁻¹) em água destilada. Em cada experimento foi feito o ajuste de pH, em

de um medidor portátil Modelo AK90 da marca AKSO, previamente calibrado com as soluções padrões tamponadas com os valores de pH 4; 7 e 10 fabricadas pela empresa Dinâmica® Química Contemporânea Ltda.

O ajuste de pH foi referente ao experimento a ser executado de acordo com o planejamento fatorial, usando para isso soluções diluídas de H₂SO₄ e NaOH, ambas com concentrações de 1M. O dióxido de titânio P-25 (TiO₂) foi misturado ao efluente de oxitetraciclina.

O efluente junto com o semicondutor foi circulado no reator por um período de 2 horas de ensaio, para posteriormente retirar as alíquotas em intervalos de 15 minutos. Após a coleta das alíquotas, foram centrifugadas por um período de 15 minutos, retirado 7 ml do sobrenadante de cada amostra e assim novamente centrifugado por mais 15 minutos (Riaz; Park, 2019). Foi adotado o método colorimétrico proposto por Rufino (2007), cuja metodologia utiliza o Na₂CO₃ (1% m/v) e a Cloramina-T (6% m/v). Em meio alcalino, condicionado pelo Na₂CO₃, ocorreu uma reação de oxidação entre a Cloramina-T e a oxitetraciclina, formando um composto de coloração vermelha com intensidade proporcional à concentração do antibiótico em solução. Utilizando-se um volume final de 10 mL em tubo ou balão volumétrico, acrescentou-se 6,8 mL da amostra com 0,7 mL de Na₂CO₃ e 2,5 mL de Cloramina-T. Após 15 minutos de mistura de todos os componentes, fez-se a leitura em espectrofotômetro (utilizou-se o Modelo SP 2000 UV da TECNAL) no comprimento de onda de 370 nm (usou-se cubetas de quartzo com 10 mm), e a cor desenvolvida permaneceu estável por 50 minutos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 exhibe os resultados da fotocatalise heterogênea (TiO₂/UV-Natural) para degradação da oxitetraciclina, os valores coletados de 11 ensaios são respectivamente provenientes da aplicação do planejamento experimental 2³ empregado.

Tabela 1- Resultado da reação fotocatalise heterogênea (TiO₂/UV-Natural)

Ensaio	pH	Carga de TiO ₂ (g/l)	Co-inicial (mg/l)	Ct- final (mg/l)
1	5	0,1	20	0,16
2	5	0,5	20	3,01
3	9	0,1	20	3,51
4	9	0,5	20	1,76
5	7	0,3	15	0,64
6	7	0,3	15	0,85
7	7	0,3	15	0,73
8	5	0,1	10	3,21
9	5	0,5	10	0,80
10	9	0,1	10	0,80
11	9	0,5	10	0,48

Fonte: Os autores (2023).

A degradação do antibiótico oxitetraciclina, na concentração de 20 mg/l, foi inicialmente realizada através do processo de fotocatalise heterogênea (TiO₂/UV-natural). A Tabela 2 apresenta os resultados da taxa de degradação da oxitetraciclina (n%) nos valores de pH e concentrações do fotocatalisador: pH5, pH7, pH9 e TiO₂ 0,1 g.l⁻¹ /l, 0,3 g.l⁻¹ e 0,5 g.l⁻¹, respectivamente.

Tabela 2- Degradação da taxa de oxitetraciclina via fotocatalise heterogênea. Degradação da taxa de Oxitetraciclina (%) 20mg/l, inicial

Tratamento (TiO ₂ /UV-natural)	pH5	pH7	pH9
(Tempo de Radiação Solar)	TiO ₂ 0.1 g/l	TiO ₂ 0.3 g/l	TiO ₂ 0.5 g/l
15 min	36%	24%	23%
30 min	65%	62%	38%
60 min	100%	83%	81%

Fonte: Os autores (2023).

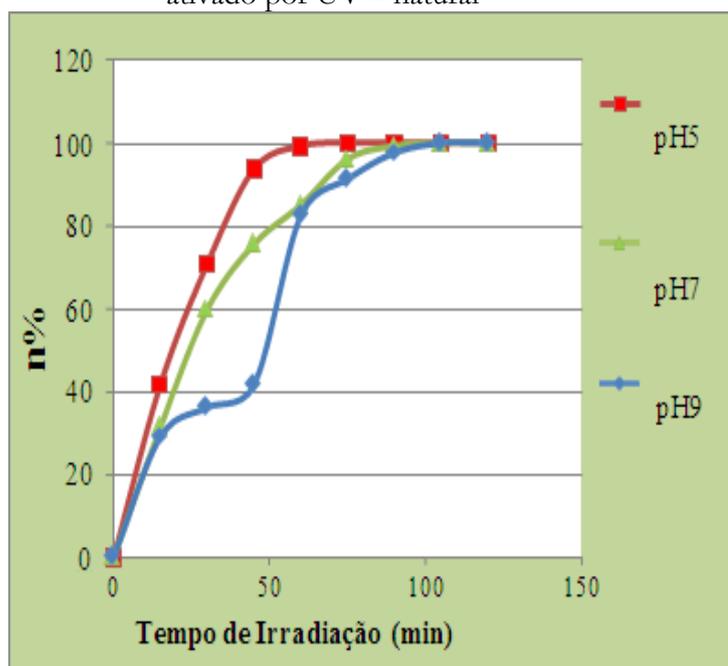
Através da Tabela 1 e Tabela 2, observa-se os maiores percentuais de remoção da oxitetraciclina em pH5, apresentando 100% de remoção nos primeiros 60 minutos. Esses resultados são semelhantes a (Kalash; Al-Furaiji, 2020), que aplicou processos fotocatalíticos e obteve taxa de remoção de 86% de oxitetraciclina em 75 minutos. Em pH7 é possível observar valores de degradação de 83% do efluente em 60 minutos e atingiu 100% de degradação em 90 minutos. Em pH9 apresentou degradação de 81% em 60 minutos, chegando a 100% em 90 minutos.

