



TRATAMENTO DE EFLUENTES UTILIZANDO O TiO₂ ATIVADO COM LUZ SOLAR: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Odilson José de Carvalho Neto¹
Salmon Landi Júnior²

Química Ambiental

Resumo

A poluição da água por agentes químicos tais como metais pesados, corantes, fármacos, fertilizantes, herbicidas, dentre outros, tem levantado preocupações ambientais no mundo todo pelo fato de que os processos convencionais de tratamento de água não serem autossuficientes para eliminar por completo esses compostos. Diante desta realidade, a comunidade científica tem buscado desenvolver novas tecnologias, a fim de melhorar a eficiência dos processos de tratamento de efluentes. Dentre estas novas tecnologias, acredita-se que a fotocatalise heterogênea baseada no dióxido de titânio (TiO₂) constitui-se como uma alternativa promissora, desde que se consiga aproveitar de modo eficiente a luz proveniente do Sol. No âmbito desta temática, o presente trabalho apresenta uma revisão sistemática dos resultados experimentais mais recentes que utilizaram o TiO₂, sob irradiação de luz solar natural, para o tratamento de efluentes domésticos e industriais (reais ou sintéticos). Para este propósito, realizou-se uma busca na base de dados Scopus com as palavras-chave "photocatalysis", "wastewater", "solar irradiation" e "TiO₂". Mediante a lista dos trabalhos obtidos, observou-se aspectos tais como a modificação ou não do TiO₂, a concentração inicial dos compostos químicos poluentes, o pH da solução, bem como o tempo e as condições de irradiação. Destaca-se que a maioria dos fotocatalisadores apresentaram uma alta taxa para a degradação dos poluentes químicos, variando de 82,3% a 100%. No entanto, verificou-se que apenas dois estudos realizaram ensaios de toxicidade, os quais são fundamentais para a consolidação da fotocatalise como método de tratamento para a degradação de poluentes em águas residuais.

Palavras-chave: Fotocatalise; Irradiação Solar; TiO₂; Tratamento de Efluentes

¹Graduando em Engenharia Química – Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – odilson.neto@estudante.ifgoiano.edu.br

²Prof. Dr. IF Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – salmon.landi@ifgoiano.edu.br

Realização



INTRODUÇÃO

A crescente expansão das áreas urbanas e das atividades industriais tem gerado um aumento na demanda por água, o que dificulta a garantia do abastecimento contínuo, resultando em crises graves de escassez em diversas cidades de países como o Brasil. Um dos motivos para a escassez de água potável para a população mundial está associado com a poluição por agentes contaminantes utilizados em larga escala e, por vezes, descarregados nos efluentes hídricos sem um tratamento prévio adequado (GBANDI, 2022).

Poluentes tóxicos como os corantes utilizados na indústria têxtil representam uma enorme fonte de poluição, pois estima-se que pelo menos 10% da produção anual de corantes seja descartada nos cursos de água, afetando a sua transparência e a solubilidade de gases – características essenciais para a vida aquática (CHONG et al., 2010). Por sua vez, os fármacos (antibióticos, antialérgicos, analgésicos e outros) constituem uma outra classe de poluentes que tem cada vez mais alcançado os cursos hídricos, em virtude do seu uso crescente e muitas vezes indiscriminado. Já as águas próximas de regiões que apresentam intensa atividade agrícola estão susceptíveis à contaminação por pesticidas, herbicidas, inseticidas, dentre outros. Todos os contaminantes mencionados, mesmo em baixas concentrações, não apenas reduzem consideravelmente a qualidade da água como causam enormes prejuízos à vida aquática (BANSAL; VERMA; TALWAR, 2018).

