

ELETRODOS CERÂMICOS FOTOATIVOS vs. Si/DDB: EFICIÊNCIA E CUSTO NO TRATAMENTO DE CONTAMINANTES DE PREOCUPAÇÃO EMERGENTES EM EFLUENTES DE ETE

Camila Fernanda Zorzo – camila.zorzo@ufrgs.br – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGIPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Gabriel Araújo Mottin – gabrielaraujomottin@gmail.com – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Louidi Lauer Albornoz – louidi.lauer@ufrgs.br – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGIPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Valentín Pérez Herranz – vperez@iqn.upv.es – Instituto Universitario de Investigación de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental, Universitat Politècnica de València

Salatiel Wohlmuth da Silva – salatiel.silva@ufrgs.br – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGIPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumo: Contaminantes de preocupação emergente (CPEs) como atrazina (ATZ), carbamazepina (CBZ) e sulfametoxazol (SMX) são detectados em efluentes de estações de tratamento de esgoto (ETEs), representando riscos à saúde humana e aos ecossistemas. Este trabalho avaliou a eficiência de eletrodos cerâmicos maciços e microporosos de SnO_2 dopado com Sb revestidos com Fe_2WO_6 (BCE-Fe) e Bi_2WO_6 (BCE-Bi) na degradação eletroquímica e fotoeletroquímica de uma mistura de ATZ, CBZ e SMX, comparando seu desempenho ao ânodo Si/DDB. Os ensaios foram conduzidos em solução sintética com NaCl como eletrólito a densidades de corrente de 10 e 40 mA cm^{-2} , com as melhores condições dos eletrodos cerâmicos avaliados também sob irradiação solar simulada. O processo foi igualmente avaliado em efluente real coletado após tratamento convencional em ETE. Os eletrodos foram caracterizados por DRX, MEV-EDS e espectrofotometria UV-Vis, apresentando energias de banda proibida de 1,88 eV (BCE-Fe) e 2,96 eV (BCE-Bi). Em solução sintética a 10 mA cm^{-2} , o BCE-Bi sob irradiação solar simulada destacou-se com mineralização de 34,2%, eficiência de corrente de mineralização de 63,36% e consumo específico de energia por COT removido de 100,21 kWh kg^{-1} - desempenho superior ao Si/DDB nas mesmas condições. Em efluente real, as degradações foram inferiores às da solução sintética para todos os eletrodos, com SMX atingindo até 92,6% de remoção com BCE-Fe, enquanto ATZ mostrou-se altamente recalcitrante ($\leq 2,3\%$). Os resultados evidenciam os eletrodos cerâmicos como alternativa economicamente viável ao Si/DDB, com desempenho competitivo para o tratamento de CPEs em efluentes.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br



13º Simpósio
Internacional de
Qualidade Ambiental

Tecnologias Ambientais e Inovação

23, 24 e 25 de setembro de 2026

Palavras-chave: oxidação eletroquímica avançada; eletrodos cerâmicos; fotoeletrocatalise; micropoluentes emergentes; efluentes de estações de tratamento de esgoto.

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



REBOB
Rede Brasileira de
Biossegurança e Biotecnologia



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

PHOTOACTIVE CERAMIC ELECTRODES vs. Si/BDD: EFFICIENCY AND COST IN THE TREATMENT OF CONTAMINANTS OF EMERGING CONCERN IN WWTP EFFLUENTS

Abstract: Contaminants of emerging concern (CECs) such as atrazine (ATZ), carbamazepine (CBZ), and sulfamethoxazole (SMX) are detected in wastewater treatment plant (WWTP) effluents, posing risks to human health and ecosystems. This study evaluated the efficiency of solid and microporous Sb-doped SnO_2 ceramic electrodes coated with Fe_2WO_6 (BCE-Fe) and Bi_2WO_6 (BCE-Bi) for the electrochemical and photoelectrochemical degradation of an ATZ, CBZ, and SMX mixture, comparing their performance to the Si/BDD anode. Experiments were conducted in synthetic solution with NaCl as supporting electrolyte at current densities of 10 and 40 mA cm^{-2} , with the best conditions for each ceramic electrode also evaluated under simulated solar irradiation. The process was also assessed using real effluent collected after conventional treatment at a WWTP. The electrodes were characterized by XRD, SEM-EDS, and UV-Vis spectrophotometry, presenting bandgap energies of 1.88 eV (BCE-Fe) and 2.96 eV (BCE-Bi). In synthetic solution at 10 mA cm^{-2} , BCE-Bi under simulated solar irradiation stood out with 34.2% mineralization, a mineralization current efficiency of 63.36%, and a specific energy consumption per TOC removed of 100.21 kWh kg^{-1} – outperforming Si/BDD under the same conditions. In real effluent, degradation was lower than in synthetic solution for all electrodes; SMX reached up to 92.6% removal with BCE-Fe, while ATZ proved highly recalcitrant ($\leq 2.3\%$). The results highlight ceramic electrodes as a cost-effective alternative to Si/BDD, with competitive performance for CEC treatment in wastewater effluents.

Keywords: advanced electrochemical oxidation; ceramic electrodes; photoelectrocatalysis; contaminants of emerging concern; wastewater treatment plant effluents.

1. INTRODUÇÃO

A presença de contaminantes de preocupação emergente (CPEs) em corpos hídricos constitui um dos principais desafios ambientais da atualidade, resultado da intensificação da urbanização, das atividades agrícolas e do consumo crescente de produtos farmacêuticos e agroquímicos (SAMUEL *et al.*, 2025; SANDOVAL *et al.*, 2024). Esses compostos têm sido detectados em efluentes de estações de tratamento de esgoto (ETEs), águas superficiais, subterrâneas e até na água potável, em concentrações que variam de pg L^{-1} a ng L^{-1} (STARLING *et al.*, 2019). Apesar das baixas concentrações, os CPEs preocupam pelo lançamento contínuo e persistência no ambiente, pelos efeitos adversos à saúde humana e aos ecossistemas – incluindo disrupção endócrina, toxicidade, carcinogenicidade e agravamento da resistência bacteriana a antibióticos – e pelos possíveis efeitos sinérgicos decorrentes da exposição simultânea a múltiplos compostos (SANDOVAL *et al.*, 2024; STARLING *et al.*, 2019). No Brasil, atrazina (ATZ, herbicida), carbamazepina (CBZ, anticonvulsivante) e sulfametoxazol (SMX,

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

antibiótico) são extensamente utilizados e têm sido detectados em águas superficiais, com concentrações máximas reportadas de 232 ng L^{-1} , 3.530 ng L^{-1} e 1.800 ng L^{-1} para ATZ, CBZ e SMX, respectivamente (ARSAND *et al.*, 2023; BÖGER *et al.*, 2021; PERIN *et al.*, 2021; PIVETTA *et al.*, 2020).