minutos, resultados estes concordantes com estudos (Zhang *et al.*, 2021), que observaram degradação de 100% a partir de 15 mg/l do fármaco.

Segundo Marques, Stumbo e Canela (2017) a eficácia dos processos fotocatalíticos depende do nível de contaminação do poluente, quantidade de radiação e condições climáticas. É importante destacar as características no processo de separação do semicondutor de TiO₂ (sedimentação e decantação), que foram mais eficientes em pH variando de 7 a 9, demorando 60 minutos para obter 70% da decantação do semicondutor de dióxido de titânio, seguido também por (García-Garay; Franco-Herera; Machuca-Martínez, 2020).

Na Figura 3 pode ser observado o desempenho da Taxa de degradação da oxitetraciclina através de aplicação da fotocatalise heterogênea utilizando TiO₂ como semicondutor ativado por energia solar.

Figura 3- Taxa de degradação da oxitetraciclina via da fotocatalise heterogênea utilizando TiO₂ ativado por UV – natural



Fonte: Os autores (2023).

Na Tabela 3 estão listados os resultados e os valores da Taxa de degradação da oxitetraciclina (n%) e os coeficiente de determinação dos ensaios.

Tabela 3- Taxa de degradação (n%) X Coeficiente de determinação (R²)

Ensaio	n(%)
1	99,21
2	85,01
3	82,71
4	91,33
5	96,88
6	95,78
7	96,25
8	88,81
9	92,01
10	92,01
11	95,20

Fonte: Os autores (2023).

A Tabela 3 evidencia que foi possível obter níveis de degradação máxima da ordem de 99,21% e mínimas de 82,71 % (R²= 0,88), demonstrando efetividade no processo fotocatalítico ativado por energia solar.

Tratamento estatístico

A Tabela 4 exhibe a análise de variância (ANOVA), onde foi aplicado o teste F, valor p em relação ao valor alfa ($\alpha = 0,05$).

Tabela 4- Análise de variância (ANOVA)

Análise de Variância								
Taxa de Variação	de	SQ	GL	MQ	F cal	Valores-p	F tab	R ²
Regressão		36,92	10	3,69	93,80	0,0023	2,838	0,99
Puro error		0,02	2	0,01				
Total		36,94	12					

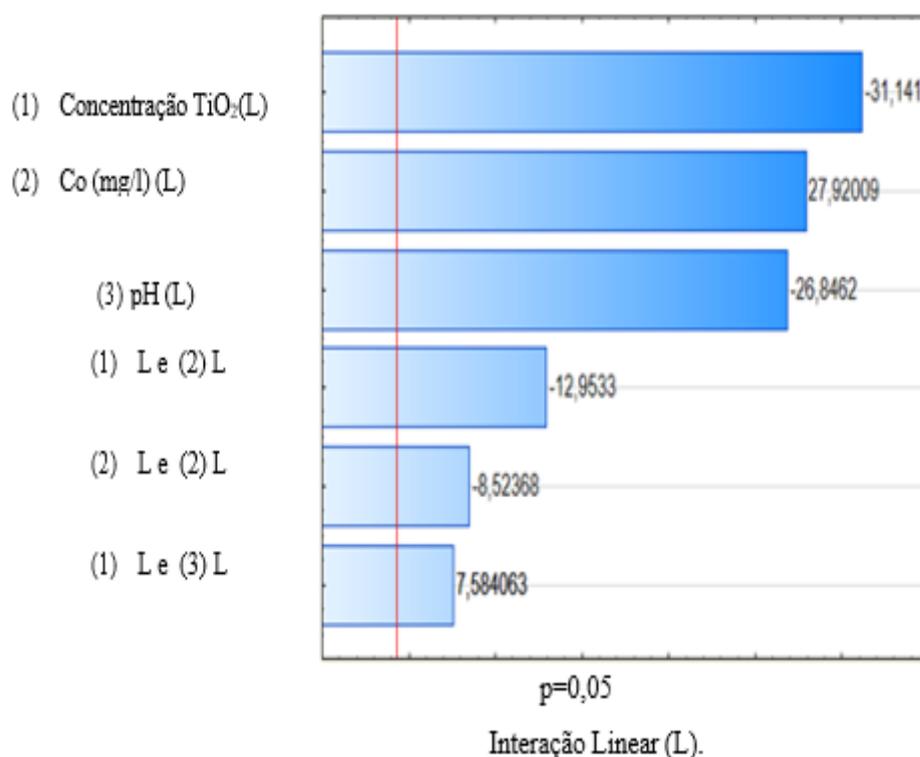
SQ = Soma dos Quadrados; GL = Graus de liberdade; QM = Média Quadrada; F cal = F calculado; F tab = F tabulado; R² = Coeficiente de determinação; valor p.