É importante mencionar que as tecnologias convencionais para o tratamento de efluentes baseadas em métodos físicos, tais como a adsorção, floculação, sedimentação ou filtração não possuem a capacidade de eliminar os agentes poluentes. Neste sentido, a comunidade científica tem buscado novos métodos e materiais que se mostram eficientes para o enfrentamento da poluição causada pelos efluentes industriais, comerciais, agrícolas e domésticos (MONTAGNER; VIDAL; ACAYABA, 2017). Nesta busca, as tecnologias baseadas em processos de oxidação avançada, os quais se baseiam na produção de espécies altamente reativas (H_2O_2 , OH^\bullet , $O_2^{\bullet-}$, O_3), têm sido largamente aplicadas para a degradação de diferentes poluentes presentes na água (LANDI et al., 2021) ou no ar (SEGUNDO et al., 2021). Dentre estas novas tecnologias, a fotocatalise heterogênea baseada em semicondutores tem se mostrado muito adequada para o tratamento de águas contaminadas

Realização



com diferentes poluentes (KHOR; KHAN; HARUNSANI, 2023).

Dentre os fotocatalisadores mais utilizados o dióxido de titânio (TiO_2) se destaca, por reunir as seguintes características: baixo custo, insolubilidade em água, fotoestabilidade, estabilidade química em uma ampla faixa de pH e possibilidade de ativação pela luz solar, o que reduz os custos do processo (RAO et al., 2017). É nesta perspectiva que o presente trabalho tem por objetivo analisar os resultados mais recentes da aplicação de materiais fotocatalíticos (ativados com a luz do Sol) voltados para o tratamento de efluentes (reais ou sintéticos). Pretende-se, portanto, identificar e analisar os principais fatores relativos à utilização do TiO_2 como fotocatalisador; a sua forma de aplicação no tratamento, o tipo e as características do efluente tratado, bem como se houve redução da toxicidade dos efluentes após os ensaios de degradação fotocatalítica.

METODOLOGIA

O presente estudo incluiu a identificação de trabalhos que apresentam resultados experimentais recentes envolvendo a aplicação do TiO_2 como material fotocatalítico para o tratamento de efluentes usando a luz solar natural como fonte de irradiação. O levantamento bibliográfico foi realizado na base de dados da Scopus, utilizando como palavras-chave "*photocatalysis*", "*wastewater*", "*solar irradiation*" e " TiO_2 ". Foram selecionados apenas artigos em língua inglesa publicados nos últimos cinco anos (Tabela 1). Além disso, revisões de literatura não foram consideradas nesta busca. A lista de artigos obtida foi cuidadosamente escrutinada por meio das questões norteadoras apresentadas a seguir.

- 1) Qual o tipo de fotocatalisador utilizado?
- 2) A reutilização do fotocatalisador foi investigada?
- 3) Que tipo de efluente foi tratado?
- 4) Qual o procedimento utilizado nos ensaios de degradação do efluente?
- 5) A toxicidade do efluente tratado foi comparada com a do efluente não tratado? Se sim, quais foram os testes de toxicidade utilizados?

Realização



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 1. Revisão condensada de estudos realizados com fotocatalisador TiO₂.

Pesquisa realizada em 21 de fevereiro de 2023.

Fotocatalisador / Aplicação	Condições experimentais do fotocatalisador / Reutilização do fotocatalisador	Características do efluente	Principais resultados	Referência / Teste de toxicidade
FeNi ₃ /SiO ₂ /TiO ₂	25, 50 e 100 mg/L - Quatro ciclos	Solução aquosa de amoxicilina (10, 50 e 100 mg/L; pH = 3, 5, 7 e 11)	Remoção atingiu 96% após 90 min de irradiação (50 mg/L de FeNi ₃ /SiO ₂ /TiO ₂ ; pH = 5; [amoxicilina] = 10 mg/L)	(ALWARDED et al., 2023) / Não
Bi ₂ WO ₆ /C-dots/TiO ₂	50, 75, 100 e 250 mg/L - Três ciclos	Solução aquosa de levofloxacin (5, 10, 15 e 20 mg/L; pH = 5, 7 e 9)	Decomposição de 99% após 90 min de irradiação (75 mg/L de Bi ₂ WO ₆ /C-dots/TiO ₂ ; pH = 7; [levofloxacin] = 10 mg/L)	(SHARMA et al., 2020) / Não
N/TiO ₂	25, 50 e 100 mg/L - Zero ciclos	Soluções aquosas de amoxicilina e de ciprofloxacina (25, 50 e 100 mg/L em ambas; pH = 5, 7 e 11 em ambas)	Redução de 95,8% de amoxicilina e 97,3% de ciprofloxacina após 120 min de irradiação (50 mg/L de N- TiO ₂ ; pH = 5; [amoxicilina e ciprofloxacina] = 25 mg/L)	(MHEMID; SALMAN; MOHAMMED, 2022) / Não
Placa anatase de TiO ₂	330 mg/L - Cinco ciclos	Rodamina B encapsulada com cucurbit[7]uril (concentração não especificada)	Degradação de 97% após 10 min de irradiação (330 mg/L de TiO ₂ ; 10 ⁻⁵ M de complexo CB7-RhB)	(MOHANAN et al., 2019) / Não