A principal via de entrada desses compostos no ambiente são os efluentes das ETEs convencionais, cujos processos de tratamento são tecnologicamente limitados para remover a maioria dos CPEs (SHAHID *et al.*, 2021). Esse cenário é agravado pela ausência de regulamentação específica e de padrões de qualidade que estabeleçam limites máximos admissíveis para CPEs em efluentes lançados em corpos receptores (SANDOVAL *et al.*, 2024). Frente a esse cenário, diretrizes internacionais como a Diretiva da União Europeia 2024/3019 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU – em especial o ODS 6 (Água Limpa e Saneamento) – reforçam a necessidade urgente de tecnologias avançadas, sustentáveis e economicamente viáveis para o tratamento de micropoluentes emergentes (LLANOS & SIRÉS, 2025).

Dentre as tecnologias disponíveis, os processos de oxidação eletroquímica avançada (OEA) têm se destacado pela versatilidade, facilidade de operação e escalabilidade, natureza ecologicamente correta e uso de eletrodos estáveis, promovendo a degradação e mineralização de CPEs por meio da geração *in situ* de espécies altamente reativas, como radicais hidroxila ($\text{HO}^\bullet$), espécies ativas de cloro (Cl_2 , HClO , OCl^-) e radicais de cloro ($\text{Cl}^\bullet$), sem necessidade de adição de reagentes químicos externos (BRILLAS, 2021; PERALTA-HERNÁNDEZ & BRILLAS, 2025). O material anódico é um dos principais fatores que determinam a eficiência do processo. Ânodos de diamante dopado com boro (DDB) são reconhecidos como os melhores para OEA, devido ao elevado sobrepotencial para evolução de O_2 e à alta capacidade de geração de $\text{HO}^\bullet$ reativos (BRILLAS, 2021). Contudo, seu uso em larga escala é limitado pelo alto custo de produção e pela dependência de substratos específicos (GRANADOS-FERNÁNDEZ *et al.*, 2026).

Nesse contexto, eletrodos cerâmicos maciços e microporosos de SnO_2 dopado com Sb (BCE) surgem como alternativa promissora, combinando baixo custo, facilidade de fabricação por técnicas cerâmicas tradicionais, elevada área ativa e boa estabilidade química (MORA-GÓMEZ *et al.*, 2018). Para ampliar seu desempenho, materiais fotocatalíticos com lacuna de banda na faixa do visível podem ser incorporados à superfície do eletrodo, habilitando a fotoeletrocatalise, processo em que a aplicação simultânea de corrente elétrica e irradiação luminosa melhora a separação de cargas, amplia a geração de espécies reativas de oxigênio (ERO) e potencializa a mineralização dos poluentes (RAJPUT *et al.*, 2021). Tungstatos de ferro (Fe_2WO_6) e de bismuto (Bi_2WO_6) destacam-se entre os materiais fotocatalisadores para essa finalidade, por apresentarem lacuna de banda compatível com a absorção de luz visível, estabilidade química, resistência à corrosão, baixo custo e baixa toxicidade (DOMINGO-TORNER *et al.*, 2023; LAM *et al.*, 2024).

Diante desse cenário, o presente trabalho avalia a eficiência de eletrodos cerâmicos de SnO_2 dopado com Sb revestidos com Fe_2WO_6 (BCE-Fe) e Bi_2WO_6 (BCE-Bi) na degradação eletroquímica e fotoeletroquímica de uma mistura de ATZ, CBZ e SMX, comparando seu desempenho ao ânodo de Si/DDB. Os ensaios foram conduzidos em solução sintética e em efluente real coletado após tratamento convencional em ETE, avaliando parâmetros de degradação, mineralização e eficiência energética do processo.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Síntese dos eletrodos

Os eletrodos cerâmicos à base de Sb-SnO₂ foram sintetizados a partir do dióxido de estanho (SnO₂, pureza 99,85%) e trióxido de antimônio (Sb₂O₃, pureza 99%) como dopante, formulando-se uma composição com razão molar SnO₂/Sb₂O₃ de 99/1, conforme descrito em trabalhos do grupo de pesquisa da UPV (DOMINGO-TORNER *et al.*, 2023; MORA-GÓMEZ *et al.*, 2018). Os fotocatalisadores Fe₂WO₆ e Bi₂WO₆ foram obtidos por reação sólido-sólido a partir de seus respectivos precursores em proporções estequiométricas, com tratamentos térmicos entre 700 e 1100 °C. As suspensões fotocatalíticas (0,6% em massa de catalisador) foram depositadas sobre os substratos cerâmicos por dip-coating, seguido de fixação térmica a 1000 °C por 1 h, obtendo-se os eletrodos modificados.

2.2. Caracterização físico-química e morfológica dos eletrodos

Os eletrodos sinterizados foram caracterizados quanto à densidade aparente pelo método de Arquimedes (imersão em mercúrio) e à resistividade elétrica pelo método de quatro pontos (HIOKI RM3545). A estrutura cristalina foi determinada por difração de raios X (DRX) em difratômetro D8 Advance (Bruker), com radiação CuKα ($\lambda = 1,54183 \text{ \AA}$), operando a 45 kV e 40 mA, com varredura de 2θ entre 5° e 90°. A morfologia superficial, incluindo eletrodos metalizados com Pt, foi analisada por microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo (MEV-FEG, QUANTA 200 F, FEI Co.) acoplada à microanálise por dispersão de energia (EDS, Genesis 7000 SUTW, EDAX). As propriedades ópticas foram avaliadas por espectrofotometria UV-Vis (Shimadzu UV-2600i), na faixa de 220–1400 nm, nos modos de absorção e reflectância difusa. O valor de band gap (E_g) foi determinado pela função de Kubelka-Munk e gráficos de Tauc, mediante extrapolação linear até a interseção com o eixo de energia.