Fonte: Os autores (2023).

Na Análise de variância, o sumário do modelo pode ser observado o valor do coeficiente de variância com $R^2 = 0,99$ (acionado o erro puro), esses resultados esclarecem o quão a variável independente (Ct - mg/l) responde o processo (variável dependente); igualmente o valor indica os fatores escolhidos, representa o modelo significativo, concordando com (Azam *et al.*, 2020). Igualmente o ponto crítico 0,01 e 0,03 de p - Valor (coeficiente de variação), onde o valor representa os fatores indicados levam a um modelo ótimo (modelo representativo) enquadrado conforme (Cabrera-Reina *et al.*, 2019).

O diagrama de Pareto, apresentado na Figura 4, é possível verificar a influência para a taxa de remoção, quando utilizado o processo de fotocatalise heterogênea (TiO₂/UV-natural) na degradação da oxitetraciclina, onde (1), (2) e (3) correspondem as variáveis independentes, (1) concentração do TiO₂ (L), (2) concentração inicial de oxitetraciclina – Co e (3) pH (L). Exibiu parcelas lineares (L).

Figura 4- Diagrama de Pareto da degradação da oxitetraciclina



Fonte: Os autores (2023).

Os resultados expostos no diagrama Pareto Figura 4, mostram interações lineares (1,2,3) com 95% de confiança e $R^2 = 0,99$. O efeito positivo mais significativo foi a variável (2), concentração - Co inicial (L), posteriormente as interações entre (1) L e (3) L. O efeito de interação negativa de mais significância é (1) concentração do TiO₂ (L), seguido de (3) (L), posteriormente

das interações entre (1) L e (2) L seguido da interação entre (3) L e (2) L. Sotelo-Cornejo (2021), aplicou fotodegradação durante 41 dias, degradou 92 % de oxitetraciclina, em pH 8, os valores representaram estatisticamente 95% de confiança e $R^{2=}$ 0,99. Sendo considerado com um ótimo modelo. É possível observar que a variável Co foi mais importante no processo de degradação da oxitetraciclina, uma vez que se mostrou estatisticamente significativa ao modelo proposto em 95% confiança. Visto que o diagrama de Pareto traz confiabilidade dos níveis estatísticos.

Superfícies de resposta

As Figura 5,6 e 7 exibem as Superfícies de resposta da degradação

Figura 5- Superfícies de resposta - efluente oxitetraciclina (Co), concentração do TiO₂ e pH - (ponto central)