Realização



Cu/TiO ₂	100, 300 e 500 mg/L - Zero ciclos	Soluções aquosas de diclofenaco, ibuprofeno e ácido mefenâmico (0,03, 0,06 e 0,1 mg/L ambas; pH = 4, 7 e 9)	Degradação de 96,5%, 94,2% e 82,3% foram obtidos para diclofenaco, ibuprofeno e ácido mefenâmico, respectivamente após 65 min de irradiação (300 mg/L de Cu-TiO ₂ ; pH = 9; [drogas] = 0,1 mg/L)	(AL-JEMELI et al., 2021) / Não
Fe/TiO ₂	Concentração não especificada - Setenta ciclos	Efluente real de indústria farmacêutica (com cerca de 24 compostos diferentes, concentração não especificada)	Redução de 83% dos compostos farmacêuticos após 300 min de irradiação e tratamento	(BANSAL; VERMA; TALWAR, 2018) / Sim, foi constatado uma baixa toxicidade do efluente após o tratamento
TiO ₂ - imobilizado em papel celulósico	400 mg/L - Quarenta ciclos	Solução aquosa de paracetamol (2,5, 10 e 20 mg/L; pH = 3, 9 e 11)	Redução de 99% após 90 min de irradiação (20 mg/L de TiO ₂ ; pH = 9; [paracetamol] = 10 mg/L)	(CHEKIR et al., 2020) / Não
Ni/TiO ₂ /W	30 mg/L - Quatro ciclos	Solução aquosa de paracetamol (25 mg/L; pH = 7)	Degradação de 100% após 180 min de irradiação (30 mg/L de Ni/ TiO ₂ /W; pH = 7; [paracetamol] = 25 mg/L)	(GOMEZ-SOLIS et al., 2021) / Não
TiO ₂ /KOH	200 mg/L - Zero ciclos	Solução aquosa de antraquinona (0,5 mg/L; pH = 5)	Degradação de 88% após 240 min de irradiação (200 mg/L de TiO ₂ /KOH; pH = 5; [antraquinona] = 0,5 mg/L)	(YE et al., 2019) / Não
TiO ₂	400, 500 e 700 mg/L - Três ciclos	Efluente residual sintético com vários componentes químicos orgânicos (variadas concentrações)	Após 180 min de irradiação a qualidade da água tratada foi considerada média, recomendada para uso em irrigação nos parâmetros	(MANU; THALLA, 2019) / Não