2.3. Ensaios eletroquímicos em solução sintética: procedimento experimental e análises

Atrazina (ATZ, C₈H₁₄ClN₅; 215,68 g mol⁻¹) foi obtida do herbicida comercial AclamadoBR® (Ourofino Agrociência). Carbamazepina (CBZ, C₁₅H₁₂N₂O; 236,27 g mol⁻¹) foi adquirido de um medicamento genérico (Laboratório Teuto Brasileiro S.A.). Sulfametoxazol (SMX, C₁₀H₁₁N₃O₃S; 253,28 g mol⁻¹) foi obtido em uma farmácia de manipulação localizada no município de Porto Alegre. A solução sintética foi preparada com uma concentração de 20 mg L⁻¹ de cada um dos CPEs diluída em água deionizada (pH 5,5 – 6,1).

Os ensaios foram conduzidos em reator de quartzo (200 mL) com três diferentes materiais anódicos – Si/DDB, BCE-Fe e BCE-Bi – e cátodo de aço inoxidável (AISI 304L), a uma distância entre eletrodos de 2,5 cm. Os ensaios foram conduzidos usando NaCl (1,23 g L⁻¹) como eletrólito de suporte, em um tempo de tratamento de 60 minutos, em duas diferentes densidades de corrente (j) de 10 e 40 mA cm⁻². Os eletrodos de BCE sem revestimento, BCE-Fe e BCE-Bi foram testados na presença de luz, utilizando uma lâmpada de simulação solar (Ultra Vitalux 300 W, Osram®), que possui alta emissão de

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

radiação ultravioleta, com potência irradiada de 3 W em UV-B (280 a 315 nm) e 13,6 W em UV-A (315 a 400 nm).

A degradação dos CPEs foi monitorada por HPLC-DAD (LC20A, Shimadzu, coluna C18) e a mineralização pelo carbono orgânico total (TOC-LCPH, Shimadzu). A partir dos dados obtidos, foram calculados o nível de combustão (ϕ), a eficiência de corrente de mineralização (ECM), os consumos de energia específicos por COT removido ($E_{S[COT]}$) e por degradação de CPE ($E_{S[CPE]}$) e o consumo de energia volumétrico (E_v), conforme estabelecido na literatura (FLOX *et al.*, 2007; (MARTÍNEZ-HUITLE *et al.*, 2012; MIWA *et al.*, 2006).

2.3. Ensaios eletroquímicos em efluente real

O efluente real foi coletado após o tratamento em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da cidade de Porto Alegre (RS), apresentando as características descritas na Tabela 1. Ao efluente real foram adicionados 20 mg L⁻¹ de ATZ, CBZ e SMX. O sistema eletroquímico foi o mesmo utilizado para a solução sintética, assim como as determinações analíticas. As condições operacionais utilizadas para cada material anódico foram as mais promissoras encontradas nos ensaios com a solução sintética.

Tabela 1 – Características do efluente real coletado pós-tratamento na ETE.

Parâmetro	Valor
pH	5,92
Oxigênio dissolvido	8,2 mg L ⁻¹
DBO	2,1 mg L ⁻¹
DQO	41 mg L ⁻¹
Turbidez	8,98 NTU
Alumínio	0,359 mg L ⁻¹
Cobre	0,013 mg L ⁻¹
Ferro	0,657 mg L ⁻¹
Fósforo	3,598 mg L ⁻¹
Zinco	0,092 mg L ⁻¹
Nitrato	19,74 mg L ⁻¹
Nitrogênio amoniacal	1,93 mg L ⁻¹
Surfactantes	0,272 mg L ⁻¹
Sólidos sedimentáveis	0,1 mg L ⁻¹
Sólidos suspensos totais	27 mg L ⁻¹

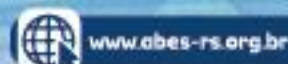
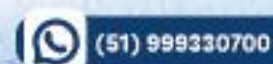
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização dos eletrodos

BCE-Fe

O Fe_2WO_6 foi sintetizado a 900, 1000 e 1100 °C. A amostra obtida a 900 °C apresentou cristalização incompleta, enquanto a de 1100 °C indicou crescimento cristalino excessivo. Assim, a síntese a 1000 °C foi selecionada para fabricação dos eletrodos. Ensaios de compatibilidade com SnO_2 mostraram apenas as fases cassiterita e Fe_2WO_6 , sem evidências de reação entre suporte e catalisador.

Os suportes apresentaram densidade aparente de $3506 \pm 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, resistividade de $0,0222 \pm 0,0002 \Omega \cdot \text{cm}$ e porosidade estimada em 49%. As análises por MEV/EDX confirmaram homogeneidade da camada catalítica e presença de Fe e W, além de Sn do suporte. A menor proporção de W sugere volatilização parcial de WO_3 durante a síntese.

A reflectância difusa indicou absorção predominante abaixo de 400 nm, com energia de banda proibida (E_g) de 1,88 eV, inferior ao BCE sem revestimento ($\approx 3,7$ eV), confirmando potencial fotocatalítico do Fe_2WO_6 .

BCE-Bi

O Bi_2WO_6 apresentou coloração azulada típica da solução sólida entre os óxidos de estanho e antimônio e baixa resistividade elétrica ($0,0246 \pm 0,0002 \Omega \cdot \text{cm}$). A densidade aparente foi de $3691 \pm 13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, com porosidade de 46%.

Após dois ciclos térmicos (4 + 4 h), observou-se predominância da fase Bi_2WO_6 e redução das fases secundárias WO_3 e $\text{Bi}_{14}\text{W}_2\text{O}_{27}$. O material foi então utilizado na preparação da suspensão catalítica. O revestimento apresentou boa aderência ao substrato, preenchendo parcialmente os poros superficiais. As análises por EDX confirmaram a presença de Bi e W.

