

Adsorção de poluentes em águas residuárias utilizando biocarvão: revisão sistemática

Adsorption of pollutants in wastewater using biochar: a systematic review

Adsorción de contaminantes en aguas residuales usando biocarbón: revisión sistemática

Recebido: 28/03/2023 | Revisado: 10/04/2023 | Aceitado: 11/04/2023 | Publicado: 16/04/2023

Andriele Rodrigues de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9547-8370>

Universidade Federal de Sergipe, Brasil

E-mail: anndrieelli@yahoo.com.br

Táisa Andrade Barbosa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2159-6101>

Universidade Federal de Sergipe, Brasil

E-mail: taisacivil@gmail.com

Luciana Coêlho Mendonça

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6979-8135>

Universidade Federal de Sergipe, Brasil

E-mail: lumendon@academico.ufs.br

Resumo

A adsorção tem sido utilizada no tratamento de efluentes para a remoção de poluentes visto que apresenta baixo custo, necessita de pouco espaço e é simples de operar. Ao utilizar biocarvão como material adsorvente, o processo se torna mais sustentável por possibilitar a reciclagem de resíduos orgânicos (pirólise). Este estudo objetivou investigar publicações acerca da utilização de biocarvão como adsorvente em águas residuárias, a fim de verificar sua eficiência, parâmetros de aplicação e lacunas de pesquisa. Uma análise quantitativa foi realizada de forma atemporal, com a categorização dos artigos segundo o tipo do poluente, ano e local de realização do experimento. Qualitativamente, analisou-se características como pH, temperatura da adsorção, temperatura de pirólise, matéria-prima e ativação do biocarvão, cinética e isotermas de adsorção, eficiência de remoção e capacidade de adsorção. Observou-se que os estudos ainda são recentes, realizados em pequena escala e as pesquisas mostraram grande preocupação com a remoção de micropoluentes emergentes. A temperatura de pirólise mais utilizada estava entre 400°C e 800°C e a adsorção aumentou com o aumento da temperatura do processo em até 45° C. As matérias-primas utilizadas para produção do biocarvão se mostraram diversificadas e, geralmente, os estudos utilizaram matérias-primas disponíveis na região do estudo. Além disso, o biocarvão apresentou maiores eficiências quando ativado. O modelo cinético de pseudo segunda-ordem e a isoterma de Langmuir foram as que melhor se ajustaram à maioria dos experimentos. Finalmente, identificou-se lacunas relacionadas aos aspectos econômicos, processos de regeneração e descarte do biocarvão, e eficácia com efluentes não sintéticos.

Palavras-chave: Biochar; Filtração; Esgoto; Contaminantes.

Abstract

Adsorption has been used in the treatment of wastewater for the removal of pollutants and has a low cost, requires low space for implementation and is simple to operate. When using biochar as an adsorbent material, adsorption becomes more sustainable, as it allows recycling of organic waste. This study aimed to investigate literature on the use of biochar as a pollutant adsorbent in wastewater, in order to verify its efficiency, application parameters and research gaps. Quantitative analysis was carried out, with articles' categorization according to type of pollutant, year, and location of experiments. Therefore, qualitative aspects were analysed, such as pH, adsorption temperature, pyrolysis temperature, raw material and biochar activation, adsorption kinetics and isotherms, removal efficiency and adsorption capacity. It was observed that the studies are still recent, carried out in small scale and that researchers were typically concerned with the removal of emerging micropollutants. The most adopted pyrolysis temperature was between 400°C and 800°C and adsorption enhanced with increasing temperature by up to 45°C. The raw materials used were diverse and they were usually available in the study region. Moreover, biochar showed greater efficiencies

when activated. The pseudo second order kinetic model and the Langmuir isotherm were the ones that best fit most of the experiments. Finally, research gaps were identified concerning economic aspects, regeneration and discharge processes of biochar, and efficiency with non-synthetic effluents.

Keywords: Biochar; Filtration; Sewage; Contaminants.

Resumen

La adsorción se ha utilizado en el tratamiento de efluentes para la remoción de contaminantes ya que tiene un bajo costo, requiere poco espacio y es simple de operar. Al utilizar biocarbón como material adsorbente, el proceso se vuelve más sostenible al permitir el reciclaje de residuos orgánicos (pirólisis). Este estudio tuvo como objetivo investigar publicaciones sobre el uso de biocarbón como adsorbente en aguas residuales, con el fin de verificar su eficiencia, parámetros de aplicación y vacíos de investigación. Se realizó un análisis cuantitativo de manera atemporal, con la categorización de los artículos según el tipo de contaminante, año y lugar donde se realizó el experimento. Cualitativamente, se analizaron características tales como pH, temperatura de adsorción, temperatura de pirólisis, activación de materia prima y biocarbón, cinéticas e isothermas de adsorción, eficiencia de remoción y capacidad de adsorción. Se observó que los estudios aún son recientes, realizados en pequeña escala y las investigaciones mostraron gran preocupación con la remoción de microcontaminantes emergentes. La temperatura de pirólisis más utilizada fue entre 400°C y 800°C y la adsorción aumentó con el aumento de la temperatura del proceso hasta 45°C. Las materias primas utilizadas para la producción de biocarbón resultaron ser diversificadas y, en general, los estudios utilizaron materias primas disponibles en la región del estudio. Además, el biocarbón mostró mayores eficiencias cuando se activó. El modelo cinético de pseudo segundo orden y la isoterma de Langmuir fueron los que mejor se ajustaron a la mayoría de los experimentos. Finalmente, se identificaron vacíos relacionados con aspectos económicos, procesos de regeneración y disposición de biocarbón y efectividad con efluentes no sintéticos.

Palabras clave: Biochar; Filtración; Aguas negras; Contaminantes.

1. Introdução

O elevado crescimento populacional aliado à cultura do consumo exacerbado de produtos industrializados e de medicamentos, além do descarte inadequado de efluentes são desafios para o alcance do sexto item da lista de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas: garantia do acesso universal e seguro à água potável e ao saneamento.

Segundo dados da UNICEF (Fundo das Nações Unidas para a Infância), da OMS (Organização Mundial de Saúde) e da Organização das Nações Unidas (ONU, 2020; UNICEF, 2019), uma a cada três pessoas não têm acesso à água potável e mais da metade da população mundial não tem acesso à esgoto tratado. Além disso, pesquisas já identificaram o aumento da taxa de poluentes resistentes aos tratamentos convencionais de esgoto, como por exemplo, fármacos, produtos de uso pessoal, corantes, herbicidas, metais e demais compostos químicos (Aquino et al., 2013; Komolafe et al., 2021).

Ainda existem poucos estudos acerca da influência desses compostos presentes na água para a saúde humana, principalmente em países de baixa renda (Xu et al., 2022a). Entretanto, pesquisas já identificaram efeitos nocivos como desregulação endócrina e feminização de espécies aquáticas submetidas a altas taxas de micropoluentes (Späth et al., 2021). Nesse contexto, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de técnicas no tratamento de águas residuárias e o uso de materiais que sejam eficientes, econômicos e sustentáveis.

A adsorção surge como alternativa de tratamento físico-químico, geralmente após o tratamento terciário, para remover compostos químicos orgânicos e inorgânicos que não foram removidos pelos tratamentos convencionais, e com isso, melhorar a qualidade do efluente a ser lançado nos cursos hídricos. Estudos indicam que dentre as técnicas existentes para remoção de poluentes como biodegradação, oxidação química, osmose reversa, processos com cloração e filtração por membrana, a adsorção é a mais utilizada devido ao seu baixo custo, alta eficiência, pequena área de implantação e simplicidade de operação (Xu et al., 2022a).

A adsorção de poluente é comumente realizada com carvão ativado como adsorvente. Porém, pesquisas têm avaliado o potencial do biocarvão como meio filtrante devido ao seu baixo custo comparado ao carvão ativado. Mesmo após o processo de ativação, o biocarvão é mais econômico que o carvão ativado (Shi et al., 2020; Zhang et al., 2022) e pode atingir eficiência maior ou similar (Zhang et al., 2022). Além da vantagem econômica, o biocarvão é considerado um material carbonáceo ecologicamente correto pois é produzido a partir da pirólise de vários resíduos sólidos em altas temperaturas sob condições limitadas a oxigênio (Shang et al., 2020; Yu et al., 2017).

Portanto, este estudo teve como objetivo investigar as publicações acerca do tratamento de água residuária utilizando biocarvão, através da revisão sistemática, a fim de: (1) verificar quais os principais tratamentos de água residuária utilizam biocarvão para remoção de contaminantes; (2) analisar a eficiência do biocarvão na adsorção de poluentes; (3) identificar as semelhanças dos estudos de caso e (4) o porquê das mesmas; além de (5) observar o panorama geral do estudo da adsorção de poluentes em águas residuárias com biocarvão e; (6) detectar as possíveis lacunas de pesquisa.

2. Metodologia

Segundo Ercole et al. (2014), a revisão sistemática é uma síntese rigorosa de todas as pesquisas relacionadas a uma questão/pergunta específica sobre causa, diagnóstico e prognóstico de um problema, e frequentemente envolve a eficácia de uma intervenção para a solução desse problema. Esse estudo utilizou uma abordagem sistemática objetivando responder a seguinte questão de pesquisa: de que forma e com que eficiência o biocarvão pode ser utilizado como meio filtrante no tratamento de águas residuárias?

A pesquisa sistemática sobre o assunto foi realizada pelo Portal Periódicos CAPES (Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), por meio do acesso liberado para discentes da Universidade Federal de Sergipe (UFS) pela Comunidade Acadêmica Federada (CAFe). Desse modo, foi possível acessar a base de dados Scopus e Scielo. Para esta revisão, apenas artigos científicos foram utilizados como referência, sendo que os artigos científicos na forma de revisão sistemática não foram considerados, pois objetivou-se analisar e discutir os resultados obtidos apenas de estudos de casos.

As palavras chaves utilizadas foram “biochar”, “adsorption”, “wastewater”, e “sewage”, considerando-se apenas o título dos artigos para limitar a busca. A fim de melhor restringir a busca na base de dados Scopus e Scielo, foram utilizados operadores booleanos “AND” e “OR”, escritos da seguinte forma: biochar AND adsorption AND (wastewater OR sewage). Preferiu-se utilizar as palavras em inglês para abranger na busca publicações nacionais e internacionais. Não foi utilizada nenhuma restrição de busca como localidade ou temporalidade pois visou-se entender de que forma o biocarvão estava sendo utilizado na filtração de águas residuárias ao redor do mundo. A triagem dos artigos foi realizada através da leitura dos resumos, de modo que os artigos que não abordaram o tema “Filtração de poluentes com biocarvão em águas residuárias” foram desconsiderados, como por exemplo, artigos que abordavam tipos de tratamento de águas residuárias diferentes da filtração ou da adsorção.