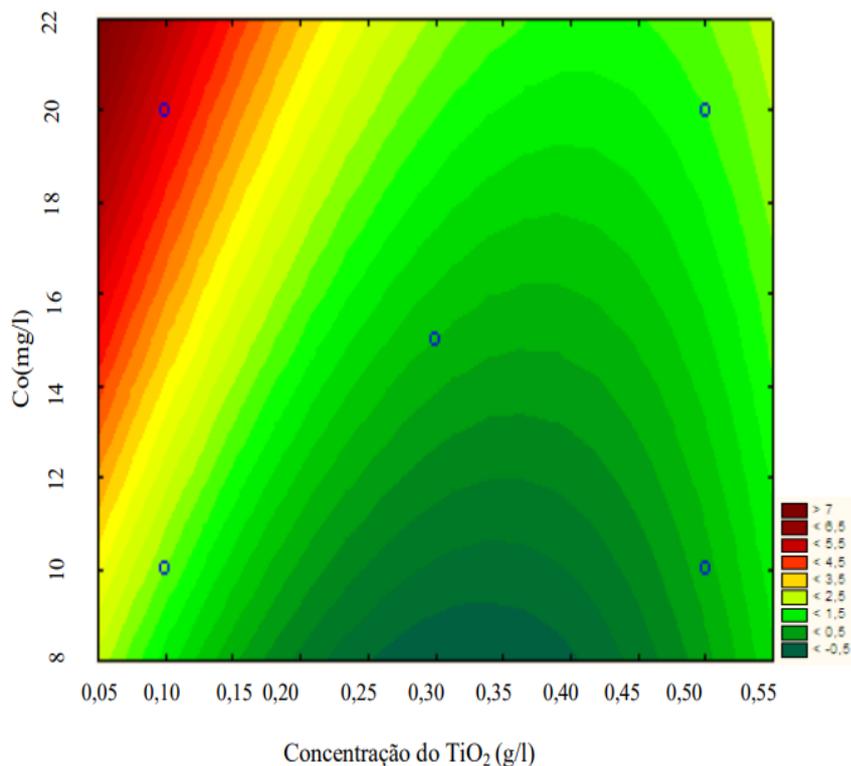
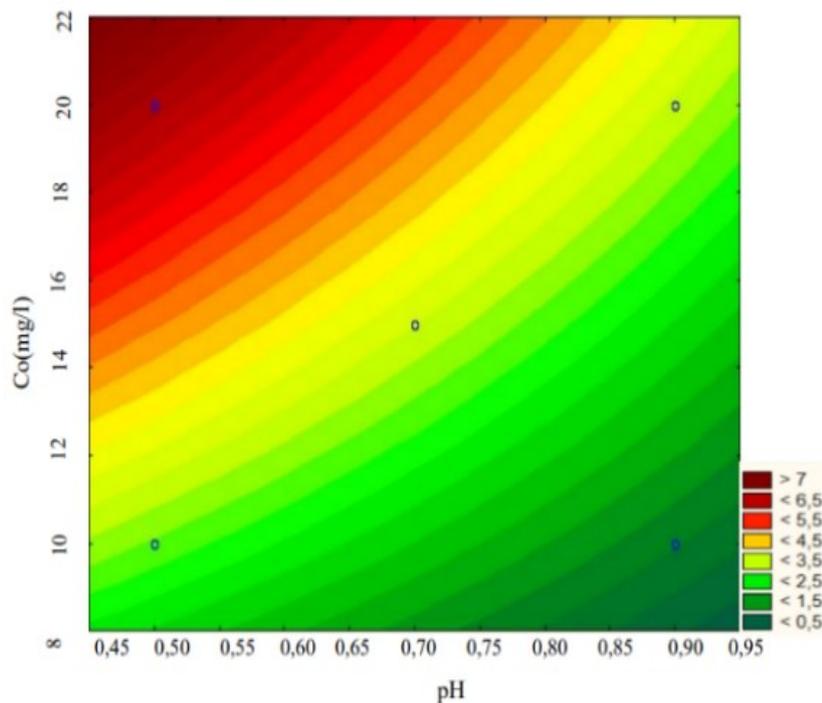
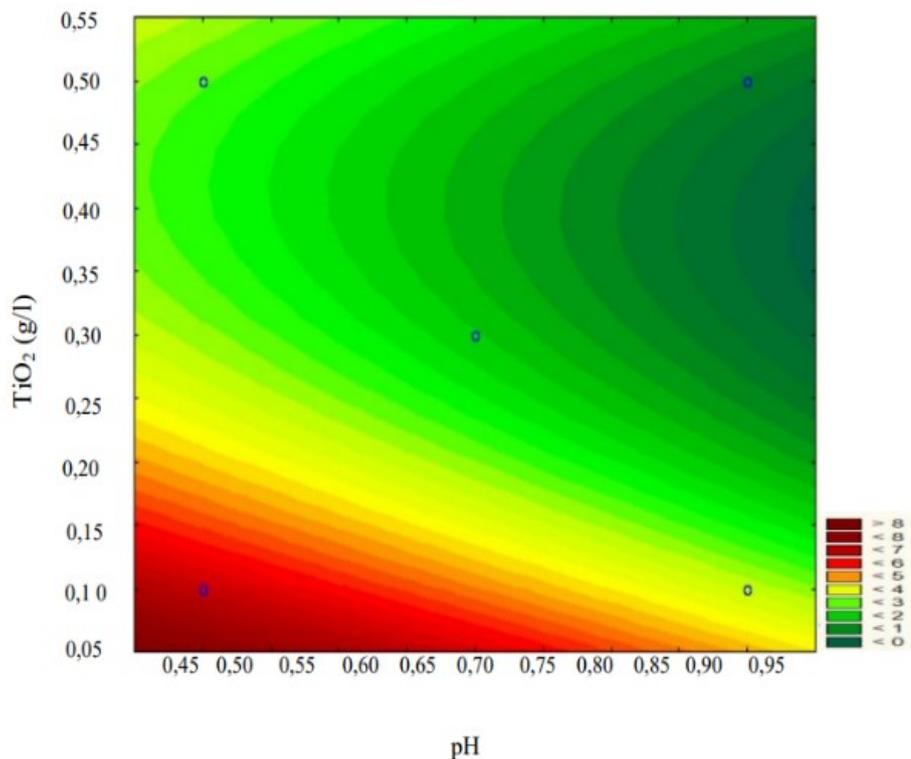


Figura 6- Superfícies de resposta - efluente oxitetraciclina Co, pH - ponto e concentração do TiO₂ (ponto central)



Fonte: Os autores (2023).

Figura 7- Superfícies de resposta - a concentração do TiO₂, pH e efluente oxitetraciclina Co (ponto central).