O BCE-Bi apresentou absorção predominante na região UV com início no visível. O valor de E_g foi de 2,96 eV, compatível com a literatura e inferior ao do substrato sem revestimento, indicando potencial para fotoativação.

3.2. Avaliação da degradação e mineralização dos CPEs

Experimentos comparando degradação e mineralização de solução de multicontaminantes (atrazina – ATZ, carbamazepina – CBZ e sulfametoxazol – SMX) foram conduzidos com os três materiais anódicos (Si/DDB, BCE-Fe e BCE-Bi) em duas densidades de corrente ($j = 10$ e 40 mA cm^{-2}), utilizando NaCl como eletrólito de suporte (Figura 1).

Com $j = 10 \text{ mA cm}^{-2}$, o Si/DDB proporcionou degradações de 63,4%, 95,3% e 99,6% para ATZ, CBZ e SMX, respectivamente. O BCE-Fe promoveu aumento de 13% na degradação de ATZ, enquanto o BCE-Bi apresentou redução de 8%, possivelmente relacionada a diferenças na geração de espécies oxidantes e/ou à interação do agroquímico com a superfície anódica (MORA-GÓMEZ *et al.*, 2022). O SMX foi completamente degradado com ambos os eletrodos cerâmicos após 60 min. A mineralização foi de 24,6% (Si/DDB), 17,1% (BCE-Fe) e 21,3% (BCE-Bi).

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional

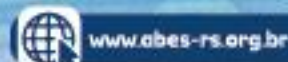
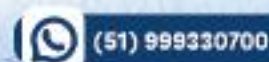
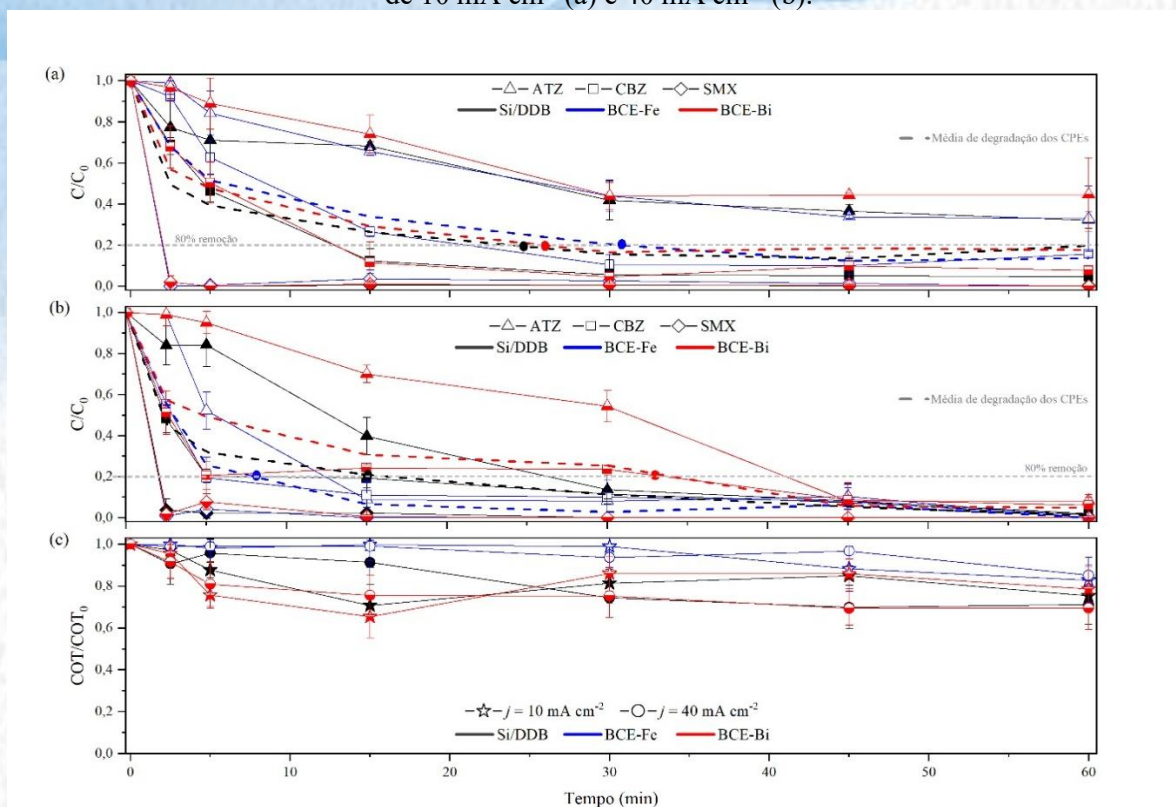


Figura 1 – Degradação (a) (b) e mineralização (c) dos CPEs com os diferentes materiais anódicos em j de 10 mA cm^{-2} (a) e 40 mA cm^{-2} (b).



Com $j = 40 \text{ mA cm}^{-2}$, o BCE-Fe promoveu degradação completa dos três compostos, porém com baixa mineralização (14,7%), sugerindo formação de produtos intermediários. O Si/DDB apresentou maior mineralização em todas as condições, atribuído ao elevado sobrepotencial para evolução de O_2 (2,2–2,6 V/SHE) e com a formação de $\text{HO}^\bullet$ fracamente adsorvidos e altamente reativos (BRILLAS, 2021). O BCE-Bi apresenta comportamento intermediário, com o Bi_2WO_6 reduzindo a resistência de transferência de carga e promovendo maior formação de $\text{HO}^\bullet$ e $\text{O}_2^{\bullet-}$ (DOMINGO-TORNER *et al.*, 2023).

O aumento de j de 10 para 40 mA cm^{-2} favoreceu a geração de espécies oxidantes e de cloro ativo, acelerando a degradação, mas sem aumento proporcional da mineralização, especialmente para o BCE-Fe, indicando possível formação de subprodutos persistentes.