Realização



				<i>Wastewater quality status (500 mg/L de TiO₂)</i>	
ZnO e TiO ₂	1000 e 2000 mg/L - Zero ciclos	Solução aquosa de pindolol (20 ml com 0,05 mol de pindolol)	Eliminação completa do pindolol após 120 min de irradiação (1000 mg/L de ZnO; 20 ml com 0,05 mol de pindolol)	(ARMAKOVIĆ et al., 2020) / Sim, houve um ligeiro aumento da toxicidade	
ZnTiO ₃ /TiO ₂ /La e ZnTiO ₃ /TiO ₂ - misturados em terra diatomácea	25 mg/L - Cinco ciclos	Solução aquosa azul de metileno (20 mg/L; pH = 7)	Degradação de 96% após 150 min de irradiação (25 mg/L de ZnTiO ₃ /TiO ₂ /La; pH = 7; [azul de metileno] = 20 mg/L)	(JARAMILLO-FIERRO; GONZÁLEZ; MEDINA, 2021) / Não	
Ag/MoO ₃ /TiO ₂ , MoO ₃ /TiO ₂ e TiO ₂	100 mg/L - Zero ciclos	Solução aquosa laranja de metila (15 mg/L)	Degradação de 97% após 300 min de irradiação (100 mg/L de Ag/MoO ₃ /TiO ₂ ; [laranja de metila] = 15 mg/L)	(HASAN KHAN NEON; ISLAM, 2019) / Não	
TiO ₂ - em forma de microesferas revestidas com vidro	5000 mg/L - Zero ciclos	Soluções aquosas de carbamazepina (0,05 mg/L) e diclofenaco (0,05 mg/L) e ibuprofeno (0,4 mg/L)	Degradação total de carbamazepina, diclofenaco e Ibuprofeno após 360 min de irradiação (5000 mg/L de TiO ₂ microesférico; [carbamazepina e diclofenaco] = 0,05 mg/L; [ibuprofeno] = 0,4 mg/L)	(BRICE et al., 2022) / Não	
TiO ₂ - camadas nas formas de anatase e nanopartículas	2000 mg/L - Zero ciclos	Solução de efluentes de águas residuais urbanas reais com compostos farmacêuticos ativos (variadas concentrações; pH = 7)	Remoção significativa da maior parte dos compostos farmacêuticos detectados após 300 min de irradiação (variando de 40% a 100% dependendo do composto; 2000 mg/L de TiO ₂ em camadas e pH = 7)	(RUEDA-MÁRQUEZ et al., 2020) / Não	

Realização



TiO ₂ , TiO ₂ /GO/Ag e TiO ₂ /GO (óxido de grafeno)	2.5, 5, 7.5 e 10 mg/L - Quatro ciclos	Solução aquosa laranja de metila (15 mg/L; pH = 7)	Remoção de 97,66% usando TiO ₂ /GO/Ag após 180 min de irradiação (10 mg/L de TiO ₂ /GO/Ag; pH = 7; [laranja de metila] = 15 mg/L)	(AL-MAMUN et al., 2021) / Não
Ag ₂ CO ₃ /Fe ₂ O ₃ / TiO ₂ e Fe ₂ O ₃ /TiO ₂	50, 100 e 150 mg/L - Cinco ciclos	Solução aquosa de fenol (0,05 mg/L; pH = 6)	Remoção atingiu 99,72% após 240 min de irradiação (100 mg/L de Ag ₂ CO ₃ /Fe ₂ O ₃ /TiO ₂ ; pH = 6; [fenol] = 0,05 mg/L)	(EL- MAGHRABI et al., 2018) / Não
F/N/TiO ₂ /SiO ₂	10 mg/L - Cinco ciclos	Soluções aquosas de vermelho básico 29, azul básico 41 e amarelo básico 51 (30 mg/L; pH = 3, 5, 7 e 9)	Degradação de mais de 90% para os três corantes separadamente após 840 min de irradiação (10 mg/L de F/N/TiO ₂ /SiO ₂ ; pH = 3; [corantes] = 30 mg/L)	(KOSAR HASHEMI et al., 2021) / Não
TiO ₂ e TiO ₂ /CA (Carvão ativado)	500 mg/L - Dois ciclos	Solução aquosa de azul de metileno (25 mg/L)	Remoção de 98,1% após 90 min de irradiação (500 mg/L de TiO ₂ /CA; [azul de metileno] = 25 mg/L)	(DALTO et al., 2021) / Não
TiO ₂ /PVDF (composto com fluoreto de polivinilideno)	10, 20 e 30 mg/L - Três ciclos	Solução aquosa de ácido niflúmico (10, 20 e 30 mg/L; pH = 3, 7 e 9)	Degradação de 91% após 360 min de irradiação (30 mg/L de TiO ₂ /PVDF; pH = 7; [ácido niflúmico] = 10 mg/L)	(AOUDJIT et al., 2022) / Não
TiO ₂ /BG imobilizado em vidro de borossilicato	- 60, 90, 120 e 150 mg/L - Três ciclos	solução aquosa de laranja de metila (10 mg/L; pH = 6)	Remoção de 97,8% após 300 min de irradiação (120 mg/L de TiO ₂ /BG; pH = 6; [laranja de metila] = 10 mg/L)	(AL-MAMUN; KADER; ISLAM, 2021) / Não