À medida que os artigos foram encontrados, foi realizada uma categorização, levando em consideração o tipo do material filtrado, o ano e o local de publicação, respectivamente, a fim de observar o panorama geral do perfil desses artigos. Os poluentes identificados nos estudos de caso foram categorizados em: micropoluentes emergentes, metais, nutrientes, matéria orgânica, odores, fenóis, bactérias, sais e gases.

Após essa categorização inicial, foi possível perceber que algumas propriedades dos materiais adsorventes e adsorbatos, bem como as características da reação, influenciavam a eficiência da adsorção de forma significativa (Ambaye et al., 2021). Logo, foi realizada uma leitura criteriosa observando aspectos como: matéria-prima do biocarvão, adição de

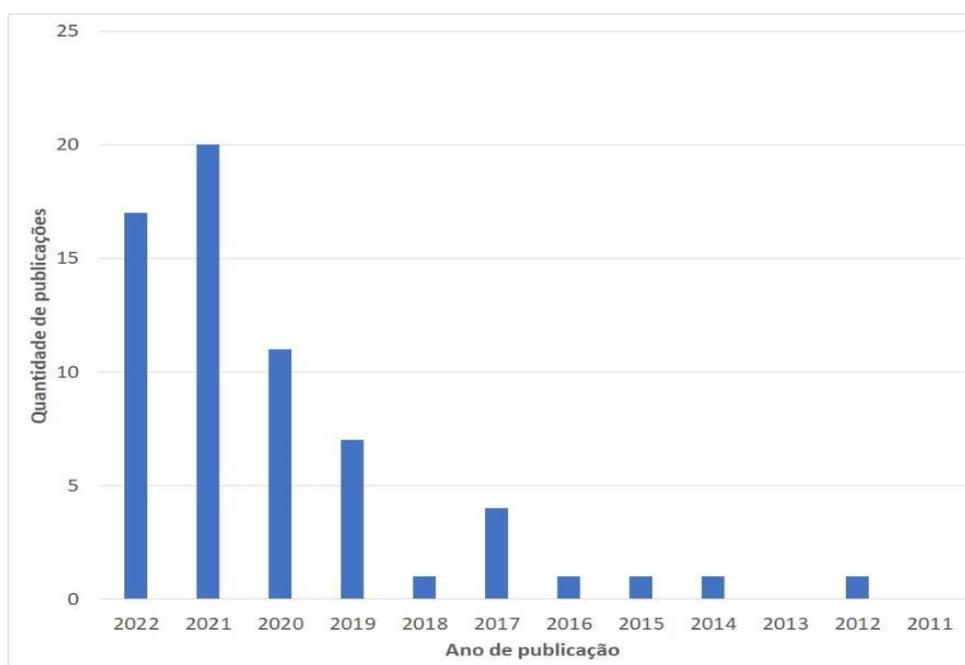
modificadores do biocarvão, temperatura de pirólise, mecanismos de adsorção, tempo médio de equilíbrio, pH da solução, modelo isotérmico e cinético mais adequado, capacidade de adsorção, eficiência de remoção do poluente e o tipo de água residuária sendo tratada. Em seguida, foi feita uma avaliação qualitativa a fim de identificar os artigos que possuíam abordagens similares.

3. Resultados

3.1 Aspectos gerais

Ao todo foram encontrados 116 artigos, sendo 115 na plataforma Scopus e 1 na plataforma Scielo. Desses 116 estudos, apenas 63 foram analisados, pois 8 eram revisões, 35 não abordavam a temática desta revisão e 10 não estavam disponíveis gratuitamente, mesmo com o acesso através da UFS. Conforme ilustra a Figura 1, os artigos analisados nesta revisão foram publicados entre 2012 e 2022, sendo que o número de publicações aumentou significativamente a partir de 2020 para 2021.

Figura 1 - Número de artigos encontrados, por ano de publicação.

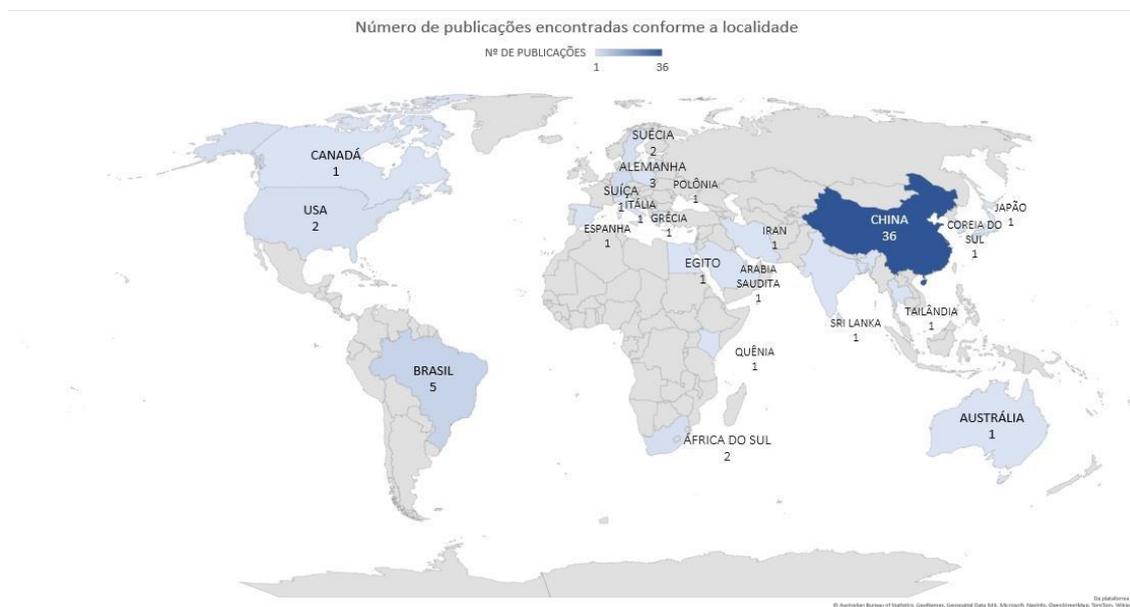


Fonte: Autores (2023).

De forma geral, como os estudos de caso são recentes, a maioria dos experimentos se encontra ainda em fase inicial, realizados em bancada e com efluente artificial. Dos 63 artigos analisados, apenas 18 utilizaram água residual real para os experimentos, com origens diversificadas como por exemplo: efluentes de pirólise (Caprariis et al., 2017), efluentes de coque (Shi et al., 2020), efluente da produção de gás de xisto (Shang et al., 2020), efluente de abatedouro (Konneh et al., 2021), lodo fecal bruto e efluente de esgoto (Mamera et al., 2022), efluente de ETE (Dalahmeh et al., 2018), efluente agrícola (Hu et al., 2022), efluente industrial de galvanoplastia de liga de Zn-Ni (Wang et al., 2020) e efluente de curtume (Hashem et al., 2020).

A Figura 2 apresenta a quantidade de artigos encontrada de acordo com o país onde foi realizado o experimento. A China foi o país com mais publicações, com 36 das 63 publicações analisadas neste artigo, enquanto esse número diminuiu significativamente em outros países.

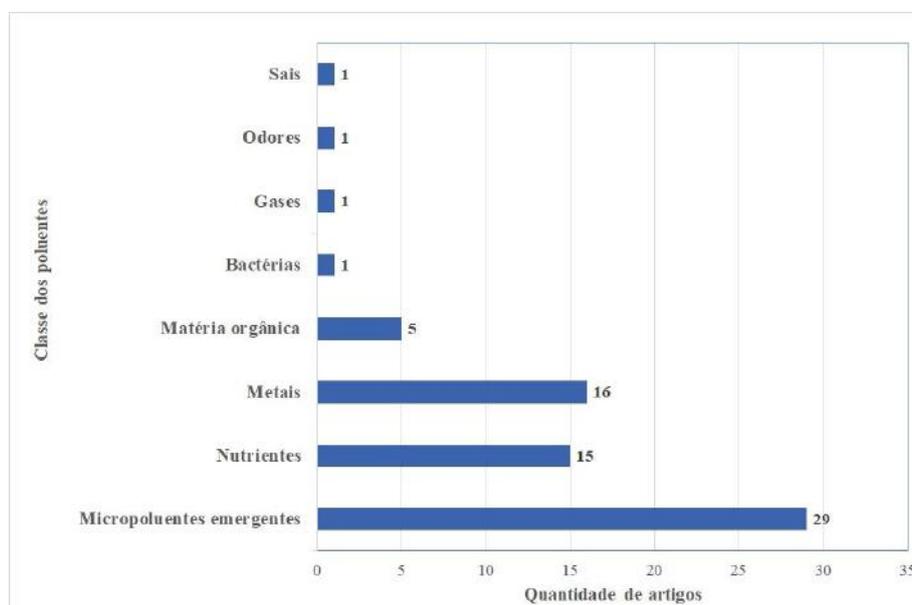
Figura 2 - Número de artigos encontrados, por local de publicação.



Fonte: Autores (2023).

Conforme a Figura 3, percebe-se que a maioria dos estudos busca remover/filtrar micropoluentes emergentes, seguidos de nutrientes e metais.

Figura 3 - Quantidade de artigos encontrados conforme a classe do poluente a ser removido no estudo.



Fonte: Autores (2023).

Dos 29 artigos sobre remoção de micropoluentes emergentes, conforme o que está apresentado na Tabela 1, 5 estudos são apenas sobre a adsorção de um antibiótico específico como a tetraciclina, ciprofloxacina e gatifloxacina e 3 estudaram a remoção/filtração de perfluorooctano sulfonatos (PFOS). Os demais estudos abordaram a remoção individual ou simultânea de diversos micropoluentes emergentes.

Tabela 1 - Micropoluentes emergentes encontrados nos artigos analisados.