A avaliação conjunta dos parâmetros de performance – nível de combustão (ϕ), eficiência da corrente de mineralização (ECM), consumos específicos de energia por COT removido ($E_{S[\text{COT}]}$) e por degradação de CPE ($E_{S[\text{CPE}]}$) e consumo volumétrico de energia (E_V), apresentados na Tabela 2 — confirma a condição NaCl a 10 mA cm^{-2} como a mais promissora. O BCE-Bi apresentou os melhores valores de ECM (39,98%) e os menores consumos energéticos ($E_{S[\text{COT}]} = 187,59 \text{ kWh kg}^{-1}$, $E_{S[\text{CPE}]} =$

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

186,54 kWh kg⁻¹ e $E_v = 4,07$ kWh m⁻³). Considerando ainda que, nessa condição, todos os materiais atingem remoção superior a 80%, limiar estabelecido pela Diretiva da União Europeia 2024/3019 para determinados micropoluentes, a j de 10 mA cm⁻² foi selecionada para os experimentos com irradiação.

Tabela 2 – Valores de performance do reator para os três materiais anódicos na ausência e presença de luz a 10 mA cm⁻².

Eletrodo	j (mA cm ⁻²)	ϕ	ECM (%)	$E_{S[COT]}$ (kW h kg ⁻¹)	$E_{S[CPE]}$ (kW h kg ⁻¹)	E_v (kW h m ⁻³)
Si/DDB	10	0,297	21,37	415,78	228,24	4,83
BCE-Fe	10	0,199	8,45	919,73	241,48	4,22
BCE-Bi	10	0,276	39,98	187,59	186,54	4,07
Si/DDB	40	0,293	4,77	3.932,70	2.107,83	40,80
BCE-Fe	40	0,147	1,36	11.780,87	1.577,36	34,80
BCE-Bi	40	0,327	9,26	1.779,14	2.186,76	35,80
BCE-Fe com UV-solar	10	0,163	6,05	1.109,62	241,65	3,65
BCE-Bi com UV-solar	10	0,446	63,36	100,21	218,93	3,45
BCE	10	0,092	4,11	1.588,44	200,41	3,55

3.3. Investigação do potencial fotoativo dos eletrodos cerâmicos

Os testes foram conduzidos com BCE sem revestimento, BCE-Fe e BCE-Bi na presença de luz solar simulada, utilizando as melhores condições operacionais identificadas nos ensaios sem luz: NaCl como eletrólito e $j = 10$ mA cm⁻² (Figura 2). A fotólise isolada apresentou baixa degradação (<40%) e ausência de mineralização, confirmando a necessidade do processo eletroquímico para a mineralização efetiva (Figura 2-a).

Com BCE sem revestimento (linha de referência), degradação média superior a 80% foi atingida próximo a 40 min, alcançando 68,3%, 89,2% e 100% para ATZ, CBZ e SMX ao final da eletrólise (Figura 2-b). A mineralização foi de apenas 7,7%, indicando persistência de produtos de transformação intermediários.

Comparado ao BCE sem revestimento, o BCE-Fe apresentou degradação ligeiramente mais lenta dos CPEs, porém maior mineralização, indicando contribuição da fotoativação do BCE-Fe na conversão de intermediários em produtos inorgânicos finais (Figura 2-c). Ao comparar BCE-Fe com e sem luz, CBZ e SMX apresentaram degradação mais rápida na presença de luz, enquanto ATZ e a mineralização global registraram decréscimos de até 15%. Esse comportamento pode ser atribuído a diferentes fatores: (i) competição pelos oxidantes disponíveis entre produtos de transformação de CBZ e SMX e a ATZ mais recalcitrante; (ii) possível passivação do eletrodo por intermediários adsorvidos;

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



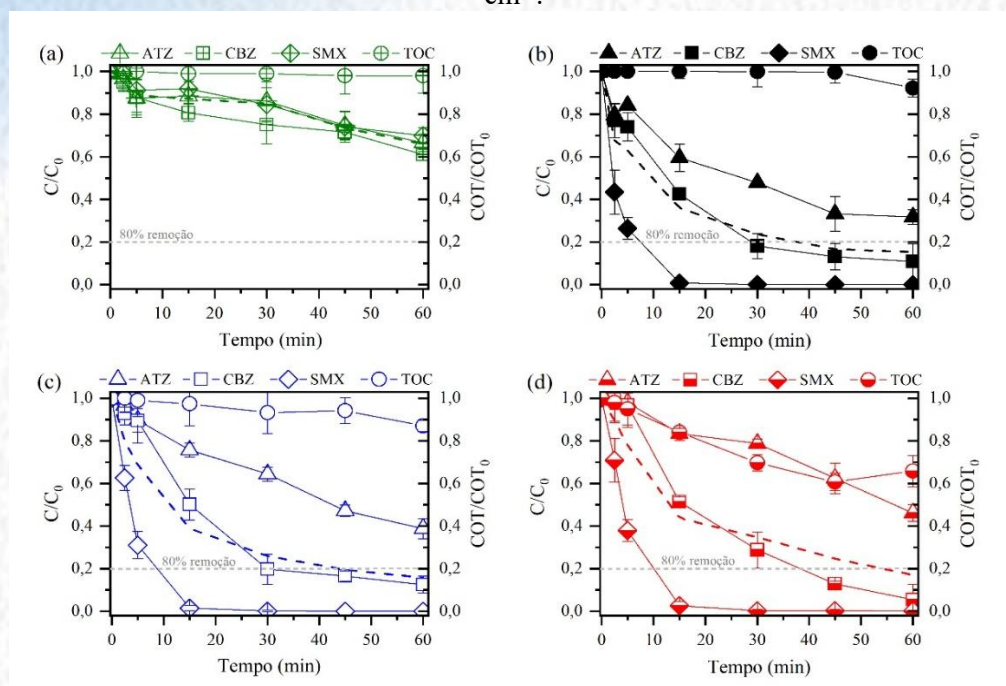
abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

(iii) efeito de filtro interno, com compostos em solução competindo com Fe_2WO_6 pelos fótons disponíveis; e (iv) possível limitação da irradiação utilizada em comprimento de onda e intensidade suficientes para excitação eficiente do material (GARCÍA-ESPINOZA & NACHEVA, 2019; IOVINO *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2022; WU *et al.*, 2017).

Figura 2 – Degradação (C/C_0) e mineralização (COT/COT_0) dos CPEs pela fotólise (a) e com eletrodos cerâmicos irradiados: BCE sem revestimento (b), BCE-Fe (c) e BCE-Bi (d), em $j = 10 \text{ mA cm}^{-2}$.