Realização



TiO ₂ /ZSM-5 e ZnO/ZSM-5 hibridizados com substrato mesoporoso de zeólito de aluminossilicato	e 1000, 2500 e 3000 mg/L - Seis ciclos	solução aquosa de laranja de metila (20 mg/L; pH = 2, 4, 6, 7, 8 e 9)	Degradação de 99,55% após 180 min de irradiação (2000 mg/L de TiO ₂ /ZSM-5; pH = 7; [laranja de metila] = 20 mg/L)	(ZNAD et al., 2018) / Não
TiO ₂ e TiO ₂ /NPs (em forma de nanopartículas)	15, 30, 60, 90, 120 e 150 mg/L - Três ciclos	solução aquosa de laranja de metila (15, 30 e 45 mg/L; pH = 3, 7 e 11)	Degradação de 96,38% após 300 min de irradiação (150 mg/L de TiO ₂ /NPs; pH = 3; [laranja de metila] = 15 mg/L)	(RASHID AL-MAMUN et al., 2022) / Não

A Tabela 1 apresenta uma compilação de resultados que buscam melhorar a eficiência do TiO₂, utilizando estratégias como: i) dopagem do TiO₂ com N, Fe, Cu, dentre outros; ii) associação do TiO₂ com outros semicondutores como ZnO, Bi₂WO₆, MoO₃ formando estruturas híbridas; ou iii) utilizando materiais (baseados em carbono, zeólitos e outros) que servem como suporte para o TiO₂. Tais modificações visam melhorar a eficiência dos processos de adsorção e de degradação dos poluentes alvos, bem como reduzir o tempo necessário do processo de degradação (LANDI et al., 2019). Além disso, verificou-se que em metade dos trabalhos analisados, os autores utilizaram três, quatro ou cinco ciclos de repetição. Isso porque a reutilização do fotocatalisador é crucial para possíveis aplicações em larga escala, e neste sentido, tais testes têm sido comumente exigidos pela comunidade científica (SERNA-GALVIS et al., 2016). Acerca da forma de aplicação dos materiais fotocatalíticos, observou-se que em 83% dos trabalhos, os fotocatalisadores foram adicionados diretamente na forma de pós à solução que se desejava tratar, em quantidades que variaram de 2,5 até 5000 mg por litro de solução tratada. Por outro lado, em 17% dos trabalhos, os fotocatalisadores foram imobilizados em materiais orgânicos (celulósicos) ou inorgânicos (vidro de borossilicato e polivinilideno).

Dentre os poluentes utilizados nos ensaios experimentais encontram-se corantes e fármacos, que são responsáveis por uma enorme parcela da poluição de efluentes por agentes químicos, sendo os seus resíduos facilmente encontrados nos efluentes residuais próximos de áreas industriais e grandes centros urbanos (SODRÉ, 2012). As concentrações



utilizadas para os poluentes variaram de 0,03 a 100 mg/L e os resultados mostram que os fotocatalisadores apresentaram uma alta taxa de degradação dos poluentes químicos, variando de 82,3% a 100%. Estes percentuais, em geral, foram calculados a partir dos resultados obtidos por cromatografia líquida ou espectrofotometria no UV-vis, dependendo do tipo de poluente. Por outra perspectiva, implica enfatizar que a degradação dos poluentes por si só não é suficiente para julgar o mérito do tratamento e materiais utilizados. A toxicidade também é um aspecto crítico a ser considerado ao avaliar a eficácia do tratamento. Além das altas taxas de degradação e mineralização (em geral, obtido por medidas do carbono orgânico total), deseja-se adicionalmente que a toxicidade permaneça em níveis aceitáveis. Métodos de tratamento de efluentes como a fotocatalise, podem levar a formação de compostos intermediários mais tóxicos do que os poluentes inicialmente presentes na amostra (RIZZO, 2011). Entretanto, dentre os estudos apresentados na Tabela 1, apenas dois realizaram testes de toxicidade (BANSAL; VERMA; TALWAR, 2018) e (ARMAKOVIĆ et al., 2020).

Em Bansal, Verma e Talwar (2018) a análise de toxicidade de um efluente farmacêutico foi realizada através de ensaio de difusão em ágar, utilizando culturas de *Escherichia coli* (teste de Kirby-Bauer), que é um teste quantitativo largamente utilizado para a análise de antibióticos. Nestes ensaios, pode-se observar que a amostra não tratada apresentou os maiores níveis de toxicidade. Além disso, houve uma redução gradativa da toxicidade das amostras que se submeteram aos maiores intervalos de tempo nos ensaios fotocatalíticos. Além deste teste, a toxicidade aguda do efluente tratado foi avaliada pelo método de bioensaio, com base no fator de toxicidade (quantidade mínima de diluição da amostra necessária para não atingir a mortalidade do peixe-zebra). Os autores observaram que 100% de sobrevivência dos peixes foi alcançada após 96h de teste de bioensaio (BANSAL; VERMA; TALWAR, 2018). Por outro lado, em Armaković et al (2020) realizaram-se os testes de toxicidade utilizando linhagens celulares de mamíferos, que são indicadores poderosos de alterações metabólicas e genéticas. Os resultados obtidos indicam que o tipo de catalisador, o tempo de irradiação e o tipo de linhagem celular estão intimamente relacionados com a toxicidade das amostras, as quais consistiram de solução aquosa do fármaco pindolol – indicado para o tratamento de hipertensão arterial. Na faixa

Realização



de concentração investigada, a solução original não apresentou toxicidade significativa. Além disso, os autores afirmaram que o aumento da toxicidade em decorrência dos processos fotocatalíticos pode ser considerado irrelevante em comparação com a solução inicial (ARMAKOVIĆ et al., 2020).

CONCLUSÕES

Neste trabalho buscou-se apresentar os resultados mais recentes da aplicação de fotocatalisadores baseados no TiO_2 e ativados por luz solar natural para o tratamento de efluentes reais ou sintéticos. Observou-se que dentre as variáveis mais investigadas, destacam-se a concentração inicial dos compostos químicos (poluentes alvo), o pH da solução a ser fotodegradada, a concentração do fotocatalisador (sua modificação e/ou imobilização), o intervalo de tempo para o equilíbrio adsorção-dessorção, bem como o período e as condições de irradiação solar. Porém, enfatiza-se que dentre os vinte e três trabalhos analisados, apenas dois realizaram testes de toxicidade. De todo modo, os estudos que envolvem o uso do TiO_2 como fotocatalisador vêm apresentando resultados bastante promissores no que tange à sua capacidade de degradar poluentes químicos em diversas aplicações experimentais. Acredita-se que, com a continuidade destas pesquisas e com o desenvolvimento de novas técnicas de modificação do TiO_2 , poderá ser possível obter fotocatalisadores ainda mais eficientes e economicamente viáveis para a aplicação em grande escala, visando a degradação dos diferentes poluentes encontrados atualmente em águas residuais.

REFERÊNCIAS

- AL-JEMELI, M. et al. Degradation of anti-inflammatory drugs in synthetic wastewater by solar photocatalysis. **Catalysts**, v. 11, n. 11, 1 nov. 2021.
- AL-MAMUN, M. R. et al. Photocatalytic performance assessment of GO and Ag co-synthesized TiO_2 nanocomposite for the removal of methyl orange dye under solar irradiation. **Environmental Technology and Innovation**, v. 22, 1 maio 2021.
- AL-MAMUN, M. R.; KADER, S.; ISLAM, M. S. Solar- TiO_2 immobilized photocatalytic reactors performance assessment in the degradation of methyl orange dye in aqueous solution. **Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management**, v. 16, 1 dez. 2021.
- ALWARD, A. I. et al. Ability of $\text{FeNi}_3/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ nanocomposite to degrade amoxicillin in wastewater samples in solar light-driven processes. **South African Journal of Botany**, v. 153, p.

Realização



195–202, 1 fev. 2023.

AOUDJIT, L. et al. Solar Photocatalytic Membranes: An Experimental and Artificial Neural Network Modeling Approach for Niflumic Acid Degradation. **Membranes**, v. 12, n. 9, 1 set. 2022.

ARMAKOVIĆ, S. J. et al. Kinetics, mechanism and toxicity of intermediates of solar light induced photocatalytic degradation of pindolol: Experimental and computational modeling approach. **Journal of Hazardous Materials**, v. 393, 5 jul. 2020.

BANSAL, P.; VERMA, A.; TALWAR, S. Detoxification of real pharmaceutical wastewater by integrating photocatalysis and photo-Fenton in fixed-mode. **Chemical Engineering Journal**, v. 349, p. 838–848, 1 out. 2018.

BRICE, R. P. et al. Photo-oxidation of three major pharmaceuticals in urban wastewater under artificial and solar irradiations. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 425, 1 mar. 2022.

CHEKIR, N. et al. Effective removal of paracetamol in compound parabolic collectors and fixed bed reactors under natural sunlight. **Water Science and Technology**, v. 82, n. 11, p. 2460–2471, 1 dez. 2020.

CHONG, M. N. et al. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. **Water Research**, Elsevier Ltd, 2010.

DALTO, F. et al. Solar light-induced methylene blue removal over TiO₂/AC composites and photocatalytic regeneration. **Nanomaterials**, v. 11, n. 11, 1 nov. 2021.

EL-MAGHRABI, H. H. et al. Photocorrosion resistant Ag₂CO₃@Fe₂O₃/TiO₂-NT nanocomposite for efficient visible light photocatalytic degradation activities. **Journal of Hazardous Materials**, v. 360, p. 250–256, 15 out. 2018.

GBANDI, T. This water is all ours: Water demand and civil conflicts. **Research in Economics**, v. 76, n. 2, p. 120–130, 1 jun. 2022.

GOMEZ-SOLIS, C. et al. Efficient solar removal of acetaminophen contaminant from water using flexible graphene composites functionalized with Ni@TiO₂:W nanoparticles. **Journal of Environmental Management**, v. 290, 15 jul. 2021.

HASAN KHAN NEON, M.; ISLAM, M. S. MoO₃ and Ag co-synthesized TiO₂ as a novel heterogeneous photocatalyst with enhanced visible-light-driven photocatalytic activity for methyl orange dye degradation. **Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management**, v. 12, 1 dez. 2019.

JARAMILLO-FIERRO, X.; GONZÁLEZ, S.; MEDINA, F. La-doped ZnTiO₃/TiO₂ nanocomposite supported on Ecuadorian diatomaceous earth as a highly efficient photocatalyst driven by solar light. **Molecules**, v. 26, n. 20, 2 out. 2021.

KHOR, C. M.; KHAN, M. M.; HARUNSANI, M. H. Silver niobate-based photocatalysts: Relevance in dye degradation. **Chemical Physics Impact**, Elsevier B.V. 1 jun. 2023.

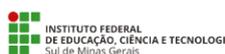
KOSAR HASHEMI, Y. et al. Photodegradation of organic water pollutants under visible light using anatase F, N co-doped TiO₂/SiO₂ nanocomposite: Semi-pilot plant experiment and density functional theory calculations. **Chemosphere**, v. 275, 1 jul. 2021.

LANDI, S. et al. Photocatalytic performance of N-doped TiO₂ nano-SiO₂-HY nanocomposites immobilized over cotton fabrics. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 2, p. 1933–1943, 1 abr. 2019.

LANDI, S. et al. Performance of self-cleaning cotton textiles coated with TiO₂, TiO₂-SiO₂ and TiO₂-SiO₂-HY in removing rhodamine B and reactive red 120 dyes from aqueous solutions. **Desalination and Water Treatment**, v. 223, p. 447–455, 1 maio 2021.

MANU, D. S.; THALLA, A. K. Influence of various operating conditions on wastewater treatment in an AS-biofilm reactor and post-treatment using TiO₂-based solar/UV photocatalysis. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 40, n. 10, p. 1271–1288, 29 abr. 2019.

Realização





- MHEMID, R. K. S.; SALMAN, M. S.; MOHAMMED, N. A. Comparing the efficiency of N-doped TiO₂ and commercial TiO₂ as photo catalysts for amoxicillin and ciprofloxacin photo-degradation under solar irradiation. **Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering**, v. 57, n. 9, p. 813–829, 2022.
- MOHANAN, D. et al. Cucurbit[7]uril encapsulated dye-sensitized enhanced solar photocatalysis using positively charged sheet-like anatase TiO₂ mesocrystals. **Applied Surface Science**, v. 488, p. 911–920, 15 set. 2019.
- MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABA, R. D. **Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: Cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. Química Nova - Sociedade Brasileira de Química**, 1 set. 2017.
- RAO, G. et al. FeOOH and Fe₂O₃ co-grafted TiO₂ photocatalysts for bisphenol A degradation in water. **Catalysis Communications**, v. 97, p. 125–129, 2017.
- RASHID AL-MAMUN, M. et al. Synthesis, characterization, and photocatalytic performance of methyl orange in aqueous TiO₂ suspension under UV and solar light irradiation. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 40, p. 113–125, 1 abr. 2022.
- RIZZO, L. Bioassays as a tool for evaluating advanced oxidation processes in water and wastewater treatment. **Water Research**, Elsevier Ltd, 2011.
- RUEDA-MÁRQUEZ, J. J. et al. Photocatalytic degradation of pharmaceutically active compounds (PhACs) in urban wastewater treatment plants effluents under controlled and natural solar irradiation using immobilized TiO₂. **Solar Energy**, v. 208, p. 480–492, 15 set. 2020.
- SEGUNDO, I. R. et al. Review and analysis of advances in functionalized, smart, and multifunctional asphalt mixtures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier Ltd, 1 nov. 2021.
- SERNA-GALVIS, E. A. et al. High frequency ultrasound as a selective advanced oxidation process to remove penicillinic antibiotics and eliminate its antimicrobial activity from water. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 31, p. 276–283, 1 jul. 2016.
- SHARMA, S. et al. Bi₂WO₆/C-dots/TiO₂: A novel z-scheme photocatalyst for the degradation of fluoroquinolone levofloxacin from aqueous medium. **Nanomaterials**, v. 10, n. 5, 1 maio 2020.
- SODRÉ, F. F. Fontes Difusas de Poluição da Água: Características e métodos de controle. **Artigos Temáticos do AQQUA**. [s.l: s.n.].
- YE, T. et al. Faceted TiO₂ photocatalytic degradation of anthraquinone in aquatic solution under solar irradiation. **Science of the Total Environment**, v. 688, p. 592–599, 20 out. 2019.
- ZNAD, H. et al. Synthesis a novel multilamellar mesoporous TiO₂/ZSM-5 for photo-catalytic degradation of methyl orange dye in aqueous media. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 1, p. 218–227, 1 fev. 2018.

Realização