BIOCARVÃO / (TEMPERATURA DE PIRÓLISE)	AGENTE DE ATIVACÃO	POLUENTE	TEMPO DE EQUILÍBRIO (MIN)	CAPACIDA DE DE ADSORÇÃO (MG/G)	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO (%)	TIPO DE ÁGUA RESIDUÁRIA	REFERÊNCIA
Resíduos de azeitona / (260°C)	Sem ativação	Analgésicos, anti- inflamatórios, antiretrovirais e antibióticos, ciprofloxacina	/	/	62,00	Doméstico	(Späth et al., 2021)
Resíduos de tomate / (260°C)					46,00		
Palma de Raphia Farinifera / (260°C)					53,00		
Casca de arroz / (260°C)					44,00		
Resíduos sólidos urbanos / (500°C)	Montmorilonita e argila vermelha	Tetraciclina	/	25,98	100,00	Efluente municipal ou solo	(Borthakur et al., 2021)
Casca de noz / (600°C)	Ferro e nitrogênio	Tetraciclina	120	238,94	75,30	Suinocultura	(X. Li & Shi, 2022)
Cascas de romã / (800°C)	Ácido fosfórico	Ciprofloxacina	240	142,86	85,00	/	(Hamadeen & Elkhatib, 2022)
Lodo de esgoto e resíduos de bambu / (700°C)	Sem ativação	Ciprofloxacina	/	62,48	95,00	/	(J. Li, Yu, et al., 2020)
Lodo do tanque de concentração / (550°C)	Cloreto de zinco	Gatifloxacina	/	20,00	96,00	Artificial	(Yao et al., 2013)
Lodo de desidratação / (550°C)				19,00			
Lodo seco com cal / (550°)				4,00	Baixa		
Lodo do tanque de sedimentação secundário / (550°)				18,00	96,00		
Lodo seco / (550°C)				17,00	80,00		
/	Agentes complexantes	Fluoxetina (antidepressivo)	10	/	86,00	Artificial	(Escudero-Curiel et al., 2021)
Madeira dura (/)	/	Carbamazepina	/	/	99,00	Afluente dos tanques de pré sedimentação de ETE	(S. Dalahmeh et al., 2018)
		Metropolol			99,00		
		Ranitidina			98,00		
		Cafeína			96,00		
Bagaço de cana de açúcar e lodo de decantação / (380°C)	Sem ativação	Tiametoxam	60	10,17	70,00	Artificial	(Fernandes et al., 2021)
Lodo de papel/casca de trigo / (500°C)	Sem ativação	2,4-Diclorofenol	143	17,51	99,95	Artificial	(Kalderis et al., 2017)
Serragem mista / (800°C)	Ferro e nitrogênio	Carbamazepina	60	15,00	69,00	80,00	Artificial
		Ciprofloxacina			69,00		
		Bisfenol A			55,00		
		Ibuprofeno			12,00		
		Fenol			12,00		
		Acetaminofeno			40,00		
		Sulfametoxazol			34,00		
		Tetraciclina			28,00		
Naproxeno	38,00						
Biossólidos de águas residuais / (800°C)	Ácido clorídrico	Triclosan	/	239,00	32,00	ETE	(Tong et al., 2016)
Lodo de esgoto / (500 °C)	Sem ativação	2,4-Diclorofenol	4200	/	82,00	ETE	(Regkouzas & Diamadopoulos, 2019)
		2,3,4-Triclorofenol			70,00		
		Bisfenol A			50,00		
		Androsterona			98,00		
		Etilin estradiol			62,00		

		Estrona			62,00		
		Carbamazepina			70,00		
Casca de coco / (900°C)	Hidróxido de potássio	PFOS	30	1269,00	90,00	Artificial	(Zhou et al., 2021)
Madeira / (800°C)	Sem ativação	PFOS	/	168,00	99,00	ETE	(S. Dalahmeh et al., 2018)
Borra de café / (400°C)	Hidróxido de sódio e hidróxido de potássio	PFOS	48	43,40	92,40	Artificial	(Steigerwald & Ray, 2021)

Fonte: Autores (2023).

A Tabela 2 apresenta os dados acerca da remoção de corantes encontrados em 14 artigos analisados. A adsorção de corantes foi aplicada principalmente em solução aquosa com o poluente ou em água residuária (sintética ou real) proveniente de efluente têxtil.

Tabela 2 - Corantes encontrados nos artigos analisados.

BIOCARVÃO / (TEMPERATURA DE PIRÓLISE)	AGENTE DE ATIVAÇÃO	POLUENTE	TEMPO DE EQUILÍBRIO (MIN)	CAPACIDADE DE ADSORÇÃO (MG/G)	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO (%)	TIPO DE ÁGUA RESIDUÁRIA	REFERÊNCIA
Sabugo de milho / (450 A 550°C)	Ácido sulfúrico	Corante têxtil real	45	6,02	98,00	Têxtil	(Sonu et al., 2020)
Casca de mandioca / (600°C)	Ácido fosfórico	Verde malaquita	40	1363,58	/	Artificial	(Beakou et al., 2017)
Lodo de esgoto com alto teor de cinzas e metais / (600°C)	Sem ativação	Triarilmetano, verde malaquita e violeta cristal	2880	69,50	/	Artificial	(Sewu et al., 2021)
Folhas de mamona / (600°C)	Sem ativação	Safranina	120	4,98	99,60	Têxtil	(Suleman et al., 2021)
Lodo de indústria alimentícia / (350°C)	Ácido fosfórico	Tartrazina	210	9,87	49,00	Artificial	(Cuba et al., 2021)
Resíduos de cimento Portland / (600°C)	Cloreto de zinco	Rodamina B	60	531,84	/	Artificial	(Silva et al., 2022)
Móveis antigos e poda de madeira / (900°C)	Sem ativação	Preto	90	35,67	/	Artificial	(Nascimento et al., 2021)
		Azul básico 12	180	80,41	/		
		Verde brilhante	120	49,00	98,00		
Casca de cacau / (750°C)	Hidróxido de sódio	Rodamina B	240	44,00	89,00	Artificial	(Córdova et al., 2020)
		Laranja de metila	360	44,00	89,00		
Casca de café / (450°C)	Cloreto de zinco e brometo de cetrimônio	Amarelo 145		73,00	83,70	Artificial	(Kosaiyakanon & Kungsanant, 2020)
		Vermelho 195	180	58,80	71,10		
		Azul 202		46,10	59,60		
Lodo de esgoto e lignina / (600°C)	Sem ativação	Azul de metileno	/	38,56	/	/	(Dai et al., 2022)
Acácia nilótica (Não mencionou temperatura)	Sem ativação	Azul de metileno	200	158,13	/	Artificial	(Singh et al., 2021)
Lodo de esgoto / (550°C)	Sem ativação	Azul de metileno	600	16,21	98,00	Artificial	(Fan et al., 2017)
Resíduo de chá / (400°C)	Ácido fosfórico	Azul de metileno	97,92	91,13	99,26	Artificial	(Salehi et al., 2020)

Fonte: Autores (2023).

O fosfato foi o nutriente mais observado em experimentos de adsorção, seguido do fósforo, nitrato, amônio, sulfatos, amônia, nitritos, nitrogênio amoniacal e potássio.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados de estudos acerca da adsorção de nutrientes por meio de biocarvão ativado ou não, com suas respectivas temperaturas de pirólise, tempo de equilíbrio, capacidade de adsorção, eficiência de remoção e o tipo de efluente utilizado.

Tabela 3 - Dados acerca de remoção de nutrientes utilizando biocarvão.

Biocarvão / (Temperatura de pirólise)	Agente de ativação	Poluente	Tempo de equilíbrio (min)	Capacidade de adsorção (mg/g)	Eficiência de remoção (%)	Tipo de água residuária	Referência	
Madeira de abeto / (600°C)	Água do mar	Fosfato	2160	181,07	63,00 - 100,00	Artificial	(M. Zhang et al., 2022)	
Casca de arroz / (700°C)		Nitrato	90	12,32	22,00			
		Nitrito		0,23				
Casca de coco / (700°C)	Sem ativação	Nitrato	90	12,97	24,00	Abatedouro	(Konneh et al., 2021)	
		Nitrito		0,24				
Casca de café / (700°C)		Nitrato	60	12,08	17,00			
		Nitrito		0,22				
Pinho (Não mencionou temperatura)	Sem ativação	Nitrato	/	/	68,00 - 98,00	Lodo fecal bruto e efluente de esgoto	(Mamera et al., 2022)	
		Fosfato						
Serragem / (600°C)	Bário e óxido de ferro	Sulfatos	480	/	97,00	Artificial	(Khalid et al., 2022)	
Lodo de esgoto / (450°C)	Sem ativação	Amônio	800	1,20	50,00	Artificial	(Tang et al., 2019)	
				3,50				
				Magnésio				30,58
				Alumínio				16,00
				Ferro				5,20
				Manganês				7,50
				240				/
Lodo de esgoto / (600°C)	Sem ativação	Fosfato	240	3,00	/	Artificial	(Lv et al., 2022)	
				400,00				
				Alumínio				50,00
				Ferro				38,00
				Manganês				37,00
Casca de coco (/)	Ferro e alumínio	Nitrato	1440	1,32	85,00	Industrial pré-tratada	(You et al., 2022)	
Palha de milho (/)	alumínio		0,86	60,00				
Lodo de esgoto / (°600)	lantânio	Fosfato	1440	93,91	98,90	Artificial	(J. Li, Li, et al., 2020)	
Palha de banana / (500°C)	Hidróxido de zinco alumínio	Fosfato	40	185,19	/	Artificial	(Jiang et al., 2019)	
Palha agrícola / (500°C)	Magnésio e alumínio	Fósforo	120	89,37	95,00	Doméstica	(Yuan et al., 2021)	
Hydrocotyle vulgaris / (500°C)	Alginato de sódio	Fosforo	160	255,88	96,00	Artificial	(X. Fu et al., 2022)	

Fonte: Autores (2023).

Entre os metais mais encontrados nos estudos analisados, estão o cromo (IV), o cádmio (II) e o cobre. O mecanismo de adsorção predominante observado na remoção de metais foi o da quimissorção, com troca iônica e complexação de superfície. A Tabela 4 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 4 - Dados acerca de remoção de metais utilizando biocarvão.

