

O USO DE BIOCHAR PARA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES EM ÁGUAS CONTAMINADAS

THE USE OF BIOCHAR FOR REMOVAL OF EMERGING CONTAMINANTS IN CONTAMINATED WATER

Adrize Medran Rangel ¹

Eduarda Medran Rangel²

Fernanda Wickboldt Stark³

Patrícia de Borba Pereira ⁴

Fernando Machado Machado⁵

Resumo: Biochar é um produto que vem ganhando destaque no meio científico, sendo sua aplicabilidade em tratamento de ambientes contaminados estudada em todo o mundo. Suas características como rendimento e propriedades variam muito com o tipo de matéria-prima, tecnologia de produção e parâmetros operacionais aplicados. Os contaminantes emergentes são uma preocupação global e precisam de atenção, logo a utilização de biochar para remoção destes contaminantes é uma alternativa viável. O objetivo desta pesquisa é analisar como os autores estão utilizando o biochar para tratamento de águas e efluentes contaminados com contaminantes emergentes. Os artigos foram pesquisa-

-
- 1 UFPel
 - 2 Universidade Federal de Pelotas
 - 3 UFPel
 - 4 UFPel
 - 5 UFPel

dos em base de dados conceituadas, tais como Science Direct e SciElo, após criteriosa análise foram avaliados 15 artigos sobre a temática de estudo. Os pesquisadores e tomadores de decisão trazem em suas pesquisas importantes resultados sobre os caminhos mais eficientes na escolha de matérias-primas para a produção de biochar, implementando tecnologias sustentáveis de produção e apresentando resultados satisfatórios na remoção de contaminantes emergentes. Através dos dados analisados foi possível concluir que o biochar é um material promissor, de baixo custo, alta replicabilidade, que aproveita muitas vezes resíduos sólidos de outros processos produtivos como matéria-prima e remove com eficiência contaminantes emergentes de meios aquosos.

Palavras-Chaves: Adsorção. Biomassa. Contaminantes Emergentes. Degradação.

Abstract: Biochar is a product that has been gaining prominence in the scientific community, and its applicability in the treatment of contaminated environments has been studied all over the world. Its characteristics such as yield and properties vary greatly with the type of raw material, production technology and operational parameters applied. Emerging contaminants are a global concern and need attention, so the use of bugs to remove these contaminants is a viable alternative. The objective of this research is to analyze how the authors are using biochar to treat water and effluents contaminated with emerging contaminants. The articles were searched in reputable databases, such as Science Direct and SciElo, after careful analysis, 15 articles on the subject of study were evaluated. Researchers and decision makers bring important results in their research on the most efficient ways to choose raw materials for biochar production, implementing sustainable production technologies and presenting satisfactory results in the removal of emerging contaminants. Through the data analyzed, it was



possible to conclude that biochar is a promising, low-cost, highly replicable material that often uses solid waste from other production processes as raw material and efficiently removes contaminants emerging from aqueous media.

Keywords: Adsorption. Biomass. Emerging Contaminants. Degradation.

Introdução

As atividades urbanas, industriais e agrícolas são as principais fontes de efluentes e estão diretamente relacionadas aos problemas ambientais devido à grande quantidade de poluentes orgânicos e inorgânicos que incorporam nos corpos hídricos (Xiang et al., 2020). Os contaminantes emergentes (CE), como produtos de higiene pessoal, produtos farmacêuticos, compostos desreguladores endócrinos, fungicidas e pesticidas têm sido comumente usados, o que aumenta a presença de sua descarga não intencional no meio ambiente (Neves et al., 2022). Os antibióticos são um dos contaminantes orgânicos emergentes mais comuns, têm sido amplamente utilizados não apenas para o tratamento de doenças humanas e animais, mas também na aquicultura e na agricultura em grande escala para proteger as plantas contra doenças bacterianas e fúngicas (Pirsaheb, Moradi & Hossini, 2023).

Os pesticidas também se destacam nos contaminantes emergentes, sendo os pesticidas neonicotinóides (uma das classes mais populares de inseticidas em todo o mundo) usados diretamente em várias culturas em mais de 120 países nas últimas décadas, ocupando aproximadamente um quarto do mercado global de agroquímicos, e nos últimos anos o uso em larga escala destes inseticidas juntamente com suas propriedades químicas, resultou na detecção frequente em amostras ambientais e de

alimentos (Shi et al., 2022). Além disso, dos pesticidas que são aplicados às terras agrícolas, apenas 1 a 2% afetam seu objetivo e o restante, cerca de 90 a 95%, entra no solo e na água, o que leva à poluição ambiental e até mesmo coloca seriamente em risco a segurança da vida das pessoas (Liu & Wu, 2022).