O BCE-Bi apresentou mineralização significativamente superior (34,2%) em comparação ao BCE sem revestimento (7,7%) e ao BCE-Fe (12,9%). Embora as degradações dos CPEs tenham sido semelhantes no BCE-Bi com e sem luz, a mineralização aumentou cerca de 13% sob irradiação, indicando contribuição efetiva da fotoativação do Bi_2WO_6 para oxidação dos intermediários (Figura 2-d).

Os parâmetros de performance confirmaram o melhor desempenho do BCE-Bi irradiado, com $\phi = 0,446$, $\text{ECM} = 63,36\%$, $\text{E}_{\text{S}[\text{COT}]} = 100,21 \text{ kWh kg}^{-1}$ e $\text{E}_v = 3,45 \text{ kWh m}^{-3}$ entre todos os sistemas avaliados (Tabela 2). O BCE-Bi registrou $\text{E}_{\text{S}[\text{COT}]}$ cerca de 11 vezes menor que o BCE-Fe e aproximadamente 15 vezes menor que o BCE sem revestimento sob irradiação. O comportamento superior foi atribuído à maior estabilidade química do Bi^{3+} , de espécies reativas de cloro ($\text{Cl}^\cdot$ e $\text{HClO}^\cdot$) pela ativação direta do Bi_2WO_6 na presença de Cl^- e pela decomposição fotoquímica do HClO gerado eletroquimicamente e redução da voltagem da célula sob irradiação (DOMINGO-TORNER *et al.*, 2026; HU *et al.*, 2022; MARTINEZ-TOPETE *et al.*, 2026).

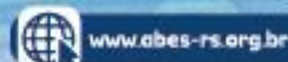
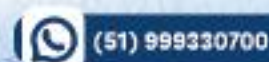
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional

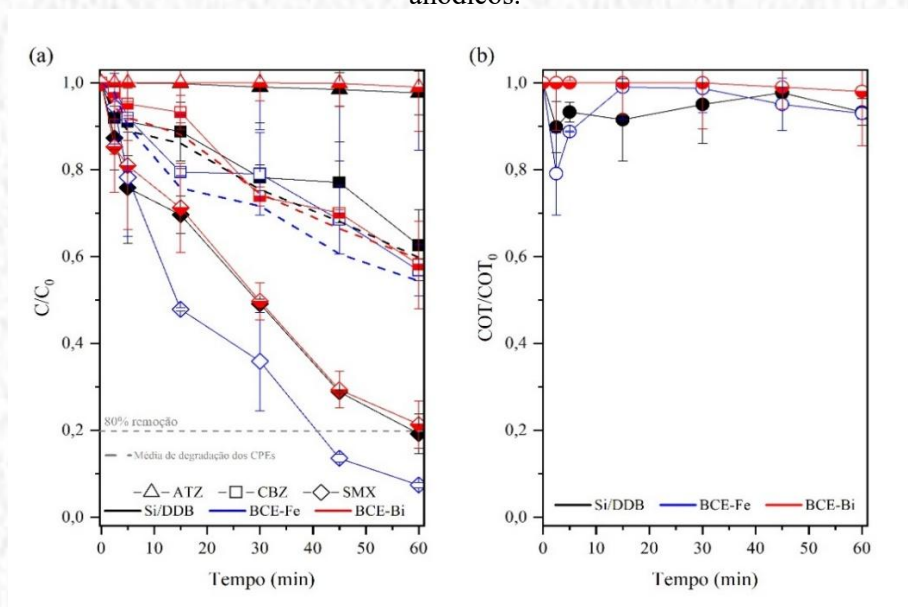


Os resultados demonstram que o material anódico influencia não apenas a taxa de degradação dos compostos alvo, mas principalmente o grau de mineralização da solução. Os resultados demonstram que o BCE-Fe é promissor para degradação rápida em meio cloreto, porém com mineralização limitada. O Si/DDB manteve maior robustez e capacidade mineralizante. O BCE-Bi destacou-se como o material com maior potencial fotoeletroquímico, apresentando elevada eficiência e menor consumo energético, além de representar alternativa de menor custo aos eletrodos de DDB.

3.4. Performance dos eletrodos cerâmicos no tratamento de efluente real

Ensaio com efluente real coletado após o tratamento em uma ETE e enriquecido com os CPEs (atrazina – ATZ, carbamazepina – CBZ e sulfametoxazol – SMX) foram conduzidos nas melhores condições encontrados para cada material anódico: Si/DDB na ausência de luz e BCE-Fe e BCE-Bi na presença de luz solar simulada, todos a j de 10 mA cm^{-2} (Figura 3). O eletrólito NaCl não foi adicionado, uma vez que o efluente apresentava condutividade suficiente ($0,28 \text{ mS cm}^{-1}$) para atingir a densidade de corrente desejada.

Figura 3 – Degradação (a) e mineralização (b) dos CPEs em efluente real pelos diferentes materiais anódicos.



Menores porcentagens de degradação e mineralização foram obtidas com o efluente real em comparação à solução sintética para todos os materiais anódicos, comportamento esperado em matrizes complexas devido à maior complexidade da matriz e à competição por espécies oxidantes. No geral, os valores de degradação e mineralização foram similares entre os eletrodos avaliados, indicando desempenho competitivo dos eletrodos cerâmicos frente ao Si/DDB. Ainda assim,

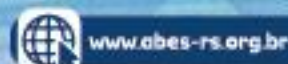
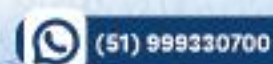
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



em nenhuma das condições avaliadas foi obtida degradação média acima de 80%. O SMX foi o composto de mais fácil degradação, atingindo até 92,6% com o BCE-Fe. A CBZ apresentou valores de degradação reduzidos à metade em relação à solução sintética, alcançando 43,2% com o BCE-Fe. A ATZ foi o composto mais recalcitrante, com degradação de apenas 2,3% com Si/DDB e 1% com os eletrodos cerâmicos. As porcentagens de mineralização permaneceram baixo, entre 2% a 7%. Esses resultados estão associados à menor disponibilidade de íons cloreto no efluente (sem adição de NaCl), resultando em menor geração de espécies ativas de cloro, que tiveram papel determinante nos ensaios com solução sintética.