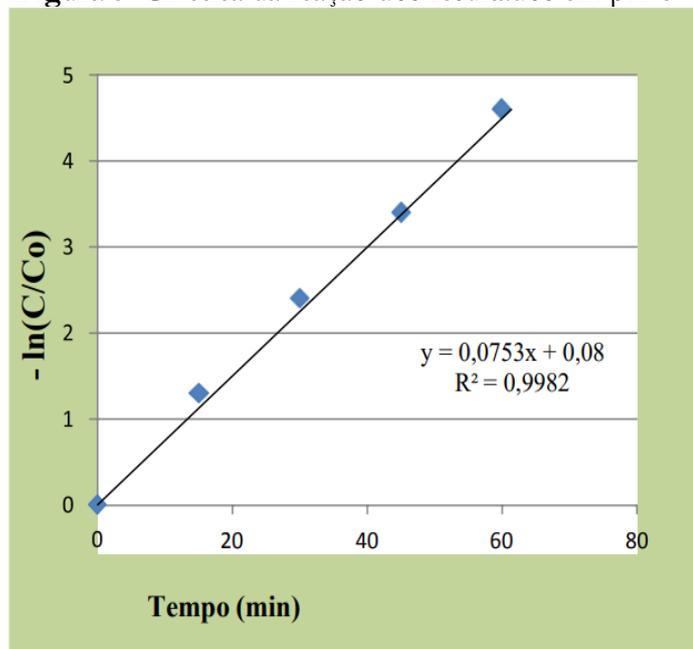
Fonte: Os autores (2023).

Os efeitos da superfície de resposta expostos na Figura 5 apresenta um modelo linear com interação moderada, curvatura de direção negativa. Também é possível observar resultados para concentração ideais de oxitetraciclina de 20 mg/l (mais aproximado), e concentração de TiO₂ 0,05 g/l (mais aproximado). A Figura 6 expõem um modelo linear com interação moderada, curvatura em direção negativa, sendo possível observar resultados mais aplicados em concentrações de oxitetraciclina de 20 mg/l (concentração ideais), entre níveis de pH 4 (mais aproximado). A Figura 7 apresenta um modelo linear com interação moderada, expõe curvatura em direção positiva, é possível observar resultados mais aplicáveis em concentração de TiO₂ variando entre 0,05 g/l (mais aproximado), e entre níveis de pH 4 (mais aproximado). Os três resultados expostos foram obtidos em até 90 minutos de experimento, concordando com os resultados de Sulaiman e Alwared (2022).

Cinética da reação

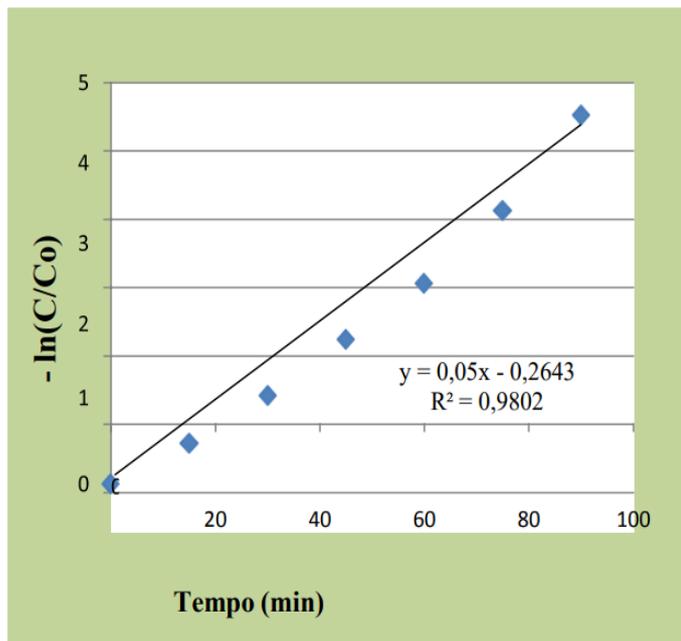
A Figura 8, Figura 9 e Figura 10 pode ser observada a Cinética da reação dos resultados correspondentes a pH-5, pH-7, e pH-9. onde k é a constante de taxa de pseudo-primeira ordem e pode ser observada, o limite de $C = C_0$ em $t = 0$: Através da Equação 2: $K = -\ln(C/C_0)/t$ Seguindo (Pascoal *et al.*, 2020).

Figura 8- Cinética da reação dos resultados em pH-5



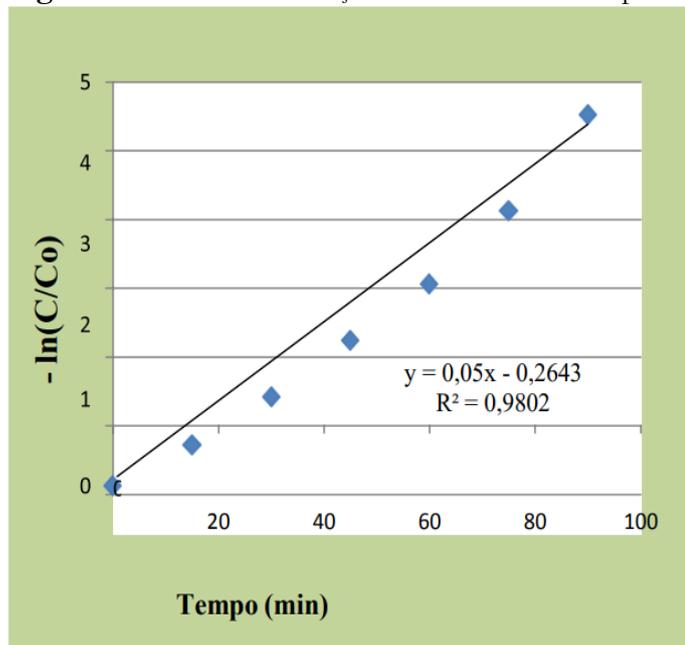
Fonte: Os autores (2023).