Entre os CE estão os microplásticos, há uma grande preocupação ambiental devido os plásticos permanecerem persistentemente no meio ambiente. Por meio da exposição à irradiação ultravioleta (UV) e processos de intemperismo, os plásticos podem se degradar em partículas menores chamadas microplásticos sendo o polietileno, polipropileno, poliestireno, poliéster, acrílico e poliamidas alguns dos tipos de microplásticos comumente abundantes no meio ambiente (Abuwatfa et al., 2021). Os microplásticos são liberados no meio ambiente por vários caminhos diferentes, predominantemente pela atividade humana em residências, indústrias e esgotos (Wang et al., 2021). Cerca de 700.000 fibras microplásticas são liberadas de 6 kg de roupas sintéticas em uma única lavagem (Abuwatfa et al., 2021).

O bisfenol A (BPA) é um desregulador endócrino, considerado CE, encontrado em ambientes aquáticos devido ao seu uso generalizado na produção de policarbonato e resina epóxi, sendo que já foi encontrado no sangue humano, bem como nos tecidos, o que pode ter um efeito prejudicial na saúde humana (Chen et al., 2022).

Biochar é um material derivado de biomassa vegetal ou animal que foi pirolisada em um ambiente com limitação de oxigênio e devido ao seu baixo custo e processo de produção simples, oferece vantagens claras sobre o carvão ativado comercial em muitas questões de gestão ambiental (Han et al., 2022). Os biochars tem sido uma alternativa com grande atividade de adsorção que podem ser utilizados no processo de tratamento de águas e efluentes, pois em comparação com os carvões ativados não renováveis, os biochars são relativamente renováveis, estáveis, ambientalmente sustentáveis

e econômicos devido ao menor custo de produção (Ge et al., 2020).

Os grupos funcionais oxigenados, no biochar, são os principais locais ativos para a remoção de poluentes da água por meio de adsorção interfacial/reação redox, são locais eletroativos para doação de elétrons (por hidroxila) e aceitação (por cetona/quinona), favorecendo a degradação catalítica de poluentes orgânicos e redução de pesados metais (Dai et al., 2021).

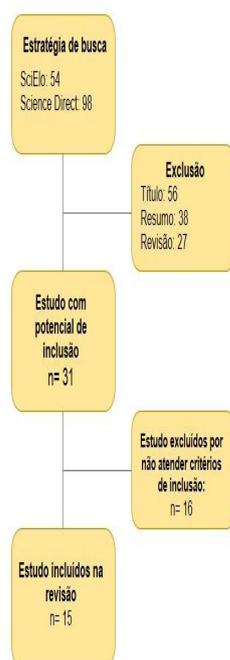
Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é fazer um levantamento bibliográfico sobre a produção de biochar e sua aplicação na remoção de contaminantes emergentes.

Material e Métodos

Esta revisão da literatura foi desenvolvida a partir da avaliação de artigos publicados no período de 2018 até maio de 2023, localizados nas bases eletrônicas: Scientific Electronic Library Online - SciELO e Science Direct. Foram empregados os descritores: “biochar+adsorvente”, “adsorvente orgânico+contaminantes emergentes”, “biochar+compostos emergentes”, e seus respectivos sinônimos, nos idiomas português e inglês. Foram incluídos apenas artigos que tratassem do tema e estivessem disponíveis na forma online. Foram excluídos artigos fora do período proposto, que não tratassem sobre o tema, não disponíveis de forma online, de revisão e artigos repetidos encontrados em diferentes bases de dados. No total foram analisados 15 artigos, estes tratando exatamente do tema desta pesquisa. A figura 1 apresenta a estratégia de busca e inclusão dos artigos selecionados nesta pesquisa, apenas com artigos que utilizaram biochar na remoção de contaminantes emergentes.



Figura 1- Fluxograma de estratégia para a pesquisa.



Fonte: Autores.

Resultados e Discussões

O Biochar recebeu recentemente um reconhecimento considerável como adsorvente ecologicamente correto e econômico, capaz de remover efetivamente contaminantes emergentes perigosos (por exemplo, produtos farmacêuticos, herbicidas e fungicidas) para organismos aquáticos e saúde humana, acumulados em ecossistemas aquáticos (Jaffari et al., 2023). As propriedades únicas do Biochar, como alta área de superfície e porosidade, grupos funcionais, alta capacidade de troca catiônica

e estabilidade, a rapidez e a facilidade de preparação, a natureza ecológica, a reutilização e o custo-benefício tornam este material extremamente atraente para remoção de contaminantes em meios aquosos (Gayathri, Gopinath & Kumar, 2021).

Os CEs estão sendo detectados em vários compartimentos ambientais, incluindo águas superficiais, águas subterrâneas, águas residuais municipais e terras agrícolas (Morin-Crini et al., 2022), logo o Biochar é uma possível solução para minimizar estes problemas ambientais.

O quadro 1 apresenta os autores que serão tratados neste artigo, a matéria-prima utilizada na produção do biochar e o contaminante alvo.

Quadro 1 - Autores tratados neste artigo, matéria-prima utilizada na produção do biochar e contaminante alvo.

Autor(es)	Matéria- prima	Contaminante
Fernandes et al., (2019)	Quercus ilex, Eucalyptus grandis , Pinus pinaster , Quercus suber , Malus pumila , Prunus spinosa , Cydonia oblonga , Eriobotrya japonica , Juglans regia , Actinidia deliciosa , Citrus sinensis e Vitis vinifera	Fluoxetina
Borba et al., (2019)	Casca de pequi	Glifosato
Huang et al., (2020)	Bagaço de bambu Bambu cru Casca de noqueira	Sulfametoxazol Sulfapiridina
Carvalho et al., (2021)	Bagaço de laranja	Tetraciclina

Escudero-Curiel et al., (2021)	Farelo de arroz	Fluoxetina
Marcelino, Cuba e Teran (2021)	Sabugo de milho	Glifosato
Sigh et al.,(2021)	Prosopis juliflora	Nanoplástico
Wang et al.,(2021)	Serragem de pinho	Microplástico
Jacob et al., (2022)	Bagaço da cana-de-açúcar	Clorpirifós
An et al., (2023)	Talo de algodão	Dinotefurano
Jin et al., (2023)	Lodo de ETE	Sulfametoxazol Bisfenol A
Nguyen et al., (2023)	Resíduos de Jardim Lodo de ETE	Substâncias per e polifluoroalquil (PFAS)
Pap, Shearer e Gibb (2023)	Grão usado de cervejaria	Metformina
Sun et al., 2023	Casca de laranja	Bisfenol A
Wang e Wang (2023)	Casca de coco	Sulfametoxazol

Doze diferentes biochars a partir de resíduos florestais e agroalimentares (*Quercus ilex*, *Eucalyptus grandis*, *Pinus pinaster*, *Quercus suber*, *Malus pumila*, *Prunus spinosa*, *Cydonia oblonga*, *Eriobotrya japonica*, *Juglans regia*, *Actinidia deliciosa*, *Citrus sinensis* e *Vitis vinifera*) foram testados para avaliar a eficiência de remoção do composto farmacêutico fluoxetina em soluções aquosas por Fernandes et al., (2019). Com relação aos resultados obtidos nos ensaios preliminares em batelada, constatou-se que os biochar produzidos atingiram uma remoção farmacêutica variando de 36% para pinus a 100% para resíduos de eucalipto. Estas diferenças estão relacionadas com as diferentes características físicas (por exemplo, granulometria, área de superfície específica e distribuição de tamanho de poro) e propriedades químicas (por exemplo, tipo e abundância de grupos funcionais presentes na

superfície do adsorvente) dos biochar preparados.

A capacidade do biochar adsorvente derivado da casca do pequi em remover o glifosato (formulação comercial) em meio aquoso sob três condições de pH (5,5, 7,0 e 8,0) foi o estudo de Borba et al., (2019). O biochar apresentou rendimento médio de $33,1\% \pm 2,66\%$ e elevada quantidade de partículas superficiais de pequenas dimensões, conferindo-lhe elevada área superficial. Os resultados mostraram que a remoção é proporcional ao aumento do pH na faixa de 5,5 a 8,0. As eficiências de remoção para condições de pH de 5,5, 7,0 e 8,0 foram, respectivamente, 35,01%, 35,27% e 49,89%. A adsorção ocorre principalmente em monocamadas, é homogênea e regida pelo modelo de Langmuir. Os resultados para a faixa de pH ácido não se ajustam satisfatoriamente a nenhum dos modelos adotados. Os resultados obtidos sugerem que o adsorvente pode ser utilizado como uma alternativa eficiente e de baixo custo para a adsorção do glifosato presente em formulações comerciais a partir de matrizes aquosas.

No estudo de Huang et al., (2020), experimentos de laboratório foram conduzidos para avaliar o desempenho do biochar moído em esferas na remoção de dois antibióticos sulfonamidas, sulfametoxazol (SMX) e sulfapiridina (SPY) em águas contaminadas. Experimento de sorção aquosa usando biochar puro e moído derivado de bagaço, bambu e lascas de noqueira, feito em três pirólises de temperaturas (300, 450, 600 °C), mostraram que a moagem de bolas melhorou muito a adsorção dos antibióticos. O biochar de lascas de noqueira (450 °C) e o de bambu exibiram a melhor eficiência de remoção para SMX (83,3%) e SPY (89,6%), respectivamente. Uma variedade de grupos funcionais foi produzida durante a moagem de bolas, levando à conclusão de que a adsorção de sulfonamidas no biochar foi controlada por vários mecanismos, incluindo interação hidrofóbica, interação π - π , ligação de hidrogênio e interação eletrostática. Devido à importância da interação eletrostática, a adsorção de

SMX e SPY foi dependente do pH. Assim os autores concluíram que o biochar moído em esferas tem grande potencial para remoção de SMX e SPY em soluções aquosas, incluindo águas contaminadas.

O artigo de Carvalho et al., (2021) estudou a capacidade de remoção da tetraciclina em efluentes utilizando um tratamento terciário à base de biochar de bagaço de laranja. A metodologia foi baseada no estudo das interações com o fármaco e na aplicação em efluentes domésticos. O biochar teve capacidade de adsorção da tetraciclina de 100% em águas residuárias domésticas e a eficiência da filtração com biochar foi em média 25% maior do que com o carvão comercial. Diante do exposto conclui-se a possibilidade de conversão de um resíduo da agroindústria de baixo valor e sem destinação apropriada, em um produto de valor agregado, o biochar do bagaço da laranja, a ser utilizado como tratamento terciário para o reuso de efluentes na irrigação de culturas e como adsorvente para remoção da tetraciclina em águas residuárias domésticas.

Uma eco-abordagem para a remoção de produtos farmacêuticos do meio aquoso foi desenvolvida por Escudero-Curiel et al., (2021) sob os princípios da economia circular. Portanto, um adsorvente ecológico, biochar, foi sintetizado pela valorização termoquímica de resíduos da produção de arroz. O farelo de arroz foi pirolisado em diferentes temperaturas (300–750°C) e um pós-tratamento térmico foi avaliado com o objetivo de investigar seu impacto nas características e composição química dos biochars. Os biochars obtidos foram testados para a remoção de um poluente alvo modelo, fluoxetina (FLX), e o processo de adsorção do biochar foi caracterizado em detalhes. O biochar obtido após o processo de pirólise a 500°C e pós-tratamento em autoclave (BC500A) obteve a maior remoção de poluentes (92,6%). Depois disso, a regeneração desse adsorvente ecológico foi avaliada por um processo inovador do tipo eletro-Fenton usando peroximonossulfato (PMS) como agente oxidante. Até onde sabemos, esta é a primeira tentativa de regenerar biochar usando esta tecnologia combinada.

A regeneração do biochar foi efetivamente realizada nas condições ideais (150 mA, 75/1 PMS/FLX e 0,15 mM de ácido cítrico). Nenhuma adição externa de Fe foi necessária porque o teor de metal no biochar era suficiente para que a reação ocorresse. Por fim, foram realizados 5 ciclos de adsorção-regeneração demonstrando a viabilidade do sistema desenvolvido. Assim, a abordagem proposta enquadra-se nos princípios da economia circular, pois conseguiu-se a remoção global de poluentes e a valorização dos resíduos.

Um biochar de sabugo de milho ativado com ácido fosfórico (BCA) foi produzido por Marcelino, Cuba e Teran (2021), onde os autores avaliaram seu potencial para remoção do herbicida glifosato — GLF (formulação comercial) em meio aquoso. O efeito do pH inicial e da massa de adsorvente foi avaliado. Os resultados obtidos demonstraram que a adsorção de GLF no BCA foi dependente da temperatura, da massa de adsorvente e do pH do meio, com a melhor condição de ensaio caracterizada por 63°C, 0,25 g de BCA e pH=7, resultando em boa eficiência de remoção (62,67%), porém com baixa capacidade de adsorção (2,67 mg.g⁻¹). A cinética de adsorção foi representada pelo modelo de pseudo segunda ordem e considerada rápida, sendo necessários 15 min para atingir 98% da capacidade máxima de adsorção. Os resultados apresentados confirmam que o BCA de sabugo de milho é um adsorvente capaz de remover GLF (formulação comercial) do meio aquoso.

O estudo de Singh et al., (2021) modificou a superfície do biochar semeando nanopartículas de ferro em sua superfície. O adsorvente (biochar ecológico) modificado com ferro exibiu qualidades magnéticas e de superfície aprimoradas. Os pesquisadores testaram o novo adsorvente na remoção de nanoplásticos em diferentes condições de pH e concluíram que o pH da solução não teve efeitos substanciais na eficiência de remoção. Além disso, uma eficiência de remoção de aproximadamente 100% foi alcançada usando o biochar modificado com ferro, em comparação com a eficiência de remoção de

75% usando o biochar bruto. O estudo propôs que os processos de adsorção fossem controlados por meio de complexação de superfície e interações eletrostáticas entre os nanoplásticos e as nanopartículas. A regeneração do adsorvente por separação de nanoplásticos e partículas de biochar modificadas com ferro foi alcançada com sucesso. Após a regeneração e reutilização do novo adsorvente, a capacidade de adsorção foi mantida, tornando-o reciclável. O experimento também conseguiu a remoção com baixo custo operacional e baixo consumo de energia, tornando-se assim uma técnica de remoção promissora na indústria.

O estudo experimental de Wang et al., (2021) investigou a remoção de microplásticos usando adsorventes magnéticos de biochar modificados com magnésio/zinco (Mg/Zn-MBCs). Eficiências de remoção de microesferas de poliestireno de uma solução aquosa de 98,8%, 99,5% e 94,8% foram alcançadas, ao adsorver usando Mg-MBC, Zn-MBC e MBC, respectivamente. O estudo também analisou as possibilidades de reciclagem dos adsorventes, através de um tratamento térmico simultâneo para regenerar os adsorventes e degradar os microplásticos adsorvidos. Após cinco ciclos de adsorção e regeneração, altas eficiências de remoção usando o Mg-MBC, Zn-MBC e MBC para 94,6%, 95,8% e 95,0%, respectivamente, foram mantidas.

O uso de biochar a partir do bagaço de cana-de-açúcar para remoção de pesticidas foi o estudo de Jacob et al., (2022). Os autores investigaram a remoção de clorpirifós de sistemas aquosos usando um adsorvente composto preparado a partir de biochar derivado do bagaço de cana-de-açúcar e encapsulado em alginato. Os estudos em lote foram conduzidos para examinar o efeito do tempo de contato, pH inicial, concentração inicial de adsorvato, dosagem de sorvente e temperatura na extensão da remoção de clorpirifós por grânulos de alginato de biochar. O material proposto mostrou 86% de remoção de clorpirifós sob condições otimizadas. A capacidade de adsorção encontrada foi de 6,25

mg g⁻¹ para pH 10 na concentração de 10 ppm de clorpirifós. A adsorção de clorpirifós em grânulos de biochar mostrou-se exotérmica com o tipo de adsorção sendo fisissorção.

Neste estudo, An et al., (2023) desenvolveram biochar-gC-MgO, utilizando talo de algodão, com aplicação bifuncional para minimizar a toxicidade da água e a eutrofização. Os resultados mostram que a capacidade de adsorção de fósforo do compósito BC-gC-MgO atinge 111,0 mg·g⁻¹, e sua taxa de degradação do dinotefurano atinge 80,1% em 260 min. O biochar existente em BC-gC₃N₄-MgO serve como transportador de carga com boa condutividade, o que promove a transferência fluente de portadores de carga fotogerados.

A adsorção simultânea de dois poluentes emergentes típicos, sulfametoxazol (SMX) e bisfenol A (BPA), em biochar magnético (MBC-1) foi investigada por Jin et al., (2023). Os resultados mostraram que a modificação com cloreto férrico otimizou as propriedades de superfície do biochar (aromaticidade, hidrofobicidade, e grupos funcionais contendo oxigênio, etc.) e ajudaram a remover SMX e BPA por meio de várias interações. Os resultados da caracterização mostraram que a área superficial específica, grupos funcionais contendo oxigênio, hidrofobicidade e aromaticidade do biochar modificado por ferro aumentaram significativamente, podendo aumentar a taxa de remoção de SMX de 73,86% para 94,06%. A capacidade de adsorção em equilíbrio dos dois adsorventes foi inibida pela adsorção competitiva nos sistemas de soluto misto, devido ao mesmo mecanismo de adsorção. Quando pH=7, a adsorção de SMX e BPA envolveu principalmente preenchimento de poros, efeito hidrofóbico, π - π EDA e pontes de hidrogênio, além disso, a força eletrostática, a coordenação de superfície e a troca iônica também estão relacionadas à adsorção de SMX e BPA. O BPA ocupou preferencialmente locais de alta energia no sistema de coadsorção, como interação π - π EDA, troca iônica e coordenação de superfície. Ao mesmo tempo, o SMX tendeu a ser removido por interação



hidrofóbica e ligações de hidrogênio.

A remoção de de ácido perfluorooctanóico (PFOA), perfluorooctano sulfonato (PFOS), perfluorohexano sulfonato (PFHxS) usando lodo de tratamento de água e biochar foi o objeto de estudo de Nguyen et al., (2023). Os autores produziram dois biochars utilizando resíduos de jardim (CB) e lodo de uma estação de tratamento de efluentes (ETE) (BB). A adsorção usando amostras de biochar mostrou que a área de superfície e a hidrofobicidade foram vistas como propriedades-chave que influenciam a adsorção de substâncias per e polifluoroalquil (PFAS). O biochar CB superou o biochar BB com 88,06% a 100% de adsorção de PFAS no experimento de adsorção único e 59.09–100% no experimento de adsorção múltipla de PFAS. Os autores concluíram que o biochar BB foi o melhor de todos os materiais testados na remoção das PFAS.

Um biochar magnético (MBSG) preparado a partir de resíduos de cervejaria foi aplicado por Pap, Shearer e Gibb (2023), para a remoção da biguanida metformina (MF) da água. Estudos de otimização mostraram que MBSG remove MF em concentrações ambientalmente relevantes rapidamente (< 3 h) e com eficiência $\geq 95\%$ (0,1 mg/L e 5 g/L) com uma capacidade máxima de adsorção de 15,2 mg/g (300 mg/L e 5g/L). A caracterização instrumental revelou que os mecanismos de adsorção de MF incluíam preenchimento de poros, atração eletrostática, as chamadas interações π - π EDA e ligações de hidrogênio como mecanismos predominantes. Os resultados contribuem para a compreensão e otimização dos parâmetros mais influentes (pH, tempo de contato, custo, etc) na otimização da eficiência de adsorção, assim, aumentando a utilidade e o potencial quando utilizado em Estações de Tratamento de Esgoto. No geral, este trabalho apóia o potencial de utilizar materiais residuais abundantes para desenvolver biochars magnetizados para aplicação no tratamento sustentável de águas contaminadas.



Sun et al., (2023) prepararam um biochar de casca de laranja modificado com o bimetálico Fe-Cu (FeCu/OPB-1) por carbonização em uma etapa para ativar o peroximonossulfato (PMS) com a intenção de remover o bisfenol A (BPA). Sob as condições ([catalisador] = 0,3 g/L, [PMS] = 0,1 g/L, pH = 5,2–9,0, T = 30°C), houve 90% da remoção de BPA e 70% da mineralização. O uso de HCO₃⁻ melhorou significativamente a degradação do BPA pois reduz a lixiviação de íons metálicos. No geral, um excelente desempenho catalítico e a estabilidade de FeCu/OPB-1 revelaram o potencial dessa abordagem no tratamento de poluentes orgânicos.

A produção de biochar bimetálico e co-dopado com nitrogênio com ativação de peroximonossulfato (PMS) para degradar contaminantes emergentes foi o estudo de Wang e Wang (2023). Comparando o biochar dopado com um único metal ao biochar dopado com bimetálicos, foi possível observar uma atividade catalítica muito maior. O biochar co-dopado com ferro e cobalto (FeCo-BC) exibiu maior atividade catalítica do que o biochar co-dopado com ferro e cobre (FeCu-BC). Quando o FeCo-BC foi usado para a ativação do PMS, o contaminante alvo sulfametoxazol (SMX), pode ser completamente removido em 10 min, com uma taxa de degradação de 0,749 min⁻¹, que foi 2,3 e 69,4 vezes maior que a do Fe-BC (0,333 min⁻¹) e Co-BC (0,0108 min⁻¹), respectivamente, demonstrando o efeito sinérgico da codopagem bimetálica. A adição de PMS aumentou significativamente a eficiência de remoção de SMX atingindo 94,0%, 92,1% e 100%, respectivamente para Fe-BC, Co-BC e FeCo-BC. Em cinco experimentos consecutivos, FeCo-BC apresentou boa atividade catalítica e estabilidade, sugerindo um catalisador altamente eficiente e estável, que pode ser usado na reação do tipo Fenton para remover os contaminantes orgânicos emergentes.

Conclusão

Devido aos impactos ambientais negativos que os contaminantes emergentes vem causando no meio ambiente e a necessidade de materiais de baixo custo e alto desempenho procuramos trazer as aplicações do bichar nesta temática, sendo este um material adsorvente promissor. Várias pesquisas apresentam modificação química, modificação física e outros métodos para a produção e uso do biochar. Diferentes tecnologias (ou seja, pirólise lenta, pirólise rápida, pirólise intermediária, torrefação, micro-ondas, gaseificação, carbonização instantânea, e carbonização hidrotérmica) foram utilizados para a produção dos biochars citados neste artigo. Em seguida, foram destacadas as matérias-primas de biomassa adequadas que podem ser fornecidas a essas tecnologias e as condições práticas de operação para cada sistema. Vários CE poderam ser citados como alvo de remoção dos pesquisadores, desde fármacos, agrotóxicos, microplásticos, etc., mostrando o grande potencial deste material adsorvente.

O biochar é um material versátil, eficiente e com fácil replicabilidade para aplicação ambiental na remoção de contaminantes emergentes.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CAPES pelo apoio financeiro e bolsas de estudos. Os autores também agradecem a FAPERGS pelo apoio financeiro.

Referências

Abuwatfa, W. H., Al-Muqbel, D., Al-Othman, A., Halalsheh, N., Tawalbeh, M. (2021). Insights into the removal of microplastics from water using biochar in the era of COVID-19: a mini review. *Case Studies In Chemical And Environmental Engineering*, 4, 100151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cs-cee.2021.100151>.

An, X., Xu, X., Guo, W., Chen, Z., Miao, Z., Yuan, J., Wu, Z. (2023). Bi-functional biochar-g-C₃N₄-MgO composites for simultaneously minimizing pollution□Photocatalytic degradation of pesticide and phosphorus recovery as slow-release fertilizer. *Journal of Environmental Management*, 344, 118489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118489>.

Borba, L. L., Cuba, R. M. F., Terán, F. J. C., Castro, M. N., Mendes, T. A. (2019). Use of Adsorbent Biochar from Pequi (Caryocar Brasiliense) Husks for the Removal of Commercial Formulation of Glyphosate from Aqueous Media. *Brazilian Archives Of Biology And Technology*, 62, 1. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-2019180450>.

Carvalho, R. S., Arguelho, M. L. P. M., Faccioli, G. G., Oliveira, R. A., Passos, E. S., Silva, A. V., Santos, B.F. S. (2021). Utilização do biocarvão de bagaço de laranja na remoção de tetraciclina em água residuária. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 26(2), 1. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210002.1280>.

Chen, W., He, D., Huang, J., Zhu, K., Leei, L., He, H., Ai, Y. (2022). One-step synthesis of novel Fe/Fe₃O₄ embedded in N-doped graphite-like carbon nanosheets with the entangled CNTs to activate peroxydisulfate for bisphenol a degradation. *Separation And Purification Technology*, 295, 121172.: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121172>.

Dai, L., Lu, Q., Zhou, H., Shen, F., Liu, Z., Zhu, W., Huang, H. (2021). Tuning oxygenated functional groups on biochar for water pollution control: a critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126547. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126547>.

Escudero-Curiel, S., Acevedo-García, V., Sanromán, M^a Á., Pazos, M. (2021) Eco-approach for phar-

maceutical removal: thermochemical waste valorisation, biochar adsorption and electro-assisted regeneration. *Electrochimica Acta*, 389, 138694. <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138694>.

Fernandes, M. J., Moreira, M. M., Paíga, P., Dias, D., Bernardo, M., Carvalho, M., Lapa, N., Fonseca, I., Morais, S., Figueiredo, S. (2019) Evaluation of the adsorption potential of biochars prepared from forest and agri-food wastes for the removal of fluoxetine. *Bioresource Technology*, 292, 121973. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121973>.

Gayathri, R., Gopinath, K.P., Kumar, P. Senthil. (2021). Adsorptive separation of toxic metals from aquatic environment using agro waste biochar: application in electroplating industrial wastewater. *Chemosphere*, 262, 128031. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128031>.

Ge, Y., Zhu, S., Chang, J., Jin, C., Ho, S. (2020). Immobilization of Hg(II) on high-salinity *Spirulina* residue-induced biochar from aqueous solutions: sorption and transformation mechanisms by the dual-mode isotherms. *Environmental Pollution*, 265, 115087. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115087>.

Han, H., Buss, W., Zheng, Y., Song, P., Rafiq, M. K., Liu, P., Małek, O., Li, X. (2022). Contaminants in biochar and suggested mitigation measures – a review. *Chemical Engineering Journal*, 429, 132287. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2021.132287>.

Huang, J., Zimmerman, A. R., Chen, H., Gao, B. (2020). Ball milled biochar effectively removes sulfamethoxazole and sulfapyridine antibiotics from water and wastewater. *Environmental Pollution*, 258, 113809. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113809>.

Jacob, M. M., Ponnuchamy, M., Kapoor, A., Sivaraman, P. (2022). Adsorptive decontamination of organophosphate pesticide chlorpyrifos from aqueous systems using bagasse-derived biochar alginate beads: thermodynamic, equilibrium, and kinetic studies. *Chemical Engineering Research And Design*, 186, 241-251. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2022.07.043>.



Jaffari, Z. H., Jeong, H., Shin, J., Kwak, J., Son, E., Lee, Yo., Kim, S., Chon, K., Cho, K. H. (2023). Machine-learning-based prediction and optimization of emerging contaminants' adsorption capacity on biochar materials. *Chemical Engineering Journal*, 466, 143073. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2023.143073>.

Jin, R., Zhao, C., Song, Y., Qiu, X., Li, C., Zhao, Y. (2023). Competitive adsorption of sulfamethoxazole and bisphenol A on magnetic biochar: mechanism and site energy distribution. *Environmental Pollution*, 329, 121662. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121662>.

Liu, T., Wu, G. (2021). Does agricultural cooperative membership help reduce the overuse of chemical fertilizers and pesticides? Evidence from rural China. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 5, 7972-7983. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-16277-0>.

Marcelino, N. V. A., Cuba, R. M. F., Teran, F. J. C. (2021). Reaproveitamento de sabugo de milho para potencial remoção de formulação comercial de glifosato em fase aquosa pela técnica de adsorção. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 26 (4) 669-681. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220200088>.

Morin-crini, N., Lichtfouse, E., Fourmentin, M., Ribeiro, A. R. L., Noutsopoulos, E., Mapelli, F., Fenyvesi, É., Vieira, M. G. A., Picos-Corrales, L. A., Moreno-Piraján, J. C. (2022). Removal of emerging contaminants from wastewater using advanced treatments. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(2), 1333-1375. <http://dx.doi.org/10.1007/s10311-021-01379-5>.

Neves, T. F., Camparotto, N. G., Rodrigues, E. A., Mastelaro, V. R., Dantas, R. F., Prediger, P. (2022). New graphene oxide-safranin modified@polyacrylonitrile membranes for removal of emerging contaminants: the role of chemical and morphological features. *Chemical Engineering Journal*, 446, 137176. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2022.137176>.

Nguyen, M. D., Sivaram, A. K., Megharaj, M., Webb, L., Adhikari, S., Thomas, M., Surapaneni, A.,

Moon, E. M., Milne, N. A. (2023). Investigation on removal of perfluorooctanoic acid (PFOA), perfluorooctane sulfonate (PFOS), perfluorohexane sulfonate (PFHxS) using water treatment sludge and biochar. *Chemosphere*, 338, 139412. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139412>.

Pap, S., Shearer, L., Gibb, S. W. (2023). Effective removal of metformin from water using an iron-biochar composite: mechanistic studies and performance optimisation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110360. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2023.110360>.

Pirsaheb, M., Moradi, N., Hossini, H. (2023). Sonochemical processes for antibiotics removal from water and wastewater: a systematic review. *Chemical Engineering Research and Design*, 189, 401-439. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2022.11.019>.

Singh, N., Khandelwal, N., Ganie, Z. A., Tiwari, E., Darbha, G. K. (2021). Eco-friendly magnetic biochar: an effective trap for nanoplastics of varying surface functionality and size in the aqueous environment. *Chemical Engineering Journal*, 418, 129405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2021.129405>.

Shi, Y., Wang, S., Xu, M., Yan, X., Huang, J., Wang, H. (2022). Removal of neonicotinoid pesticides by adsorption on modified *Tenebrio molitor* frass biochar: kinetics and mechanism. *Separation and Purification Technology*, 297, 121506. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121506>.

Sun, J., Zhang, D., Xia, D., Li, Q. (2023). Orange peels biochar doping with Fe-Cu bimetal for PMS activation on the degradation of bisphenol A: a synergy of so_4 , oh , $1o_2$ and electron transfer. *Chemical Engineering Journal*, 471, 144832. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2023.144832>.

Wang, J., Sun, C., Huang, Q., Chi, Y., Yan, J. (2021). Adsorption and thermal degradation of microplastics from aqueous solutions by Mg/Zn modified magnetic biochars. *Journal Of Hazardous Materials*, 419, 126486. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126486>.

Wang, S. & Wang, J. (2023). Bimetallic and nitrogen co-doped biochar for peroxydisulfate (PMS)

activation to degrade emerging contaminants. *Separation And Purification Technology*, 307, 122807. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122807>.

Xiang, W., Zhang, X., Chen, J., Zou, W., He, F., Hu, X., Tsang, D.C.W., Ok, Y. S., Gao, B. (2020). Biochar technology in wastewater treatment: a critical review. *Chemosphere*, 252, 126539. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126539>.