Biocarvão / (temperatura de pirólise)	Agente de ativação	Poluente	Tempo de equilíbrio (min)	Capacidade de adsorção (mg/g)	Eficiência de remoção (%)	Tipo de água residuária	Referência	
Casca de broto de bambu / (750°C)	Sem ativação	Cobre	480	4,87	99,00	Artificial	(Hu et al., 2022)	
		Cromo (IV)	240	57,63	80,00			
Algas azuis Taihu / (800°C)	Hidróxido de potássio	Níquel	20	2,26	98,87	Galvanoplastia	(H. Wang et al., 2020)	
Aguapé / (500°C)	Sem ativação	Cromo	10	/	99,00	Curtume	(Hashem et al., 2020)	
Palha de taro (450°C)	Magnésio	Cromo (IV)	90	50,21	90,00	Artificial	(A. Li, Deng, et al., 2020)	
Palha de banana (450°C)			/	114,64	/			
Palha de milho (450°C)			180	40,12	/			
Palha de mandioca (450°C)			60	75,56	89,19			
Palha de abeto chinês (450°C)			150	17,21	/			
Palha de Camellia Oleífera / (450°C)			120	20,21	/			
Casca de coco / (temperatura não mencionada)	Nitrato de ferro	Cromo (IV)	120	1,27	100,00	Artificial	(Bu et al., 2021)	
	Sem ativação			0,06	4,66			
Lodo de esgoto de fábrica de papel / (750°C)	Sem ativação	Cobre	1440	29,61	Artificial	(Z. Xu et al., 2021)		
		Zinco	120	30,00			95,00	
		Arsênio	150	0,95				
		Cobre	/	12,28			40,92	
		Zinco	/	26,00			87,93	
Lodo de ETE / (900°C)	Sem ativação	Cádmio (II)	/	42,80	100,00	Artificial	(Chen et al., 2015)	
				0,06	4,66			
Camellia oleífera (800°C)	Óxido de magnésio	Cádmio (II)	200	649,9	92,00	Artificial	(Y. Xu et al., 2022)	
Fungo Auricularia Auricula (400°C)	Dissulfeto de carbono	Cádmio (II)	60	450,51	96,10	Artificial	(G. Wang et al., 2022)	
Esterco de porco / (500°C)	Sem ativação	Urânio	60	Água	350,10	82,40	Artificial	(Liao et al., 2022)
				Peróxido de hidrogênio	661,70	85,90		
				Permanganato de potássio	979,30	94,70		
Solidago Canadensis / (700°C)	Sem ativação	Európio (III)	550	Hidroxiapatita	270,30	Artificial	(Dong et al., 2021)	
				Hidróxido duplo (LDL)	344,80			
				Hidroxiapatita e hidróxido duplo	700			666,70
Lodo de ETE / (600°C)	Sem ativação	Chumbo	240	611,80	/	Artificial	(Lei et al., 2019)	
Serragem de eucalipto / (600°C)	Sem ativação	Níquel	30	36,00	73,00	Artificial	(Shafiq et al., 2021)	
		Chumbo		129,00	95,00			
Cogumelo descartado / (300°C)	Sem ativação	Ácido clorídrico	300	Chumbo	5,00	Artificial	(X. Wang et al., 2019)	
				Cádmio (II)	20,00			
				Níquel	2,00			
				Cobre	9,00			
Caruru-de-cacho / (500°C)	Sem ativação	Cádmio (II)	720	310,00	92,70	Artificial	(Z. Yang et al., 2021)	
		Chumbo		326,00	97,50			
Pó de serra / (500°C)	amino modificação	Cobre	90	246,00	98,50	Artificial	(G.-X. Yang & Jiang, 2014)	
				15,00	/			

Fonte: Autores (2023).

Apesar de a matéria orgânica ser removida considerando variados parâmetros, a remoção de DQO (Demanda Química de Oxigênio) foi o mais analisado. A Tabela 5 apresenta os seis artigos relacionados à remoção de matéria orgânica e os seus respectivos dados.

Tabela 5 - Artigos encontrados e seus respectivos dados acerca de remoção de matéria orgânica utilizando biocarvão modificado ou não.

Biocarvão / temperatura de pirólise)	Agente de ativação	Parâmetro	Tempo de equilíbrio (min)	Capacidade de adsorção	Eficiência de remoção (%)	Tipo de água residuária	Referência	
Palha de trigo / (700°C)	Quitosana	Matéria orgânica dissolvida	60	/	52,00	Efluente de coque biotratados	(Shi et al., 2020)	
Aerogel de quitosana / (800°C)	/	Carbono orgânico dissolvido	120	/	52,00	Efluente da produção de gás de xisto	(Shang et al., 2020)	
		UV 254			72,00			
		turbidez			70,00			
Madeira de álamo / (800°C)	/	Contaminante orgânico	180	110,00	60,00	Efluente de pirólise	(Caprariis et al., 2017)	
				Hidróxido de sódio	150,00			75,00
Aguapé / (500°C)	/	DQO	/	/	800,00	90,00	Efluente de curtume	(Hashem et al., 2020)
					DBO	93,00		
Resíduo de biogás de palha / (550°C)	Cloreto de ferro (III)	DQO	60	/	47,00	Efluente sintético	(M. Wang et al., 2021)	
Resíduo de biogás de esterco de porco / (550°C)					49,00			
Resíduo de biogás de esterco de galinha / (550°C)					186,24			54,00

Fonte: Autores (2023).

Na triagem, apenas um artigo foi encontrado com odor, gás e bactérias, respectivamente, como poluentes. Kumi et al. (2020), estudaram a adsorção de nitrogênio (N₂) utilizando biocarvão de lodo de esgoto modificado por casca de ovo, que possibilita uma melhor estrutura porosa e mais áspera, contribuindo para a adsorção.

Piekarski et al. (2021) analisaram a remoção de n-butanol utilizando como parâmetro o odor de bacalhau (OUE/m³), através de filtro de leito fixo com diferentes alturas e com biocarvão produzido a partir de lodo de esgoto e resíduos apícolas sem modificação e modificado com peróxido de hidrogênio (H₂O₂) ou cloreto de zinco (ZnCl₂). Observou-se que o desempenho de adsorção do biocarvão do lodo de esgoto foi melhor que o biocarvão dos resíduos da apicultura.

Semelhante a esse estudo em filtro de coluna, Mamera et al. (2022) investigaram a concentração e as taxas de migração de nitratos, fosfatos, E. coli e bactérias coliformes fecais através de diferentes tratamentos de coluna de biocarvão no leito do solo lixiviados com lodo fecal bruto e efluente de esgoto. Os resultados mostraram uma taxa decrescente de nitratos, fosfatos, zinco e cobre com o aumento da taxa de aplicação de biocarvão. Além disso, obteve eficiência de remoção acima de 98% para E. coli, e 85% para coliformes fecais nos tratamentos de efluente e lodo.

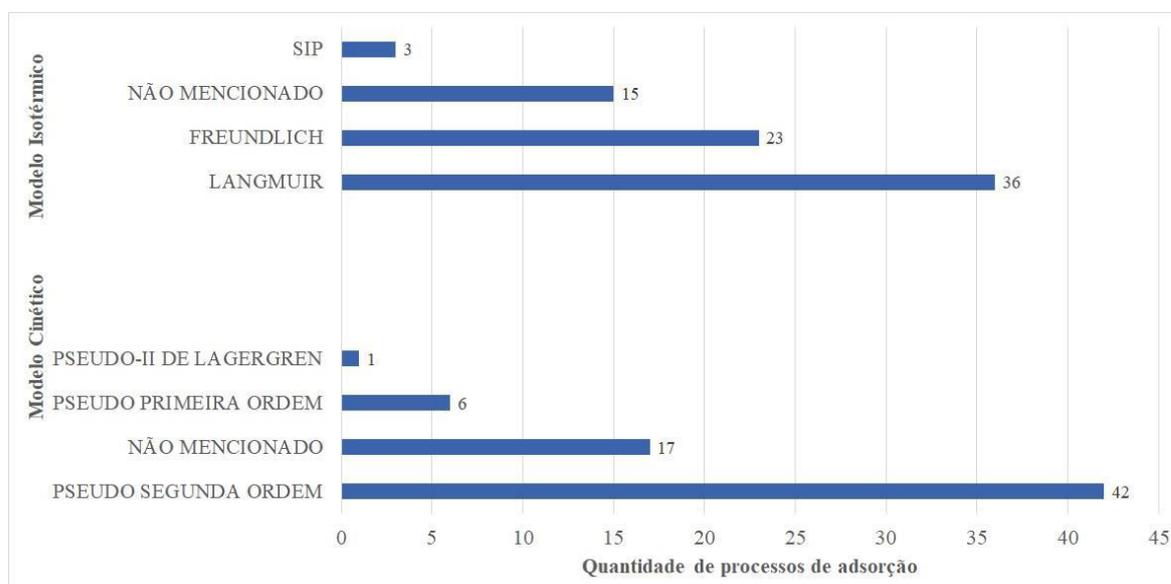
3.2 Matéria-prima

A Figura 4 apresenta uma nuvem de palavras, na qual o aumento da fonte está relacionado com a quantidade de artigos em que se utilizou determinada matéria-prima. Desse modo, a matéria-prima mais utilizada para produzir o

modelo de adsorção indica que as moléculas de adsorção aderem à superfície do adsorvente em locais definidos (sítios), e cada sítio ativo acomoda apenas uma molécula do adsorbato. Isso indica que apenas uma monocamada é formada e não há interação entre moléculas de locais vizinhos.

Já o modelo cinético que melhor se ajustou aos dados dos experimentos foram o de pseudo-segunda ordem e pseudo-primeira ordem, sendo que em 17 artigos a cinética de adsorção não foi mencionada ou estudada. Além disso, alguns experimentos se ajustaram tanto ao modelo cinético de pseudo-primeira ordem quanto ao de segunda ordem, indicando que diferentes processos ocorrem simultaneamente na adsorção (Sewu et al., 2021). A Figura 6 apresenta a quantidade de processos de adsorção que melhor se ajustou em cada modelo.

Figura 6 - Quantidade de processos de adsorção de acordo com os modelos cinéticos e isotérmicos de adsorção.

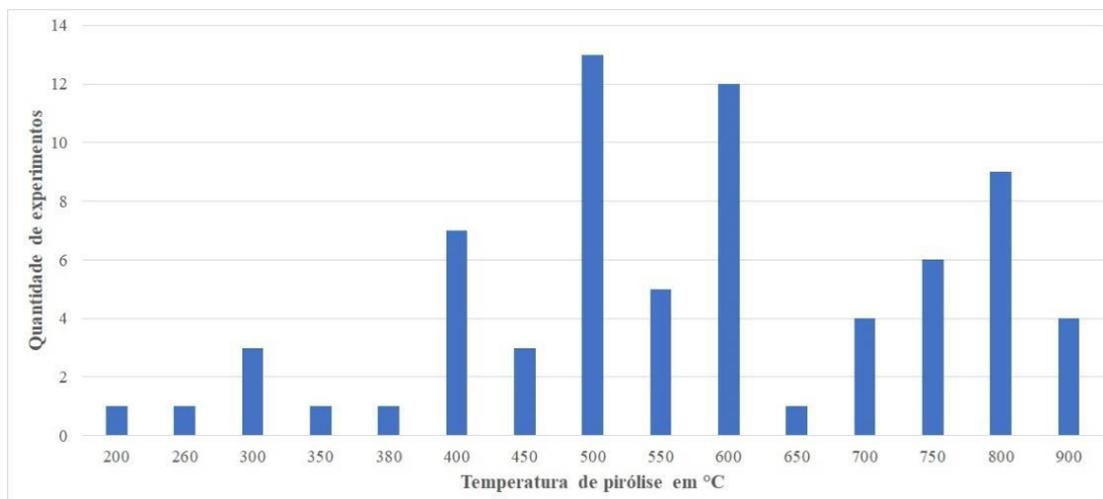


Fonte: Autores (2023).