Figura 9 - Cinética da reação dos resultados em pH-7



Fonte: Os autores (2023).

Figura 10 - Cinética da reação dos resultados em pH-9

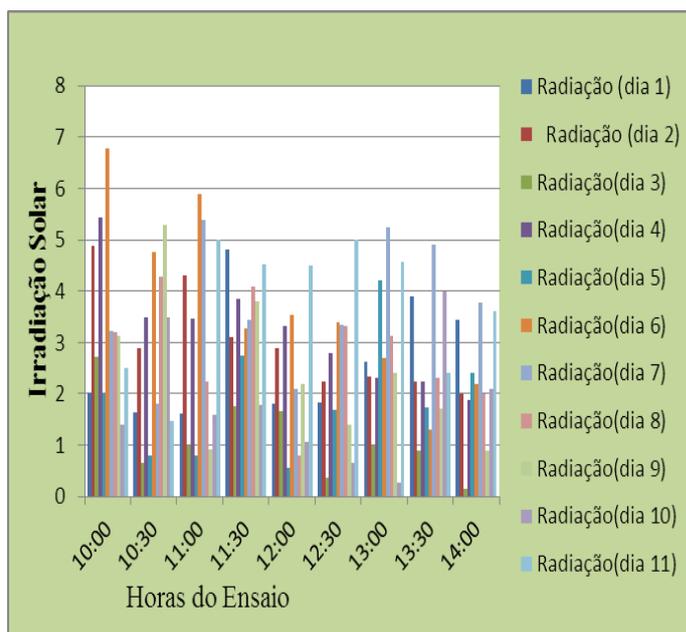


Fonte: Os autores (2023).

Nas Figuras 8, Figuras 9 e Figuras 10 pode ser observado na cinética de reação um comportamento linear, com resíduos que se ajustam aos modelos matemáticos cinéticos, com valores correspondentes de R^2 iguais a 0,99; 0,98 e 0,97 respectivamente e equações lineares $y = 0,0753x + 0,08$, $y = 0,05x - 0,2643$ e $y = 0,0373x - 0,2439$. Esses resultados estão de acordo aos resultados encontrados por (De Lima *et al.*, 2020) e (Bermúdez *et al.*, 2021).

A intensidade solar emitida (incidência) no reator afirma que variou entre 6,9 $\mu\text{Sv/h}$ a 1,4 $\mu\text{Sv/h}$ no período do estudo e foi eficiente para ativar a fotocatalise. Todos os resultados de intensidade de radiação medidos nos dias de experimentos podem ser observados na Figura 11, onde a radiação incidida foi analisada de 10 horas da manhã as 14 horas da tarde, para melhor entendimento do comportamento da intensidade solar (no ponto fixo do reator) da posição geográfica pesquisada.

Figura 11 - Intensidade de radiação medidos nos dias de ensaio



Fonte: Os autores (2023).

A efetividade da reação assistida por irradiação solar depende de condições climáticas favoráveis. As características temporais também foram confirmadas em trabalhos de (Margarita-Guerra; Arrieta-Pérez; Colina-Marquez, 2019; Nardes *et al.*, 2021; Yazdanbakhsh *et al.*, 2019).

CONCLUSÃO

O processo da fotocatalise heterogênea (TiO₂/UV-natural) em meios aquosos oxigenados, degradou contaminantes emergentes (efluente de fármaco), mostrou ser um método eficiente, exibindo resultados que apresentam rapidez para degradar 20 mg/l de oxitetraciclina, em 1 hora de processo fotocatalítico, e pela linearidade dos pontos nos resultados da Figura 8, Figura 9, Figura 10 confirma a cinética de primeira ordem da Lei Beer – Lambert. As variáveis de estudo apresentam tanto influências lineares quanto quadráticas, juntamente interações em superfície de respostas. Em suma, os resultados apresentados do trabalho demonstram eficiência no processo de degradação

do efluente oxitetraciclina através da fotocatalise heterogênea (TiO₂/UV-natural) ativado por energia solar, demonstrando que o método pode ser estudado em efluentes com a mesma característica e futuramente ser aplicado em meios poluídos, como ETE's, ETA's e ambientes naturais contaminados.