Diferentemente dos resultados obtidos com solução sintética, com o efluente real o BCE-Fe apresentou os melhores parâmetros de eficiência energética. A ECM foi maior com BCE-Fe (6,86%) em comparação ao Si/DDB (4,51%) e ao BCE-Bi (1,40%). O $E_{S[COT]}$ seguiu a ordem BCE-Fe (3.355,3 kWh kg⁻¹) < Si/DDB (5.946,6 kWh kg⁻¹) < BCE-Bi (16.864,5 kWh kg⁻¹). O BCE-Fe também registrou o menor $E_{S[CPE]}$ (1.554,7 kWh kg⁻¹), frente ao maior consumo do Si/DDB (2.450,7 kWh kg⁻¹). O E_v foi similar entre BCE-Fe e BCE-Bi (12,5 e 12,7 kWh m⁻³, respectivamente), com maior consumo para o Si/DDB (14,6 kWh m⁻³). Apesar disso, os eletrodos cerâmicos apresentaram desempenho competitivo frente ao Si/DDB e, considerando que o custo de fabricação do BCE-Fe e do BCE-Bi é de aproximadamente R\$ 40 m⁻² — valor cerca de 1.900 vezes inferior ao do Si/DDB (~US\$ 15.000 m⁻²; ~R\$ 77.850 m⁻²) —, evidencia-se expressiva vantagem econômica no investimento inicial. Embora uma análise mais rigorosa deva considerar o custo total de propriedade ao longo da vida útil do sistema, a diferença de magnitude observada já aponta para o maior potencial econômico dos eletrodos cerâmicos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho demonstrou o potencial dos eletrodos cerâmicos de SnO₂ dopado com Sb revestidos com Fe₂WO₆ e Bi₂WO₆, para o tratamento eletroquímico e fotoeletroquímico de uma mistura de ATZ, CBZ e SMX. A caracterização confirmou energias de banda proibida compatíveis com fotoativação na região do visível (1,88 eV para BCE-Fe e 2,96 eV para BCE-Bi), viabilizando o acoplamento com irradiação solar simulada.

Em solução sintética com NaCl a 10 mA cm⁻², o BCE-Bi sob irradiação solar simulada apresentou o melhor desempenho global, com eficiência de corrente de mineralização de 63,36% e consumo específico de energia por COT removido de 100,21 kWh kg⁻¹. O BCE-Fe, embora eficiente na degradação dos CPEs, demonstrou mineralização limitada e benefícios fotoeletroquímicos suprimidos pela lixiviação do ferro, que atua como sequestrador de HO[•]. O Si/DDB manteve robustez na mineralização sem irradiação, porém com maior custo energético e de produção.

Em efluente real, todos os eletrodos apresentaram desempenho inferior ao da solução sintética, devido à competição pelos oxidantes gerados pelos constituintes da matriz, com BCE-Fe demonstrando vantagens em eficiência energética frente ao Si/DDB. Em conjunto, esses resultados demonstram que os eletrodos cerâmicos apresentam potencial competitivo frente ao Si/DDB no tratamento de efluentes reais, com vantagens em eficiência energética e menor custo de produção, o que reforça sua viabilidade para aplicações práticas no tratamento de contaminantes de preocupação emergentes.

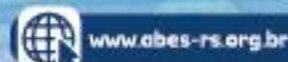
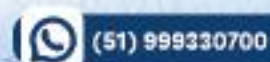
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, FAPERGS, FINEP, UFFS e UPV pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

ARSAND, J. B.; DALLEGRAVE, A.; JANK, L.; FEIJO, T.; PERIN, M.; HOFF, R. B.; ARENZON, A.; GOMES, A.; PIZZOLATO, T. M. Spatial-temporal occurrence of contaminants of emerging concern in urban rivers in southern Brazil. **Chemosphere**, v. 311, n. 136814, 2023.

BÖGER, B.; SUREK, M.; VILHENA, R. O.; FACHI, M. M.; JUNKERT, A. M.; SANTOS, J. M. M. F.; DOMINGOS, E. L.; COBRE, A. F.; MOMADE, D. R.; PONTAROLO, R. Occurrence of antibiotics and antibiotic resistant bacteria in subtropical urban rivers in Brazil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 402, n. 123448, 2021.

BRILLAS, E. Recent development of electrochemical advanced oxidation of herbicides. A review on its application to wastewater treatment and soil remediation. **Journal of Cleaner Production**, v. 290, n. 125841, 2021.

DOMINGO-TORNER, C.; MARTÍ-CALATAYUD, M. C.; PÉREZ-HERRANZ, V.; MESTRE, S.; GARCÍA-GABALDÓN, M. Photoelectrooxidation of emerging pollutants typically found in the Albufera of València using Sb-SnO₂ ceramic electrodes coated with Bi₂WO₆ photocatalyst. **Electrochimica Acta**, v. 559, n. 148635, 2026.

DOMINGO-TORNER, C.; PÉREZ-HERRANZ, V.; MARTÍ-CALATAYUD, M. C.; MESTRE, S.; GARCÍA-GABALDÓN, M. Comparison of two different ceramic electrodes based on Sb-SnO₂ coated with BiFeO₃ and Bi₂WO₆ for the photoelectrooxidation of an emerging pollutant. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 110616, 2023.

FLOX, C.; CABOT, P.; CENTELLAS, F.; GARRIDO, J. A.; RODRÍGUEZ, R. M.; ARIAS, C.; BRILLAS, E. Solar photoelectro-Fenton degradation of cresols using a flow reactor with a boron-doped diamond anode. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 75, p. 17-28, 2007.

GARCÍA-ESPINOZA, J.; NACHEVA, P. M. Effect of electrolytes on the simultaneous electrochemical oxidation of sulfamethoxazole, propranolol and carbamazepine: behaviors, by-products and acute toxicity. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 6855-6867, 2019.