O tempo de equilíbrio de adsorção, caracterizado pelo tempo no qual, a partir do mesmo, a taxa de adsorção permanece praticamente constante, variou em cada experimento conforme o adsorbato, o adsorvente e substâncias modificadoras. A taxa de variação foi entre 10 (Hashem et al., 2020) a 4200 minutos (Dalahmeh et al., 2019), sendo que os experimentos realizados em filtro de coluna não foram considerados. Além disso, em 15 artigos o tempo de equilíbrio de adsorção não foi mencionado. Ainda assim, 8 experimentos apresentaram tempo de equilíbrio igual a 120 minutos (Bu et al., 2021; Chen et al., 2015; Cuba et al., 2021; X. Fu et al., 2022; Kosaiyakanon & Kungsanant, 2020; X. Li & Shi, 2022; Shang et al., 2020; Z. Xu et al., 2021)

A Figura 7 apresenta a quantidade de experimentos analisados conforme a temperatura de pirólise na produção do biocarvão, mostrando que a maior parte dos experimentos realizaram pirólise entre 400°C e 800°C. Quanto à temperatura em que ocorre a adsorção, apenas 21 estudos mencionaram a sua influência na eficiência do processo. Destes, 2 concluíram que a temperatura não influenciava a adsorção (Chen et al., 2015; Tong et al., 2016), 2 concluíram que a eficiência de adsorção diminui com o aumento da temperatura (X. Fu et al., 2022; Hu et al., 2022) e 17 constataram que a adsorção aumentou com o aumento da temperatura (Hamadeen & Elkhatib, 2022; A. Li et al., 2020; X. Li & Shi, 2022; Regkouzas & Diamadopoulou, 2019, entre outros).

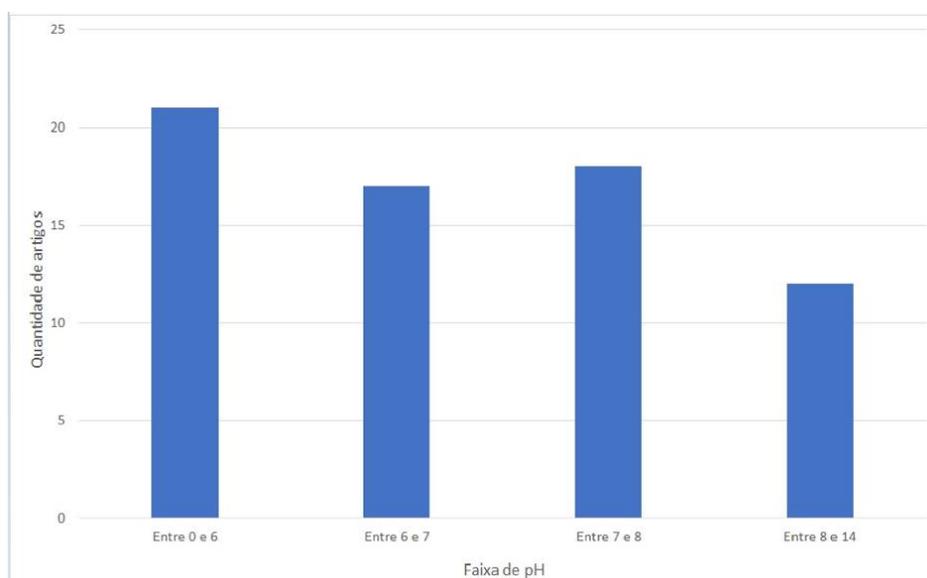
Figura 7 - Quantidade de experimentos encontrados com cada temperatura de pirólise em °C.



Fonte: Autores (2023).

Além da temperatura do processo de adsorção, o pH da solução é um fator determinante para a adsorção de poluentes com biocarvão. Dos 63 artigos analisados, 10 não estudaram o efeito do pH na adsorção e o restante realizaram os experimentos com pH conforme mostra a Figura 8. Apenas um estudo concluiu que o pH não fazia diferença na adsorção de micropoluentes (Regkouzas & Diamadopoulos, 2019).

Figura 8 - Quantidade de processos de adsorção nos artigos conforme o valor de pH da solução adsorvente/adsorbato.



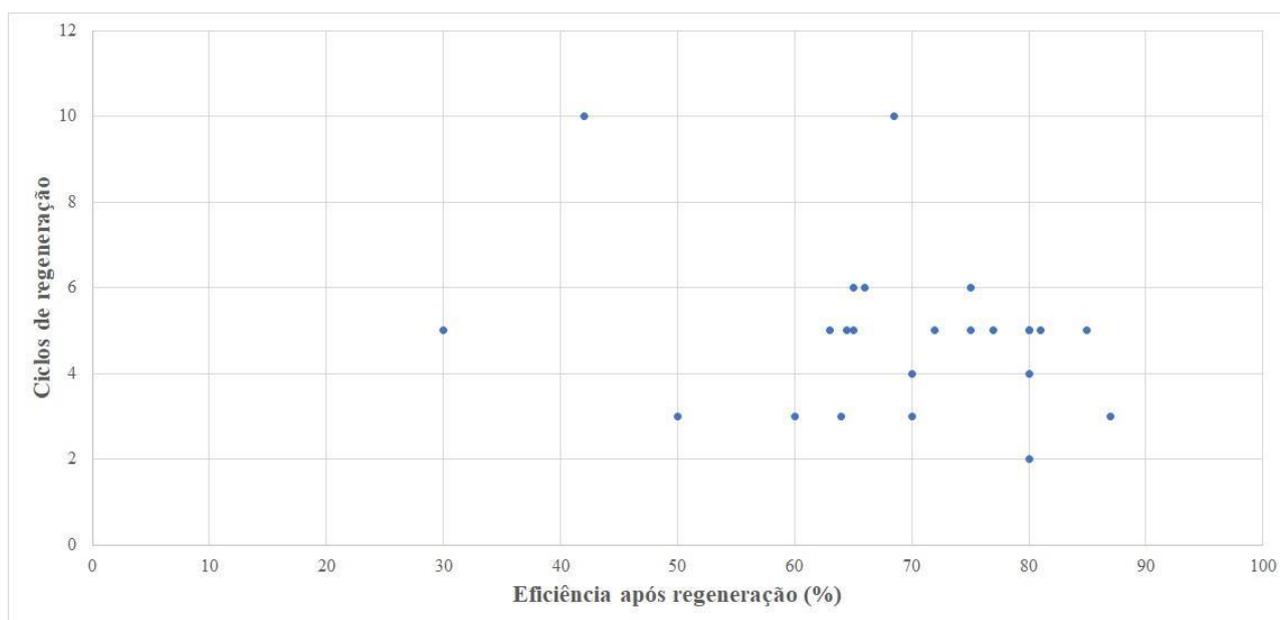
Fonte: Autores (2023).

Apenas dois artigos avaliaram o custo financeiro da utilização de biocarvão na adsorção de poluentes. Zhang et al. (2022) analisaram o custo do biocarvão de resíduos de madeira de abeto modificado com água do mar como fonte de Ca/Mg, obtendo alta capacidade de adsorção (181,07 mg/g) e eficiência de até 100% na remoção de fosfato, e concluíram que a modificação não aumentou o custo de produção, que foi estimado em 0,41US\$/kg.

Já Shi et al. (2020), no estudo da remoção de matéria orgânica dissolvida (MOD) de efluentes de coque biotratados por biocarvão modificado com quitosana, constataram que as matérias-primas de baixo custo de biochar (pelo menos US\$246 por tonelada) e quitosana (pelo menos US\$1.000 por tonelada) são usadas para preparar biocarvão, e o processo de produção é mais ecológico; em contraste com o alto custo e alto consumo de energia durante o processo de fabricação do tradicional material de adsorção de carvão ativado (pelo menos US\$1.500 por tonelada).

Dos 63 artigos analisados, apenas 19 apresentaram dados acerca da regeneração do biocarvão. Os resultados são mostrados na Figura 9, em que a abcissa do gráfico representa a eficiência de adsorção após a regeneração do biocarvão e a ordenada indica a quantidade de ciclos de regeneração.

Figura 9 - Gráfico de dispersão da quantidade de ciclos de regeneração versus a eficiência da adsorção após regeneração em percentagem.



Fonte: Autores (2023).

4. Discussão

Com o acelerado crescimento econômico e uma das maiores populações do planeta, a China tem sido cenário de problemas ambientais recorrentes e de grandes dimensões. Conforme Zago (2015), a poluição da água no país afeta 75% dos rios e lagos chineses e 90% das águas subterrâneas urbanas, 28% dos rios são tão tóxicos que não servem nem para o uso agrícola. Entretanto, na última década o governo chinês tem se mostrado engajado em adotar políticas ambientais mesmo diante do dilema entre o crescimento econômico e a proteção ambiental. Esse pode ser uma razão pela qual o maior número de publicações foi da China.

A partir da análise dos resultados, foi possível perceber que a maioria das publicações encontradas é recente visto que houve um aumento significativo de publicações a partir de 2019. Como causa disso, pode-se mencionar duas hipóteses: o interesse da comunidade científica ao longo dos últimos dez anos em reduzir os impactos da resistência antimicrobiana; e

o risco de contaminação através dos esgotos durante a pandemia do Covid-19. É possível constatar que a maior parte dos artigos trata sobre a remoção de micropoluentes emergentes, o que revela a preocupação dos estudiosos quanto aos efeitos negativos das altas concentrações desses poluentes nos cursos d'água para a saúde humana e ambiental.

Para (Liu et al., 2022), os micropoluentes orgânicos representam um grupo de poluentes, encontrados regularmente na superfície e nas águas residuais, apresentando um efeito tóxico a longo prazo e ameaça aos organismos receptores. Isso acontece porque são persistentes durante os processos convencionais de tratamento de água e até mesmo quando são biodegradados, podem ser transformados em mais subprodutos perigosos (Inyang & Dickenson, 2015).

Segundo Marti et al. (2014), o uso excessivo e indevido de agentes antimicrobianos na medicina humana e veterinária, pecuária, ambientes industriais e sua posterior liberação em estações de tratamento de efluentes (ETE) têm contribuído para o surgimento e disseminação de bactérias resistentes no meio ambiente, incluindo bactérias causadoras de infecções em humanos e animais. Além disso, estudos já identificaram efeitos hormonais e redução significativa de embriões em espécies aquáticas expostas a concentrações de medicamentos (Galus et al., 2013).

Os corantes também podem ser classificados como micropoluentes emergentes. Entre os corantes mais citados nos artigos estão o azul de metileno e o verde malaquita, que são corantes básicos e catiônicos, bastante utilizados, principalmente pelas indústrias. Todavia, o corante verde malaquita, por exemplo, é uma substância tóxica e com potencial cancerígeno para os seres humanos (Lima, 2017).

Além dos micropoluentes emergentes, outra classe de poluente muito encontrada nos estudos foram os nutrientes e os metais. Segundo Zhang et al. (2012), o excesso de nitrogênio e fósforo despejados no ambiente aquático causará eutrofização, resultando na disseminação de algas, colocando em risco a segurança da água potável e a biodiversidade dos ecossistemas aquáticos.

Em relação aos metais, a maior parcela das publicações estudou a remoção de metais nocivos à saúde mesmo em pequenas concentrações, como o cromo (IV) e o cádmio (II). Para Liu et al. (2022) e Fu et al. (2021), embora o metal cádmio não tenha significado patológico, seus compostos são altamente tóxicos. Se for descarregado diretamente sem tratamento, é fácil causar intoxicação crônica de seres humanos e animais. Conforme Y. Xu et al. (2022), a exposição prolongada a baixas concentrações de compostos de cádmio causará anemia, enfisema, neuralgia, dor de estômago, osteoporose e outras emergências.

Analisando os artigos, foi possível concluir que no caso da remoção de matéria orgânica, o principal interesse dos experimentos era utilizar a adsorção com biocarvão como pós-tratamento ou apenas para melhorar a turbidez da água residual.

4.1 Matéria-prima e ativação do biocarvão

Quanto à matéria-prima utilizada nos experimentos, observou-se que normalmente as matérias-primas são obtidas nas regiões próximas à pesquisa. Além disso, o grande uso do lodo de esgoto como matéria-prima do biocarvão indica o interesse em reciclar o lodo de esgoto, material que geralmente é descartado em aterros sanitários, causando impactos ambientais.

Os estudos mostraram que a ativação do biochar aumenta a eficiência do biocarvão e aumenta a viabilidade da remoção de poluentes em larga escala. Segundo M. Zhang et al. (2022), a capacidade de adsorção relativamente limitada do biochar sem ativação ainda não pode atender à demanda por aplicações práticas. Wang et al. (2020), verificaram que o biochar ativado por hidróxido de potássio obteve a área superficial específica de 1657,8 m²/g, quase 92,6 vezes maior que a do biochar sem ativação (17,9 m²/g).

Além disso, o biocarvão de madeira álamo modificado com hidróxido de sódio (Caprariis et al., 2017) apresentou alta eficiência de remoção comparado com outras classes de adsorbatos, bem como elevada capacidade de adsorção. Em alguns estudos de caso, mesmo sem ativação do biochar, a eficiência de remoção dos poluentes permaneceu considerável, viabilizando a adsorção (Hashem et al., 2020; Y. Xu et al., 2022). No experimento de Shang et al. (2020), a eficiência de adsorção da matéria orgânica com aerogel de biocarvão poroso apresentou o dobro de eficiência na remoção de carbono orgânico dissolvido (52,5% em 30 minutos) comparado com o carvão ativado convencional (32,0% em 120 minutos).

Ademais, (Tong et al., 2016) constataram que o ácido clorídrico limpou mais a superfície do biochar, aumentou a porosidade e a área superficial. Porém, ainda assim, o carvão ativado possui cerca de cinco vezes mais área superficial e obteve maior eficiência de remoção de Triclosan. No estudo da remoção de odor através da adsorção com biocarvão de lodo de esgoto, Piekarski et al. (2021), concluíram que a modificação adicional com peróxido de hidrogênio ou cloreto de zinco aumenta a eficiência do processo, diminuindo assim a altura do leito necessária para a eliminação do odorante.

Além disso, na adsorção aprimorada de európio de águas residuais usando biocarvão derivado de *Solidago canadensis* funcionalizado por Ca/Al-LDH e hidroxiapatita, Dong et al. (2021), verificaram que a capacidade de adsorção com o biocarvão ativado foi 2,6 vezes maior que a capacidade adsorptiva do biocarvão puro.

A diversidade de agentes ativadores utilizados mostra que os estudiosos estão em busca de inovação nesse aspecto, como por exemplo a utilização de casca de ovo como fonte de carbonato de cálcio (Kumi et al., 2020) e da água do mar como fonte de cálcio e magnésio (M. Zhang et al., 2022).

4.2 Temperatura de pirólise e temperatura da adsorção

A temperatura de pirólise é a temperatura final na qual ocorre a pirólise da matéria-prima enquanto que a temperatura da adsorção é a temperatura em que ocorre o experimento e o processo de adsorção, podendo ser até mesmo a temperatura ambiente. Para a maioria dos estudos de caso que consideraram a influência da temperatura de adsorção, a eficiência e a capacidade de remoção de poluentes aumentaram quando a temperatura subiu de 15°C para 45°C, e decrescendo a partir daí (Y. Xu et al., 2022; Z. Xu et al., 2021). Isso mostra que a adsorção pode ser um processo endotérmico.

Determinar a temperatura ótima de pirólise do biocarvão é imprescindível para atingir bons resultados na adsorção de poluentes. Pois, além de influenciar na eficiência de remoção do poluente, a temperatura de pirólise é um parâmetro determinante para o rendimento do biochar. À medida que temperaturas muito baixas não apresentaram bom rendimento do biochar - além de não contribuir para o desenvolvimento de grupos funcionais favoráveis à adsorção -, temperaturas muito elevadas levaram a pequena área de superfície do biocarvão e baixo rendimento também. Entretanto, o conceito de temperatura baixa ou elevada depende das características da matéria-prima utilizada, como por exemplo o poder calorífico. Para Dai et al. (2022), e Sewu et al. (2021), o aumento da temperatura diminuiu os rendimentos de biochar devido à decomposição de orgânicos. Ainda, para Wang et al. (2019), os rendimentos de biocarvão de cogumelo diminuíram de 80,70% para 36,20% com a temperatura de pirólise aumentando de 300°C para 800 ° C.

Também foi possível observar que a temperatura de pirólise do adsorvente influencia propriedades como porosidade e área de superfície, que conseqüentemente, impactam no processo de adsorção de poluentes. Segundo (Suleman et al., 2021), a temperatura de pirólise desempenhou um papel fundamental no aumento da morfologia e cristalinidade do biochar que são benéficos para a adsorção de Safranina (corante). Os resultados do BET (Brunauer-Emmett-Teller) indicaram que a temperatura de pirólise teve forte influência na superfície do adsorvente visto que a área de superfície aumentou com o aumento da temperatura de pirólise e a liberação violenta de compostos orgânicos voláteis durante a pirólise pode ter produzido a estrutura mesoporosa em favo de mel no biocarvão à base de folhas de mamona. Também foi

observado no estudo da adsorção de Triclosan usando biocarvão derivado de biossólidos de águas residuais que a adesão de Triclosan à superfície de biochar aumentou com o aumento da temperatura de pirólise (Tong et al., 2016).

4.3 pH, tempo de equilíbrio e regeneração do biocarvão

Foi visto nos resultados que os valores de pH utilizados nos experimentos foram muito diversificados já que depende das propriedades individuais do biocarvão e do tipo de poluente. Logo, se faz necessário analisar o ponto de carga zero (pHPCZ) dos materiais antes de cada experimento, pois o pH interfere nos mecanismos de adsorção como por exemplo a interação eletrostática.

(Kalderis et al., 2017), concluíram que a interação eletrostática entre o poluente e o biocarvão é dependente do pH e, na maioria dos sistemas com biocarvões e contaminantes ionizáveis, as interações eletrostáticas desempenham um papel importante na adsorção. Desse modo, pode-se dizer que o pH da solução teve forte influência principalmente na adsorção dos metais, que em sua maioria acontece através da interação eletrostática e da troca iônica. Na adsorção de cádmio por biocarvão derivado de lodo de esgoto municipal, Chen et al. (2015) concluíram que a precipitação formada pelo aumento do pH e troca iônica entre Ca^{2+} e Cd^{2+} podem ser suas principais vias de adsorção. No experimento de adsorção de cádmio em águas residuais por biocarvão modificado com óxido de magnésio, por exemplo, quando o pH da solução ultrapassou 7, a taxa de adsorção de cádmio diminuiu (Y. Xu et al., 2022).

Outro parâmetro importante é o tempo de equilíbrio da adsorção, que também foi diversificado nos diferentes estudos de caso. Ele pode afetar a viabilidade técnica e econômica do tratamento da água residuária, pois tempos de equilíbrio muito longos demandam mais tempo de monitoramento e energia elétrica dos aparelhos, além de prolongar o tempo do tratamento, diminuindo a produtividade.

A regeneração do biocarvão pode ser compreendida como a limpeza dos poros do biocarvão por meio de uma substância a fim de liberar sítios ocupados por poluentes em adsorção anterior, para fins de reutilização do biocarvão. Na maioria dos casos a eficiência de adsorção após regeneração se manteve alta, acima de 60%. Por exemplo, no estudo da remoção de matéria orgânica dissolvida (MOD) com biocarvão modificado com quitosana (Shi et al., 2020), após 10 dessorções com hidróxido de sódio, o desempenho de adsorção diminuiu apenas em aproximadamente 10%. Já na adsorção de fósforo com esferas de biocarvão derivadas de *Hydrocotyle vulgaris* (Trevo) (A. Li, Deng, et al., 2020), após cinco ciclos de adsorção-dessorção, a eficiência de remoção ainda permaneceu em 87,06%.

5. Conclusão

Neste estudo foi possível perceber que as pesquisas em relação ao tratamento de águas residuárias com biocarvão ainda são recentes e os experimentos estão sendo realizados em pequena escala com efluentes sintéticos. A maioria dos estudos tratavam da remoção de micropoluentes emergentes, principalmente fármacos, produtos cosméticos e corantes, além dos metais.

O biocarvão ativado apresentou alta eficiência de remoção na maioria dos estudos, mesmo após ciclos de regeneração, indicando grande potencial de uso no pós-tratamento de água residuária. Para tanto, é necessário analisar as características como pH, temperatura de pirólise e temperatura do processo, que afetam a eficiência da adsorção. A temperatura de pirólise mais utilizada estava entre 400°C e 800°C e a adsorção aumentou com o aumento da temperatura do processo em até 45° C. As matérias-primas utilizadas para produção do biocarvão se mostraram diversificadas e geralmente, os estudos utilizaram matérias-primas disponíveis na região do estudo. O modelo cinético de pseudo segunda-ordem e a isoterma de Langmuir foram as que melhor se ajustaram à maioria dos experimentos.

Conclui-se que o biocarvão apresenta grande potencial de aplicação, porém, ainda há muito o que ser explorado. Sugere-se para posteriores estudos a análise econômica do uso do biocarvão como meio filtrante, pois poucos artigos foram encontrados abordando essa temática, além de estudos sobre o seu descarte. A alta eficiência da remoção dos poluentes após regenerações do biocarvão indica seu potencial sustentável, entretanto não foi explicitado nos artigos como ocorreu o processo de regeneração e os riscos envolvidos no manejo do lixiviado (rico em contaminantes). Além disso, a longevidade e, portanto, a eficiência do biocarvão a longo prazo ainda não foram explorados, impondo questões importantes quanto à sua viabilidade técnica, econômica e ambiental. Finalmente, se faz necessária a realização de experimentos e estudos de caso utilizando água residuária real ao invés de efluente sintético na remoção de poluentes para posterior escalonamento dos experimentos.

Agradecimentos

As autoras agradecem à Fundação de Apoio a Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC), pela concessão de bolsa (nível doutorado), e à plataforma CAPES, pelo acesso às bases de dados.

Referências

- Ahmed, M. J., & Dhedan, S. K. (2012). Equilibrium isotherms and kinetics modeling of methylene blue adsorption on agricultural wastes-based activated carbons. *Fluid Phase Equilibria*, 317, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2011.12.026>
- Ambaye, T. G., Vaccari, M., van Hullebusch, E. D., Amrane, A., & Rtimi, S. (2021). Mechanisms and adsorption capacities of biochar for the removal of organic and inorganic pollutants from industrial wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(10), 3273–3294. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03060-w>
- Aquino, S. F. de, Brandt, E. M. F., & Chernicharo, C. A. de L. (2013). Remoção de fármacos e desreguladores endócrinos em estações de tratamento de esgoto: Revisão da literatura. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 18(3), 187–204. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000300002>
- Beakou, B. H., Hassani, K. E., Houssaini, M. A., Belbahoul, M., Oukani, E., & Anouar, A. (2017). A novel biochar from Manihot esculenta Crantz waste: Application for the removal of Malachite Green from wastewater and optimization of the adsorption process. *Water Science & Technology*, 76(6), 1447–1456. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.332>
- Borthakur, P., Aryafard, M., Zara, Z., David, R., Minofar, B., Das, M. R., & Vithanage, M. (2021). Computational and experimental assessment of pH and specific ions on the solute solvent interactions of clay-biochar composites towards tetracycline adsorption: Implications on wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 283, 111989. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111989>
- Bu, J., Li, W., Niu, N., Guo, N., Zhou, H., Chen, C., & Ding, A. (2021). Adsorption of Cr(VI) from wastewater by iron-modified coconut shell biochar. *E3S Web of Conferences*, 248, 01059. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124801059>
- Caprariis, B., De Filippis, P., Hernandez, A. D., Petrucci, E., Petruzzo, A., Scarsella, M., & Turchi, M. (2017). Pyrolysis wastewater treatment by adsorption on biochars produced by poplar biomass. *Journal of Environmental Management*, 197, 231–238. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.007>
- Chen, T., Zhou, Z., Han, R., Meng, R., Wang, H., & Lu, W. (2015). Adsorption of cadmium by biochar derived from municipal sewage sludge: Impact factors and adsorption mechanism. *Chemosphere*, 134, 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.04.052>
- Córdova, B. M., Santa Cruz, J. P., Ocampo M., T. V., Huamani-Palomino, R. G., & Baena-Moncada, A. M. (2020). Simultaneous adsorption of a ternary mixture of brilliant green, rhodamine B and methyl orange as artificial wastewater onto biochar from cocoa pod husk waste. Quantification of dyes using the derivative spectrophotometry method. *New Journal of Chemistry*, 44(20), 8303–8316. <https://doi.org/10.1039/D0NJ00916D>
- Cuba, R. M. F., Paula, B. M. de, Vale, G. B. do, Braga, T. C., & Terán, F. J. C. (2021). Biocarvão ativado produzido a partir de lodo anaeróbico de estação de tratamento de efluentes para remoção do corante tartrazina. *Matéria* (Rio de Janeiro), 26(4), e13109. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620210004.1309>
- Dai, Q., Xiang, W., Liu, Q., Wang, M., & Zhang, X. (2022). Co-pyrolysis biochar derived from sewage sludge and lignin: Synergetic effect and adsorption properties. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107898. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107898>
- Dalahmeh, S., Ahrens, L., Gros, M., Wiberg, K., & Pell, M. (2018). Potential of biochar filters for onsite sewage treatment: Adsorption and biological degradation of pharmaceuticals in laboratory filters with active, inactive and no biofilm. *Science of The Total Environment*, 612, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.178>
- Dalahmeh, S. S., Alziq, N., & Ahrens, L. (2019). Potential of biochar filters for onsite wastewater treatment: Effects of active and inactive biofilms on adsorption of per- and polyfluoroalkyl substances in laboratory column experiments. *Environmental Pollution*, 247, 155–164. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.032>
- Dong, L., Li, S., Jin, Y., Hu, B., & Sheng, G. (2021). Enhanced adsorption of Eu(III) from wastewater using Solidago canadensis-derived biochar functionalized by Ca/Al-LDH and hydroxyapatite. *Applied Surface Science*, 567, 150794. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150794>

- Ercole, F. F., Melo, L. S. de, & Alcoforado, C. L. G. C. (2014). Integrative review versus systematic review. *Remex: Revista Mineira de Enfermagem*, 18(1). <https://doi.org/10.5935/1415-2762.20140001>
- Escudero-Curiel, S., Penelas, U., Sanromán, M. Á., & Pazos, M. (2021). An approach towards Zero-Waste wastewater technology: Fluoxetine adsorption on biochar and removal by the sulfate radical. *Chemosphere*, 268, 129318. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129318>
- Fan, S., Wang, Y., Wang, Z., Tang, J., Tang, J., & Li, X. (2017). Removal of methylene blue from aqueous solution by sewage sludge-derived biochar: Adsorption kinetics, equilibrium, thermodynamics and mechanism. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1), 601–611. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.019>
- Fernandes, J. O., Bernardino, C. A. R., Mahler, C. F., Santelli, R. E., Braz, B. F., Borges, R. C., da Cunha Veloso, M. C., Romeiro, G. A., & Cincotto, F. H. (2021). Biochar Generated from Agro-Industry Sugarcane Residue by Low Temperature Pyrolysis Utilized as an Adsorption Agent for the Removal of Thiamethoxam Pesticide in Wastewater. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(2), 67. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05030-5>
- Fu, C., Zhu, X., Dong, X., Zhao, P., & Wang, Z. (2021). Study of adsorption property and mechanism of lead(II) and cadmium(II) onto sulfhydryl modified attapulgite. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(2), 102960. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.102960>
- Fu, X., Wang, P., Wu, J., Zheng, P., Wang, T., Li, X., & Ren, M. (2022). Hydrocotyle vulgaris derived novel biochar beads for phosphorus removal: Static and dynamic adsorption assessment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(4), 108177. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108177>
- Galus, M., Jeyaranjaan, J., Smith, E., Li, H., Metcalfe, C., & Wilson, J. Y. (2013). Chronic effects of exposure to a pharmaceutical mixture and municipal wastewater in zebrafish. *Aquatic Toxicology*, 132–133, 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2012.12.016>
- Hamadeen, H. M., & Elkhatib, E. A. (2022). New nanostructured activated biochar for effective removal of antibiotic ciprofloxacin from wastewater: Adsorption dynamics and mechanisms. *Environmental Research*, 210, 112929. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112929>
- Hashem, M. A., Hasan, M., Momen, M. A., Payel, S., & Nur-A-Tomal, M. S. (2020). Water hyacinth biochar for trivalent chromium adsorption from tannery wastewater. *Environmental and Sustainability Indicators*, 5, 100022. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100022>
- Hu, H., Zhang, J., Wang, T., & Wang, P. (2022). Adsorption of toxic metal ion in agricultural wastewater by torrefaction biochar from bamboo shoot shell. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130558>
- Inyang, M., & Dickenson, E. (2015). The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review. *Chemosphere*, 134, 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.072>
- Jiang, Y.-H., Li, A.-Y., Deng, H., Ye, C.-H., & Li, Y. (2019). Phosphate adsorption from wastewater using ZnAl-LDO-loaded modified banana straw biochar. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(18), 18343–18353. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05183-1>
- Kalderis, D., Kayan, B., Akay, S., Kulaksız, E., & Gözmen, B. (2017). Adsorption of 2,4-dichlorophenol on paper sludge/wheat husk biochar: Process optimization and comparison with biochars prepared from wood chips, sewage sludge and hog fuel/demolition waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), 2222–2231. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.04.039>
- Khalid, W., Cheng, C. K., Liu, P., Tang, J., Liu, X., Ali, A., Shahab, A., & Wang, X. (2022). Fabrication and characterization of a novel Ba²⁺-loaded sawdust biochar doped with iron oxide for the super-adsorption of SO₄²⁻ from wastewater. *Chemosphere*, 303, 135233. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135233>
- Komolafe, O., Mroziq, W., Dolfing, J., Acharya, K., Vassalle, L., Mota, C. R., & Davenport, R. (2021). Occurrence and removal of micropollutants in full-scale aerobic, anaerobic and facultative wastewater treatment plants in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 287, 112286. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112286>
- Konneh, M., Wandera, S. M., Murunga, S. I., & Raude, J. M. (2021). Adsorption and desorption of nutrients from abattoir wastewater: Modelling and comparison of rice, coconut and coffee husk biochar. *Heliyon*, 7(11), e08458. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08458>
- Kosaiyakanon, C., & Kungsant, S. (2020). Adsorption of Reactive Dyes from Wastewater Using Cationic Surfactant-modified Coffee Husk Biochar. *Environment and Natural Resources Journal*, 18(1), 21–32. <https://doi.org/10.32526/enrj.18.1.2020.03>
- Kumi, A. G., Ibrahim, M. G., Nasr, M., & Fujii, M. (2020). Synthesis, characterization and adsorption properties of sewage sludge derived biochar modified with eggshell. *2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ASET48392.2020.9118226>
- Lei, W., Li, T. T., Lv, N. Q., Liu, H., Zhang, Y., & Xi, B. D. (2019). Study on adsorption of lead by biochar prepared from sludge of municipal wastewater treatment plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 479, 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/479/1/012007>
- Li, A., Deng, H., Jiang, Y., & Ye, C. (2020). High-Efficiency Removal of Cr(VI) from Wastewater by Mg-Loaded Biochars: Adsorption Process and Removal Mechanism. *Materials*, 13(4), 947. <https://doi.org/10.3390/ma13040947>
- Li, J., Li, B., Huang, H., Zhao, N., Zhang, M., & Cao, L. (2020). Investigation into lanthanum-coated biochar obtained from urban dewatered sewage sludge for enhanced phosphate adsorption. *Science of The Total Environment*, 714, 136839. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136839>
- Li, J., Yu, G., Pan, L., Li, C., You, F., & Wang, Y. (2020). Ciprofloxacin adsorption by biochar derived from co-pyrolysis of sewage sludge and bamboo waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(18), 22806–22817. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08333-y>
- Li, X., & Shi, J. (2022). Simultaneous adsorption of tetracycline, ammonium and phosphate from wastewater by iron and nitrogen modified biochar: Kinetics, isotherm, thermodynamic and mechanism. *Chemosphere*, 293, 133574. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133574>

- Liao, J., Ding, L., Zhang, Y., & Zhu, W. (2022). Efficient removal of uranium from wastewater using pig manure biochar: Understanding adsorption and binding mechanisms. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127190. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127190>
- Lima, D. R. (2017). Adsorção do corante verde malaquita utilizando palha de milho modificada por ultrassom.
- Liu, T., Lawluy, Y., Shi, Y., Ighalo, J. O., He, Y., Zhang, Y., & Yap, P.-S. (2022). Adsorption of cadmium and lead from aqueous solution using modified biochar: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), 106502. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106502>
- Lv, B., Zhang, W., Xu, D., Li, S., Hu, J., & Fan, X. (2022). Influence of Different Metals on Production of Sewage Sludge-Based Biochar and Its Application for Ammonium and Phosphate Adsorption Removal from Wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 148(9), 04022051. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0002039](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0002039)
- Mamera, M., van Tol, J. J., & Aghoghovwia, M. P. (2022). Treatment of faecal sludge and sewage effluent by pinewood biochar to reduce wastewater bacteria and inorganic contaminants leaching. *Water Research*, 221, 118775. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118775>
- Marti, E., Variatza, E., & Balcasar, J. L. (2014). The role of aquatic ecosystems as reservoirs of antibiotic resistance. *Trends in Microbiology*, 22(1), 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2013.11.001>
- Nascimento, B. F., Araujo, C. M. B., Nascimento, A. C., Costa, G. R. B., Gomes, B. F. M. L., da Silva, M. P., da Silva Santos, R. K., & da Motta Sobrinho, M. A. (2021). Adsorption of Reactive Black 5 and Basic Blue 12 using biochar from gasification residues: Batch tests and fixed-bed breakthrough predictions for wastewater treatment. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100767. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100767>
- ONU. (2020). Mais de 4,2 bilhões de pessoas vivem sem acesso a saneamento básico. Organização Das Nações Unidas. <https://brasil.un.org/pt-br/101526-mais-de-42-bilh%C3%B5es-de-pessoas-vivem-sem-acesso-saneamento-b%C3%A1sico>
- Piekarski, J., Dąbrowski, T., Dąbrowski, J., & Ignatowicz, K. (2021). Preliminary studies on odor removal in the adsorption process on biochars produced. Regkouzas, P., & Diamadopoulos, E. (2019). Adsorption of selected organic micro-pollutants on sewage sludge biochar. *Chemosphere*, 224, 840–851. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.165>
- Salehi, E., Askari, M., Velashjerdi, M., & Arab, B. (2020). Phosphoric acid-treated Spent Tea Residue Biochar for Wastewater Decoloring: Batch Adsorption Study and Process Intensification using Multivariate Data-based Optimization. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 158, 108170. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2020.108170>
- Sewu, D. D., Lee, D. S., Woo, S. H., & Kalderis, D. (2021). Decolorization of triarylmethane dyes, malachite green, and crystal violet, by sewage sludge biochar: Isotherm, kinetics, and adsorption mechanism comparison. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 38(3), 531–539. <https://doi.org/10.1007/s11814-020-0727-7>
- Shafiq, M., Alazba, A. A., & Amin, M. T. (2021). Kinetic and Isotherm Studies of Ni²⁺ and Pb²⁺ Adsorption from Synthetic Wastewater Using *Eucalyptus camdulensis*—Derived Biochar. *Sustainability*, 13(7), 3785. <https://doi.org/10.3390/su13073785>
- Shang, W., Liu, Y., He, Q., Liu, S., Zhu, Y., Tong, T., & Liu, B. (2020). Efficient adsorption of organic matters and ions by porous biochar aerogel as pre-treatment of ultrafiltration for shale gas wastewater reuse. *Chemical Engineering Journal Advances*, 2, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100011>
- Shi, Y., Hu, H., & Ren, H. (2020). Dissolved organic matter (DOM) removal from biotreated coking wastewater by chitosan-modified biochar: Adsorption fractions and mechanisms. *Bioresource Technology*, 297, 122281. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122281>
- Silva, W. L., Muraro, P. C. L., Pavoski, G., Espinosa, D. C. R., & dos Santos, J. H. Z. (2022). Preparation and characterization of biochar from cement waste for removal of rhodamine B dye. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(4), 1333–1342. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01416-7>
- Singh, S., Prajapati, A. K., Chakraborty, J. P., & Mondal, M. K. (2021). Adsorption potential of biochar obtained from pyrolysis of raw and torrefied *Acacia nilotica* towards removal of methylene blue dye from synthetic wastewater. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01645-0>
- Sonu, K., Sogani, M., Syed, Z., Dongre, A., & Sharma, G. (2020). Enhanced Decolorization and Treatment of Textile Dye Wastewater Through Adsorption on Acid Modified Corn cob Derived Biochar. *ChemistrySelect*, 5(39), 12287–12297. <https://doi.org/10.1002/slct.202003156>
- Späth, J., Arumugam, P., Lindberg, R. H., Abafe, O. A., Jansson, S., Fick, J., & Buckley, C. A. (2021). Biochar for the removal of detected micropollutants in South African domestic wastewater: A case study from a demonstration-scale decentralised wastewater treatment system in eThekweni. *Water SA*, 47(4 October). <https://doi.org/10.17159/wsa/2021.v47.i4.3861>
- Steigerwald, J. M., & Ray, J. R. (2021). Adsorption behavior of perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto activated spent coffee grounds biochar in synthetic wastewater effluent. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 2, 100025. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2021.100025>
- Suleman, M., Zafar, M., Ahmed, A., Rashid, M. U., Hussain, S., Razzaq, A., Mohidem, N. A., Fazal, T., Haider, B., & Park, Y.-K. (2021). Castor Leaves-Based Biochar for Adsorption of Safranin from Textile Wastewater. *Sustainability*, 13(12), 6926. <https://doi.org/10.3390/su13126926>
- Tang, Y., Alam, M. S., Konhauser, K. O., Alessi, D. S., Xu, S., Tian, W., & Liu, Y. (2019). Influence of pyrolysis temperature on production of digested sludge biochar and its application for ammonium removal from municipal wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 209, 927–936. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.268>
- Tong, Y., Mayer, B. K., & McNamara, P. J. (2016). Triclosan adsorption using wastewater biosolids-derived biochar. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2(4), 761–768. <https://doi.org/10.1039/C6EW00127K>
- UNICEF. (2019). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2017. . Special focus on inequalities.

- Wang, G., Yang, R., Liu, Y., Wang, J., Tan, W., Liu, X., Jin, Y., & Qu, J. (2022). Adsorption of Cd(II) onto Auricularia auricula spent substrate biochar modified by CS2: Characteristics, mechanism and application in wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 367, 132882. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132882>
- Wang, H., Wang, H., Zhao, H., & Yan, Q. (2020). Adsorption and Fenton-like removal of chelated nickel from Zn-Ni alloy electroplating wastewater using activated biochar composite derived from Taihu blue algae. *Chemical Engineering Journal*, 379, 122372. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122372>
- Wang, M., Wang, G., Qian, L., Yong, X., Wang, Y., An, W., Jia, H., & Zhou, J. (2021). Biochar production using biogas residue and their adsorption of ammonium nitrogen and chemical oxygen demand in wastewater. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01510-0>
- Wang, X., Li, X., Liu, G., He, Y., Chen, C., Liu, X., Li, G., Gu, Y., & Zhao, Y. (2019). Mixed heavy metal removal from wastewater by using discarded mushroom-stick biochar: Adsorption properties and mechanisms. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 21(3), 584–592. <https://doi.org/10.1039/C8EM00457A>
- Xu, L., Wu, C., Chai, C., Cao, S., Bai, X., Ma, K., Jin, X., Shi, X., & Jin, P. (2022a). Adsorption of micropollutants from wastewater using iron and nitrogen co-doped biochar: Performance, kinetics and mechanism studies. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127606. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127606>
- Xu, Y., Xia, H., Zhang, Q., Jiang, G., Cai, W., & Hu, W. (2022). Adsorption of cadmium(II) in wastewater by magnesium oxide modified biochar. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(9), 104059. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104059>
- Xu, Z., Lin, Y., Lin, Y., Yang, D., & Zheng, H. (2021). Adsorption behaviors of paper mill sludge biochar to remove Cu, Zn and As in wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101616. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101616>
- Yang, G.-X., & Jiang, H. (2014). Amino modification of biochar for enhanced adsorption of copper ions from synthetic wastewater. *Water Research*, 48, 396–405. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.050>
- Yang, Z., Hu, W., Yao, B., Shen, L., Jiang, F., Zhou, Y., & Núñez-Delgado, A. (2021). A Novel Manganese-Rich Pokeweed Biochar for Highly Efficient Adsorption of Heavy Metals from Wastewater: Performance, Mechanisms, and Potential Risk Analysis. *Processes*, 9(7), 1209. <https://doi.org/10.3390/pr9071209>
- Yao, H., Lu, J., Wu, J., Lu, Z., Wilson, P. C., & Shen, Y. (2013). Adsorption of Fluoroquinolone Antibiotics by Wastewater Sludge Biochar: Role of the Sludge Source. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224(1), 1370. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1370-7>
- You, H., Lin, H., Li, Y., Yang, Y., Ma, Y., Shang, Z., & Niu, X. (2022). Iron-aluminum and aluminum-single impregnated biochar composite for nitrate adsorption in rare earth wastewater: Behavior and mechanism. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02148-8>
- Yu, K. L., Lau, B. F., Show, P. L., Ong, H. C., Ling, T. C., Chen, W.-H., Ng, E. P., & Chang, J.-S. (2017). Recent developments on algal biochar production and characterization. *Bioresour Technol*, 246, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.009>
- Yuan, J., Zhu, Y., Wang, J., Liu, Z., He, M., Zhang, T., Li, P., & Qiu, F. (2021). Facile Modification of Biochar Derived from Agricultural Straw Waste with Effective Adsorption and Removal of Phosphorus from Domestic Sewage. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 31(9), 3867–3879. <https://doi.org/10.1007/s10904-021-01992-5>
- Zago, L. (2015). Discussões sobre a questão ambiental na China: Impactos e perspectivas. CLIMACOM. <http://climacom.mudancasclimaticas.net.br/discussoes-sobre-a-questao-ambiental-na-china-impactos-e-perspectivas/>
- Zhang, M., Gao, B., Yao, Y., Xue, Y., & Inyang, M. (2012). Synthesis of porous MgO-biochar nanocomposites for removal of phosphate and nitrate from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 210, 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.08.052>
- Zhang, M., He, M., Chen, Q., Huang, Y., Zhang, C., Yue, C., Yang, L., & Mu, J. (2022). Feasible synthesis of a novel and low-cost seawater-modified biochar and its potential application in phosphate removal/recovery from wastewater. *Science of The Total Environment*, 824, 153833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153833>
- Zhang, X., Zhao, B., Liu, H., Zhao, Y., & Li, L. (2022). Effects of pyrolysis temperature on biochar's characteristics and speciation and environmental risks of heavy metals in sewage sludge biochars. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102288. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102288>
- Zhou, Y., Xu, M., Huang, D., Xu, L., Yu, M., Zhu, Y., & Niu, J. (2021). Modulating hierarchically microporous biochar via molten alkali treatment for efficient adsorption removal of perfluorinated carboxylic acids from wastewater. *Science of The Total Environment*, 757, 143719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143719>