REFERÊNCIAS

AGUERA, Ana; PLAZA-BOLAÑOS, Patricia; ACIÉN FERNÁNDEZ, Gabriel F. Removal of contaminants of emerging concern by microalgae-based wastewater treatments and related analytical techniques. *In*: VARJANI, Sunita; PANDEY, Ashok; LARROCHE, Christian; NGO, Huu Hao (ed.). **Current developments in biotechnology and bioengineering**. Amsterdam: Elsevier, 2020. Chap. 20, p. 503–525, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819594-9.00020-6>

AZAM, Mudsser; KUMAR, Vijay; SIDDIQUI, K.; JAN, Arif Tasleem; SABIR, Jamal; REHMAN, Suriya; HAQ, Qazi Mohd Rizwanul. Pharmaceutical disposal facilitates the mobilization of resistance determinants among microbiota of polluted environment. **Saudi Pharmaceutical Journal**, Riyadh, Saudi Arabia, v. 28, n. 12, p. 1626 – 1634, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2020.10.009>

BERMÚDEZ, Laura A.; PASCUAL, Jaime M.; MARTINEZ, Maria Del Mar M.; CAPILLA, José Manuel P. Effectiveness of advanced oxidation processes in wastewater treatment: state of the art. **Water**, Basel, v. 13, n. 15, p. 2094, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13152094>

CABRERA-REINA, Alejandro; MARTÍNEZ-PIERNAS, Ana Belén; BERTAKIS, Nikolaos; XEKOUKOULOTAKIS, Nikolaos P.; AQUERA, A.; PÉREZ, José Antonio. TiO₂ photocatalysis under natural solar radiation for the degradation of the carbapenem antibiotics imipenem and meropenem in aqueous solutions at pilot plant scale. **Water Research**, Oxford, v. 166, p. 115037, 2019. DOI: [10.1016/j.waters.2019.115037](https://doi.org/10.1016/j.waters.2019.115037)

DE LIMA, Carlos Antônio Pereira; ARAUJO, Bruna A.; SILVA, Karyna S. da; SILVA, Camylla B.; LIMA, Geralda G. Cavalcante de; VIEIRA, Fernando F.; MEDEIROS, Keila M. Advanced oxidative process by heterogeneous photocatalysis for chemical laboratories effluents treatment. **Desalination and Water Treatment**, Hopkinton, MA, v. 174, p. 248–257, 2020. DOI: [doi: 10.5004/dwt.2020.24894](https://doi.org/10.5004/dwt.2020.24894)

ESKANDARI DAMANEH, Hadi; KHOSRAVI, Hassan; HABASHI, Khalil; TIEFENBACHER, John. The impact of land use and land cover changes on soil erosion in western Iran. **Natural Hazards**, Dordrecht, NL, v. 110, p. 2185–2205, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05032-w>

GABRIELS, Karen; WILLEMS, Patrick; VAN ORSHOVEN, Jos. A comparative flood damage and risk impact assessment of land use changes. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, London, v. 22, n. 2, p. 395–410, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-22-395-2022>

GARCÍA-GARAY, Juan; FRANCO-HERERA, Andrés; MACHUCA-MARTÍNEZ, Fiderman. Wild microorganism and plankton decay in ballast water treatments by solar disinfection

(SODIS) and advanced oxidation processes. **Marine Pollution Bulletin**, Oxford, v. 154, p. 111060, 2020. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2020.111060](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111060)

KALASH, Khairi R.; AL-FURAIJI, Mustafa H. Advanced oxidation of antibiotics polluted water using titanium dioxide in solar photocatalysis reactor. **Journal of Engineering**, Baghdad, Iraq, v. 26, n. 2, p. 1-13, 2020.

MARGARITA-GUERRA, María; ARRIETA-PÉREZ, Rodinson; COLINA-MARQUEZ, José.. Modeling of a Solar Heterogeneous Photocatalytic Reactor with TiO₂ for Treatment of Wastewater Contaminated By Albendazole. **Ingeniería y Competitividad**, Cali, Colômbia, v. 21, n. 2, 2019. DOI: <https://doi.org/10.25100/iyc.v22i2i.8105>

MARQUES, Fabielle C.; STUMBO, Alexandre M.; CANELA, Maria C. Estratégias e materiais utilizados em fotocatalise heterogênea para a geração de hidrogênio através da fotólise da água. **Química Nova**, São Paulo, SP, v. 40, n. 5, p. 561-571, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170015>

NARDES, André de Barros; SANTOS, George H. Marques dos; SANTOS, Leticia Estefani Sousa; MARQUES, Mariana de Castro; ARAUJO, Rafaela Aguiar; SOUSA, Ronilson Jardim. Energia Solar e sua Viabilização. **Revista Ibero - Americanade Humanidades, Ciências e Educação**, São Paulo, SP, v. 7, n. 10, p. 2535–2542, nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.51891/rease.v7i10.2872>

PASCOAL, Salomão de Andrade; SILVA, Camylla Barbosa; SILVA, Karyna Steffane da; LIMA, Geralda G. Cavalcante de; MEDEIROS, Keila Machado de; LIMA, Carlos Antônio Pereira de. Treatment by TiO₂/UV of wastewater generated in polymeric membranes production. **Desalination and Water Treatment**, Hopkinton, MA, v. 207, p. 30–42, 2020. DOI: [doi: 10.5004/dwt.2020.26390](https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26390)

QIAN, Ruifeng.; ZONG, Huixin; SCHNEIDER, Jenny; ZHOU, Guanda; ZHAO, Ting; YONGLI, Li, H.; YANG, Jing; BAHNEMANN, Detlef; PAN, Jia Hong. Charge carrier trapping, recombination and transfer during TiO₂ photocatalysis: an overview. **Catalysis Today**, Amsterdam, v. 335, p. 78–90, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.10.053>