GRANADOS-FERNÁNDEZ, R.; RODRIGUEZ-CANO, M. A.; SÁEZ, C.; LOBATO, J.; RODRIGO, M. A. Recent progress in scaling up promising electrochemical Technologies. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 51, n. 101206, 2026.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

HU, J.; CHEN, F.; MU, K.; ZHANG, J.; LU, J. Enhanced photocatalytic O₂ activation by the synergy of efficient oxygen adsorption and interfacial charge separation: A case of Bi₃O₄Br/rGO van der Waals heterojunction. **Separation and Purification Technology**, v. 286, n. 120416, 2022.

IOVINO, P. CHIANESE, S.; FENTI, A.; BLOTEVOGEL, J.; MUSMARRA, D. An innovative approach for atrazine electrochemical oxidation modelling: Process parameter effect, intermediate formation and kinetic constant assessment. **Chemical Engineering Journal**, v. 474, n. 146022, 2023.

LAM, S.; SIN, J.; ZENG, H.; LI, H.; LIN, H.; HUANG, L.; LIM, J.; DONG, K. Improved aquaculture wastewater treatment and concomitant power generation in a photoelectrocatalytic fuel cell equipped with S-scheme Fe₂WO₆/ZnO nanorod arrays photoanode and NiFe₂O₄ cathode. **Separation and Purification Technology**, v. 329, n. 125249, 2024.

LLANOS, J.; SIRÉS, I. Sustainable development of electrochemical water treatment: Innovations in materials, processes, and resource recovery. **Current Opinion in Electrochemistry**, v. 50, n. 101646, 2025.

MARTÍNEZ-HUITLE, C.; DOS SANTOS, E. V.; DE ARAÚJO, D. M.; PANIZZA, M. Applicability of diamond electrode/anode to the electrochemical treatment of a real textile effluent. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 674, p. 103-107, 2012.

MARTINEZ-TOPETE, A.; GILBERT, C.; DAPPOZZE, F.; GUILLARD, C.; FOLLI, A.; NAVA-NUÑEZ, M.; DE LA CRUZ, A. M.; CASTELLOTE, M.; JIMENEZ-RELINQUE, E. Photocatalytic inactivation pathways of *E. coli* bacteria using bismuth oxyiodide photocatalysts. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 479, n. 117286, 2026.

MIWA, D. W.; MALPASS, G. R. P.; MACHADO, S. A. S.; MOTHEO, A. J. Electrochemical degradation of carbaryl on oxide electrodes. **Water Research**, v. 40, p. 3281-3289, 2006.

MORA-GÓMEZ, J.; ESCRIBÁ-JIMÉNEZ, S.; CARILLO-ABAD, J.; GARCÍA-GABALDÓN, M.; MONTAÑÉS, M. T.; MESTRE, S.; PÉREZ-HERRANZ, V. Study of the chlorfenvinphos pesticide removal under different anodic materials and different reactor configuration. **Chemosphere**, v. 290, n. 133294, 2022.

MORA-GÓMEZ, J.; GARCÍA-GABALDÓN, M.; ORTEGA, E.; SÁNCHEZ-RIVERA, M.; MESTRE, S.; PÉREZ-HERRANZ, V. Evaluation of new ceramic electrodes based on Sb-doped SnO₂ for the removal of emerging compounds present in wastewater. **Ceramics International**, v. 44, p. 2216-2222, 2018.

PERALTA-HERNÁNDEZ, J. M.; BRILLAS, E. Recent development of electrochemical advanced oxidation processes for pesticide remediation from synthetic waters and real wastewaters:

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

(photo)electrochemical systems, operating variables, and produced oxidizing agentes. **Separation and Purification Technology**, v. 378, n. 134737, 2025.

PERIN, M.; DALLEGRAVE, A.; BARNET, L. S.; MENEGHINI, L. Z.; GOMES, A. A.; PIZZOLATO, T. M. Pharmaceuticals, pesticides and metals/metalloids in Lake Guaíba in Southern Brazil: Spatial and temporal evaluation and a chemometrics approach. **Science of The Total Environmental**, v. 793, n. 148561, 2021.

PIVETTA, R. C.; SILVA, C. R.; RIBEIRO, A. R.; RATH, S. Tracking the occurrence of psychotropic pharmaceuticals in Brazilian wastewater treatment plants and surface water, with assessment of environmental risks. **Science of The Total Environmental**, v. 727, n. 138661, 2020.

RAJPUT, H.; KWON, E. E.; YOUNIS, S. A.; WEON, S.; JEON, T. H.; CHOI, W.; KIM, K. Photoelectrocatalysis as a high-efficiency platform for pulping wastewater treatment and energy production. **Chemical Engineering Journal**, v. 412, n. 128612, 2021.

SAMUEL, H. M.; MECHA, C. A.; KIPCHUMBA, N.; SULIMAN, Z. A. Recent advances in photocatalytic membrane reactors, technological readiness and progress towards industrial scale adoption. **Journal of Water Process Engineering**, v. 80, n. 109172, 2025.

SANDOVAL, M. A.; CALZADILLA, W.; VIDAL, J.; BRILLAS, E.; SALAZAR-GONZÁLEZ, R. Contaminants of emerging concern: Occurrence, analytical techniques, and removal with electrochemical advanced oxidation processes with special emphasis in Latin America. **Environmental Pollution**, v. 345, n. 123397, 2024.

SHAHID, M. K.; KASHIF, A.; FUWAD, A.; CHOI, Y. Current advances in treatment technologies for removal of emerging contaminants from water – A critical review. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 442, n. 213993, 2021.

STARLING, M. C.V. M.; AMORIM, C. C.; LEÃO, M. M. D. Occurrence, control and fate of contaminants of emerging concern in environmental compartments in Brazil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 372, p. 17-36, 2019.

WANG, F.; MO, Y.; SUN, L.; WANG, S.; CUI, S.; WANG, H.; LI, J. Performance deterioration of Sb-SnO₂/C membrane anode treating phenolic wastewater and anode regeneration: Adsorption and physicochemical change of catalysts. **Separation and Purification Technology**, v. 277, n. 119555, 2021.

WU, B.; YANG, M.; YIN, R.; ZHANG, S. Applicability of light sources and the inner filter effect in UV/acetylacetone and UV/H₂O₂ processes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 335, p. 100-107, 2017.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br