RIAZ, Shahina; PARK, Soo-Jin. An overview of TiO₂-based photocatalytic membrane reactors for water and wastewater treatments. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Washington, US, v. 84, p. 23-41, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.12.021>

RUDKE, Anderson P.; XAVIER, Ana Carolina F.; MARTINS, Leila D.; FREITAS, Edmilson D.; UVO, Cíntia B. B.; HALLAK, Ricardo; SOUZA, Rodrigo A. F.; DE ALMEIDA ALBUQUERQUE, Taciana T.; MARTINS, Jorge A. Landscape changes over 30years of intense economic activity in the upper Paraná River basin. **Ecological Informatics**, Amsterdam, v. 72, p. 101882, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2022.101882>

RUFINO, Maria S. Moura. **Metodologia científica**: determinação da atividade antioxidante total em frutas pela captura do radical livre DPPH. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2007. (Embrapa Agroindústria Tropical. Comunicado técnico, 127).

SENTHIL RATHI, Balasubramani; SENTHIL KUMAR, Pumina; SHOW, Pau-Loke. A review on effective removal of emergingcontaminants from aquatic systems: Current trends and scope for further research. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 409, p. 124413, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124413>

SIVARANJANEE, Rajendran; KUMAR, Pumina Senthil. A review on remedial measures for effective separation of emerging contaminants from wastewater. **Environmental Technology & Innovation**, Amsterdam, v. 23, p. 101741, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101741>

SOTELO-CORNEJO Karen G.; ESPINOSA-PLASCENCIA, Angelica; GÁMEZ-BAYARDO, Sergio Gámez; PÉREZ-ÁLVAREZ, Adolfo; JIMÉNEZ-EDEZA, Maribel; GARCÍA-GALAZ, Alfonso; BERMÚDEZ-ALMADA, María del Carmen. Efecto de la fotólisis y pH en la degradación de la oxitetraciclina en sedimento y água marina. **TIP Revista Especializada en Ciências Químico-Biológicas**, México, MX, v. 24, n. 1, p. 23, 2021. DOI: <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.369>

SULAIMAN, Fadia; ALWARD, Abeer. Ability of Response Surface methodology to optimize photocatalytic degradation of amoxicillin from aqueous solutions using immobilized TiO₂/sand. **Journal of Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 23, n. 5, p. 293–304, 2022. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/147318>

TONG, Yindong; SUN, Jingjing; UDDIN, Minhaz; KONG, Xiangzhen; LIN, Yan; WANG, Mengzhu; ZHANG, Hefeng; XU, Xiwen; WU, Zhenyu. Perspectives and challenges of applying the water-food-energy nexus approach to lake eutrophication modelling. **Water Security**, Shanghai, China, v. 14, p. 100095, 2021. DOI: [10.1016/j.wasec.2021.100095](https://doi.org/10.1016/j.wasec.2021.100095)

VARSHA, M.; SENTHIL KUMAR, Pumina; SENTHIL RATHI, Balasubramani. A review on recent trends in the removal of emerging contaminants from aquatic environment using low-cost adsorbents. **Chemosphere**, Amsterdam, v. 287, p. 132270, 2022. DOI: [10.1016/j.chemosfera.2021.132270](https://doi.org/10.1016/j.chemosfera.2021.132270)

YAZDANBAKHSH, Ahmadreza; NEMATI, Reza, MASSOUDINEJ, Mohamadreza; JAFARI, Mohamadjavah; DASHTDAR, Masoomah. Solar photodegradation of carbamazepine from aqueous solutions using a compound parabolic concentrator equipped with a sun tracking system. **Open Chemistry**, Warsaw, Poland, v. 17, n. 1, p. 477–484, Jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1515/chem-2019-0060>

ZAMMIT, Ian; VAIANO, Vincenzo; RIBEIRO, Ana R.; SILVA, Ádrian M. T.; MANAIA, Célia M.; RIZZO, Luigi. Immobilized cerium-doped zinc oxide as a photocatalyst for the degradation of antibiotics and the inactivation of antibiotic-resistant bacteria. **Catalysts**, Basel, v. 9, n. 3, p. 222, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal9030222>

ZHANG, Wenlong; CHEN, Jun; WANG, Jichao; CUI, Cheng-Xing; WANG, Bingxing; ZHANG, Yuping. Impact of active chlorines and OH radicals on degradation of quinoline using the bipolar electro-fenton process. **Water**, Basel, v. 13, n. 2, p. 128, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13020128>

Recebido em: maio de 2024
Aceito em: outubro de 2024

* Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB).

** Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal da Paraíba (1988), mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal da Paraíba (1993), doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (2002) e Especialização em Perícia, Auditoria e Gestão Ambiental (2018) pelo IPOG (Instituto de Pós Graduação). Atualmente é professora do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), atuando nos cursos de graduação e pós-graduação e coordenadora adjunta do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental.

*** Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal da Paraíba (1988), mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal da Paraíba (1993) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (2002). Atualmente é professor Doutor Associado-B da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB).