

## **I-289 - UMA REVISÃO SOBRE BIOCHAR COMO MATERIAL EMERGENTE PARA ADSORÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS**

**Elizabeth Amaral Pastich Gonçalves<sup>(1)</sup>**

Bióloga pela Universidade Federal de Pernambuco. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. Professora adjunta da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste.

**Alanna Maria do Nascimento Bezerra<sup>(2)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste. Mestranda em Tecnologia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste.

**Artur Paiva Coutinho<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. Professor adjunto da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste. Professor permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste.

**Ana Cecília Vieira da Nóbrega<sup>(4)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Mestre em Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Professora adjunta da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste. Professora permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste.

**José Romualdo de Sousa Lima<sup>(5)</sup>**

Agrônomo pela Universidade Federal da Paraíba. Mestre em Manejo de Solo e Água pela Universidade Federal da Paraíba. Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares pela Universidade Federal de Pernambuco. Professor Associado I da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Garanhuns.

**Endereço<sup>(1,2,3,4 e 5)</sup>:** Rodovia BR-104, Km 59, s/n - Nova Caruaru, Caruaru - PE, 55002-970. E-mail<sup>(1)</sup> : [bethpastich@yahoo.com.br](mailto:bethpastich@yahoo.com.br)

### **RESUMO**

Biochar é um produto estável rico em carbono sintetizado pela pirólise da biomassa, seja ela de origem animal ou vegetal. Foi primeiramente designado para condicionamento de solo, com sequestro de carbono e aumento de fertilidade, porém suas características, como elevada área superficial, porosidade bem definida, capacidade de troca catiônica, tamanho dos grãos e grupos funcionais diversos, tornaram o biochar atrativo à aplicação em águas residuárias para a remediação de diversos poluentes. Essas características dependem diretamente da temperatura de pirólise, o tempo de queima e até mesmo do tipo de matéria-prima a ser utilizada na carbonização. Geralmente, altas temperaturas produzem um biochar efetivo como adsorvente de poluentes orgânicos por aumentar sua área superficial e elevar o volume dos poros. A utilização de biochar como adsorvente de corantes têxteis tem se tornado um interesse crescente nas recentes publicações. Esse estudo providencia uma revisão sobre as propriedades do biochar e sua eficiência como adsorvente de corantes têxteis, dando ênfase nas diversas possibilidades de produção do biochar, bem como seus benefícios econômicos em relação aos custos de produção. Por fim, destaca a possibilidade de substituição do carvão ativado pelo biochar, já que esse tem poder e eficiência de adsorção e o custo-benefício de aplicação é muito mais rentável.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biochar, Tratamento, Adsorvente, Contaminante.

## INTRODUÇÃO

Os processos de produção da indústria têxtil apresentam elevado consumo de água, o que implica na geração de efluentes com altas concentrações de DBO e DQO, vestígios de metais pesados, como cromo e zinco, e altas cargas de corantes (HOLKAR *et al.*, 2016; FAZAL *et al.*, 2018). Desse modo, se descartados indevidamente, os efluentes têxteis podem causar alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, sendo prejudiciais à saúde pública, flora, fauna e outras biodiversidades (YUKSELER *et al.*, 2017).

Devido à forte persistência e tratamentos carentes em eficiência de remoção, os corantes têxteis são, atualmente, considerados como uma das maiores problemáticas entre os contaminantes de água, sendo tóxicos, cancerígenos e mutagênicos (PRZYSTAS *et al.*, 2015; CHENG *et al.*, 2018). Corantes como Disperse Orange 37, Disperse Blue 373 e Disperse Violet 93, utilizados para tingir fibras sintéticas, foram detectados no meio aquático de regiões brasileiras como contribuintes da mutagenicidade das águas (CARNEIRO *et al.*, 2010) e corantes como Disperse Red 60, Disperse Red 73 e Disperse Red 78 induziram alterações bioquímicas em embriões de um tipo de peixe (MEIRELES *et al.*, 2018). Além disso, efluentes advindos dos processos de tingimento causaram severos impactos ecológicos e agravaram agudamente a qualidade da água de um rio mediterrâneo ao ponto de não haver vida marinha nos locais analisados em qualquer época do ano (COLIN *et al.*, 2016). A toxicidade dos corantes é tão agravante que um estudo acerca dos corantes azo do Sudão, utilizados ilegalmente para manter as cores de comidas diversas, sugere que esse produto afeta potencialmente a ecologia bacteriana intestinal humana (PAN *et al.*, 2012), assim como Direct Black 38 e Reactive Blue 15 causam toxicidade aguda e genotoxicidade para organismos aquáticos (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Os níveis de poluição que os corantes geram são alarmantes. Hossain, L. *et al.* (2018) realizaram uma projeção até 2021 assumindo que a carga de poluição ocasionada pelos processos de tingimento das indústrias têxteis em Bangladesh deva expandir 10% a cada ano. Diante dessa crítica situação, fica nítida a necessidade de tratamentos os quais devam remover com eficiência esse tipo de contaminante emergente dos efluentes em geral. Por exemplo, há a utilização de reatores anaeróbios do tipo UASB com processo Fenton indicando boa remoção de matéria orgânica e cor (SANTOS *et al.*, 2017), coagulação química seguida de lamelas, produzindo efluentes claros (ABDEL-FATAH *et al.*, 2015), utilização de microalga viva em suspensão (JIMENO *et al.*, 2017) e um sistema de fermentação em estado sólido (CHICATTO *et al.*, 2018) para descoloração de águas residuárias. No entanto, muitos tratamentos são custosos, demandam operações de alta performance e geram grandes quantidades de lodo o que resulta em dificuldades de descarte.

A adsorção é um dos mais importantes métodos para tratamentos de efluentes. O processo é, basicamente, realizado através de transferência de massa na qual a substância sólida (classificada como adsorvente) seleciona por meio de sua superfície e remove os constituintes dissolvidos em soluções aquosas, podendo ser uma técnica química ou física (KAUSAR *et al.*, 2018). No entanto, a eficiência do processo de adsorção depende das características do material utilizado como adsorvente, seja tamanho, estrutura e peso molecular, concentração do soluto, polaridade, porosidade bem definida, área superficial, temperatura do sistema e o pH do meio (VIDAL *et al.*, 2014; KAUSAR *et al.*, 2018).

Biochar é definido como um produto rico em carbono gerado a partir da pirólise controlada de biomassa sem a presença de oxigênio (LEHAMNN; JOSEPH, 2009). O biochar foi desenvolvido com a premissa de ser aplicado para remediações de contaminantes em solo (GWENZI *et al.*, 2015). Em contrapartida, esse material vem sendo aplicado como excelente adsorvente para vários tipos de poluentes em soluções aquosas (KUMAR *et al.*, 2016).

Dessa forma, o presente trabalho atua na revisão de literatura disponível a qual aborda a aplicação do biochar como adsorvente de corantes têxteis, bem como suas propriedades, vantagens e desvantagens de utilização e avaliação dos impactos ambientais.

## OBJETIVO

Realizar uma revisão de literatura sobre as várias possibilidades de utilização de biochar para adsorção de corantes têxteis como um material emergente, enfatizando suas principais propriedades, através de revisão bibliográfica.

## METODOLOGIA

A presente pesquisa foi fundamentada a partir de revisão de literatura em pesquisas nas plataformas Science Direct, Scopus e Periódicos Capes. Foram selecionados artigos que enfatizam a utilização do biochar como adsorvente de corantes têxteis. Os seguintes temas foram sistematizados nesta revisão: as propriedades adsorventes do biochar, quais variáveis afetam a dinâmica do processo e a eficiência do método, e, por fim, os diferentes materiais que podem ser aplicados como precursores para produção do biochar, ressaltando a viabilidade ambiental e econômica de materiais sustentáveis, transmitindo os principais tipos de corantes têxteis utilizados para realizar experimentos de adsorção.

## BIOCHAR E SUAS CARACTERÍSTICAS PROMISSORAS

A origem do biochar está conectada às antigas civilizações ameríndias na região da Amazônia. O material era popularmente nomeado como Terra Preta de Índio e produzido a partir de técnicas de corte e carbonização (LEHMANN; JOSEPH, 2009). Segundo Shackley *et al.* (2012), o biochar possui propriedades físico-químicas adequadas para armazenamento seguro e de longo prazo de carbono no meio ambiente. Esse material foi fabricado para ser utilizado como aperfeiçoamento das características do solo, com excelente alteração na fertilidade e sustentabilidade deste (GWENZI *et al.*, 2015; BUTNAN *et al.*, 2017). Além de aprimorar a fertilidade do solo, o biochar é empregado como alternativa para diversas funcionalidades ambientais, a saber: produção de bioenergia (LIU *et al.*, 2017), sequestro de carbono (LI, Y., 2016), imobilização de poluentes (MOHANTY *et al.*, 2014) e mitigação das mudanças climáticas (THERS *et al.*, 2019). No entanto, o biochar tornou-se um ingrediente com propriedades além das esperadas e, atualmente, atrai atenção para os segredos ocultos de suas qualidades.

O biochar é um produto obtido da pirólise de biomassa com temperaturas em torno de 200 a 900 °C e sua produção é caracterizada pela ausência de oxigênio no processo de aquecimento da matéria prima, produzindo matéria orgânica aromática estável com concentrações de carbono entre 70 a 80% (AHMAD *et al.*, 2014; ANAWAR *et al.*, 2015). Tipicamente, a temperatura da pirólise lenta para a formação do biochar está em torno de 500 °C, porém esse fator pode variar, dependendo das propriedades desejadas do produto (WEBER; QUICKER, 2018). Li, G. *et al.* (2016) obtiveram maior capacidade de adsorção em pirólise a 200 °C comparada a temperaturas mais elevadas, tornando a produção desse material mais barata. Por sua vez, Jing *et al.* (2018) analisaram um biochar produzido a partir de palha e obtiveram melhores resultados de adsorção em menor temperatura de pirólise, devido à maior área específica, volume bem definido de poros, teor de cinzas e polaridade.

O biochar possui como características atrativas a elevada área superficial, alta porosidade, carga variável e grupos funcionais diversos (ANAWAR *et al.*, 2015). Esses atributos podem mudar conforme o processo de pirólise, desde a temperatura até o tempo de queima da biomassa (KUMAR *et al.*, 20016). Banitalebi *et al.* (2019) concluíram que a pirólise de palha de trigo à 500 °C produziu um bom substrato para cultivos comerciais, realçando que o aumento dessa temperatura finalizaria um produto mais estável. Em contrapartida, Chandra e Bhattacharya (2019) enfatizaram que o aumento da temperatura de 400 para 700 °C diminuiu o rendimento do biochar produzido a partir da palha de arroz. Tratando-se das propriedades físicas do biochar, Cybulak *et al.* (2019) avaliaram que o tamanho dos grãos afetou propriedades como teor de carbono, cinzas, densidade, carga superficial total, energia média de adsorção e área superficial específica. Tais mudanças foram causadas pela pirólise incompleta das partículas, sendo o diâmetro de 0,5 mm caracterizado por representar as melhores propriedades.

A porosidade do biochar bem como sua área superficial variam substancialmente com a temperatura de pirólise. Cantrell *et al.* (2012) obtiveram um produto com maior volume de poros e área superficial com o aumento da temperatura. Em geral, o biochar é alcalino e seu pH aumenta com o acréscimo da temperatura de pirólise (CANTRELL *et al.*, 2012). No entanto, esse fator depende da matéria prima a ser utilizada na queima. Por exemplo, Hossain, M. *et al.* (2011) obtiveram biochar a partir de lodo de águas residuárias em baixa temperatura (<400 °C) com pH ácido. O efeito do pH na eficiência de adsorção do biochar é reforçado por Wang *et al.* (2018) que obtiveram resultados significativos de remoção do corante Methylene Blue explicados pela interação eletrostática. Fan, R. *et al.* (2019) detectaram maior adsorção de amônio em solução aquosa

através da influência do pH e de maiores forças iônicas. Nautiyal *et al.* (2016) alcançaram maior captação do corante Congo Red em pH ácido através de biochar produzido a partir de algas residuais.

Outro importante fator, principalmente para a otimização dos processos de adsorção do biochar, é o grupo funcional. Grupos carboxílico (-COOH), hidroxila (-OH), lactônico, amida e amina são essenciais para a capacidade de sorção do biochar (ANTÓN-HERRERO *et al.*, 2018). Ainda sobre os fatores que afetam a capacidade de sorção do biochar, o teor de carbono quanto a estrutura aromática desempenha papel preponderante para esse processo (CABRERA *et al.*, 2014; PIGNATELLO *et al.*, 2017). A alta estrutura de carbonização e aromatização tornam o biochar altamente estável contra o decaimento, o longo período de meia-vida, o que o torna difícil de ser decomposto e mineralizado. Por fim, a composição mineralógica é responsável pela capacidade de troca catiônica, considerável para o desempenho de sorção do biochar (DIAS *et al.*, 2010). Zhou *et al.* (2017) produziram um excelente biochar de baixo custo a partir da casca de banana fresca e desidratada via carbonização hidrotérmica a qual atribuiu alto conteúdo de grupos funcionais, facilitando a troca iônica. Munera-Echeverri *et al.* (2018) elucidam a carga negativa que o biochar possui, o que impulsiona a adsorção eletrostática de cátions. Quanto a capacidade de troca aniônica, pouco é conhecido sobre a estabilidade do biochar em relação a essa propriedade. Lawrinenko *et al.* (2016) concluíram que o envelhecimento de biochar produzido a partir farinha de alfafa, palha de milho e celulose afeta a capacidade de troca aniônica destes.

## **APLICAÇÕES DE DIFERENTES BIOCHARS PARA REMOÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS**

Os estudos publicados os quais tratam dos materiais precursores do biochar enfatizam a viabilidade do produto como excelente adsorvente, garantindo eficiência de remoção e baixo custo produtivo, sendo um material de fonte alternativa e altamente sustentável. As pesquisas são recentes e denotam a variabilidade de materiais precursores do biochar que se configuram, muitas vezes, como produtos surpreendentes quanto à eficiência de adsorção.

Como a sustentabilidade e os produtos *eco-friendly* estão assiduamente em voga atualmente, a possibilidade de utilizar diversos tipos de produtos para produção do biochar é totalmente atrativa do ponto de vista ambiental e econômico. Diante desse cenário oportuno, é possível encontrar biochar de resíduos de repolho coreano, palha de arroz e lascas de madeira para adsorção de Congo Red (CR) e Crystal Violet (CV), corantes esses utilizados como modelos aniônico e catiônico, respectivamente (SEWU *et al.*, 2017). Esse estudo utilizou 500 °C para temperatura de pirólise, o que configurou materiais com propriedades excelentes: as lascas de madeira produziram maior teor de carbono, bem como a maior taxa de hidrogênio; os resíduos de repolho coreano obtiveram maiores taxas de oxigênio e as maiores quantidades de cinzas, porém foi a matéria prima que gerou o menor conteúdo de carbono total. Com isso, os autores sugeriram que os resíduos de repolho coreano possivelmente possuíam maior afinidade de adsorção com o CV porque as altas taxas de oxigênio são um indicativo da carga superficial negativa do biochar produzido a partir dessa matéria prima, tornando-o um adsorvente barato e industrialmente viável para remoção de corante catiônico em água residuárias. A partir disso, os autores concluíram que os altos teores de cinza e os grupos funcionais são fatores de controle mais importantes que a área superficial.

Biochar de casca de noz-pecã foi utilizado na remoção de Reactive Red 141 (RR141) de soluções aquosas (ZAZYCKI *et al.*, 2018). A temperatura de pirólise foi de 800 °C, produzindo um produto com área superficial de 93 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>, o que é considerado um valor alto para esse tipo de derivação de biomassa, e com estrutura amorfa adequada para processos de adsorção de corantes, já que esse tipo de composição possui vazios o que permite a acomodação das moléculas do corante nesses espaços. A adsorção do RR141 foi favorecida sob condições ácidas com pH igual a 3, pois o adsorvente tornou-se positivamente carregado e o corante em uso possui carga negativa. A eficiência de remoção do biochar de noz pecã foi de 85%, enquanto que utilizando apenas a matéria prima bruta para a adsorção, esse valor cai para 23%. Os autores alertam para o processo espontâneo e favorável de adsorção entre o biochar e o corante, concluindo que o adsorvente foi eficiente e de baixo custo para o tratamento de efluentes líquidos.

Biochar de casca de caranguejo foi usado como um excelente e inesperado adsorvente para os corantes Congo Red (CR) e Malachite Green (MG), sendo corantes aniônico e catiônico, respectivamente (DAI *et al.*, 2018). Produzido com temperatura de pirólise igual a 800 °C, obteve-se área superficial de 81,57 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> e taxa de

carbono igual a 11,29%. Os autores alcançaram melhores condições de remoção para o CR sob condições ácidas, com o pH entre 3 e 4. Já para o MG, o maior índice de remoção se deu sob condições neutras a alcalinas, com o pH entre 7 a 10. Aqui torna-se importante salientar que o biochar produzido foi extremamente eficiente para a remoção dos dois tipos de corantes, sendo catiônico ou aniônico, o que implica em 12501,98 e 20317 mg/g de capacidade de adsorção para MG e CR, respectivamente. Os autores também enfatizam a rapidez do processo de sorção: menos de 2 minutos foram suficientes para garantir máxima taxa de remoção. Com isso, o estudo conclui que o biochar de casca de caranguejo foi muito promissor na aplicação prática, considerando sua fonte barata, processo de síntese simples e excelente desempenho de adsorção.

Biochar de ossos de galinha foi empregado para remoção de corante fluorescente Rhodamine B (RB) em águas residuárias (OLADIPO; IFEBAJO, 2018). Nesse estudo, o biochar foi modificado a partir de adição de cloretos e sulfatos de ferro. Dessa forma, o biochar foi ativado magneticamente. A área superficial do material foi de 328 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> obtida através de uma temperatura de pirólise igual a 500 °C. A máxima remoção (113,31 mg.g<sup>-1</sup>) ocorreu para pH igual a 10. Com uma concentração inicial de corante igual a 40 mg.L<sup>-1</sup> foi possível obter um rápido decréscimo aos primeiros 30 min do experimento, com eficiência de 85%. Os autores admitiram que essa eficiente redução é explicada pela disponibilidade de muitos locais de sorção na superfície do biochar modificado.

Biochar derivado de folhas de manga foi aplicado para adsorção de Crystal Violet (CV) (VYAVAHARE *et al.*, 2018). Nesse estudo, as temperaturas de pirólise variaram entre 400, 600 e 800 °C com concentração inicial de corante igual a 500 mg.L<sup>-1</sup>. À primeira análise, os autores concluíram que as temperaturas mais altas de pirólise eliminam os compostos voláteis da biomassa e resultam em um material poroso com uma área superficial maior para sorção de contaminantes orgânicos. Como previsto, o biochar derivado a partir da maior temperatura dentre as escolhidas apresentou maior eficiência de adsorção. O estudo ainda avaliou que a mudança de pH do ácido (pH 2) para o alcalino (pH 8) aumentou a capacidade de sorção do corante, promovendo carga negativa na superfície do biochar de folhas de manga, favorável à atração eletrostática do corante CV catiônico.

As possibilidades de produção de biochar são tão amplas e diversificadas que até mesmo o lodo derivado de outros tipos de tratamentos de águas residuárias pode ser utilizado como precursor. Fan, S. *et al.* (2017) produziram um biochar derivado de lodo de esgoto para remoção de Methylene Blue (MB), com temperatura de pirólise de 550 °C, obtendo 25 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> de área superficial com estrutura porosa bem definida. A dosagem do biochar foi extremamente importante para esse estudo. Os autores alcançaram 98% em eficiência de remoção com 6 a 8 g.L<sup>-1</sup> de biochar e o tempo de contato ótimo foi estabelecido entre 8 a 10 horas, alcançando aproximadamente 100% de eficiência. O efeito do pH para esse tipo de biochar foi crucial, já que com pH abaixo de 2 a eficiência era aproximadamente 85%. Porém, quando o pH aumentou para 10 a eficiência de remoção ampliou-se para 96% e quando mudou o pH apenas para 11, a eficiência foi quase 100%. Esses resultados concluíram que condições alcalinas favorecem a adsorção de MB para esse tipo de biochar. Todos esses resultados significativos comprovaram o efeito benéfico da utilização do biochar feito a partir do lodo como adsorvente, além de apresentar uma proposta para mitigação da carga ambiental do lodo de esgoto.

## BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DO USO DO BIOCHAR

Homagain *et al.* (2016) destacam que para um sistema de produção em larga escala baseado em pirólise lenta, o custo da queima (36%) é o estágio mais caro, precedido pelo armazenamento e processamento (14%), o que inclui coleta de matéria-prima (12%) e custo de transporte (9%). Porém, comparado a adsorventes tradicionais, o uso do biochar pode reduzir os custos de tratamento de água. Por exemplo, a tarifa imposta pela utilização da biomassa é de US\$246/ton, enquanto que utilizar carvão ativado custa US\$1500/ton (AHMAD *et al.*, 2012). A economia é explicada pela menor necessidade de energia e a nenhum processo de pré-ativação aplicado à produção de biochar.

Para colheita de eucalipto como biomassa, por exemplo, Daystar *et al.* (2014) estimaram custo de US\$24,80/ton. A densidade da biomassa e a distância percorrida afetaria o custo de transporte da matéria-prima, custando em média US\$0,26/milha para grama (KUNG *et al.*, 2013) e US\$0,64/milha para madeira de álamo (DAYSTAR *et al.*, 2014), por exemplo. Outro fator importante é o processamento da matéria-prima, ou seja, processos que minimizam os efeitos da umidade e contaminação do material. Como exemplo, tem-se o custo de



processamento da madeira de choupo estimado em US \$11,35/milha, o que inclui peneiramento, pulverização e secagem (KUNG *et al.*, 2013).

**Tabela 1.** Custos de matérias-primas para fabricação de biochar

<b>MATÉRIA-PRIMA</b>	<b>PREÇO (US \$/ton)</b>	<b>REFERÊNCIA</b>
Palha de arroz	39	Nguyen <i>et al.</i> (2016)
Palha de trigo	40	Zhang <i>et al.</i> (2014)
Palha de trigo	65	Littlewood <i>et al.</i> (2013)
Cryptomeria	34	Ning <i>et al.</i> (2013)
Briquete de palha de milho	139	Redl <i>et al.</i> (2017)

A Tabela 1 exemplifica o custo de algumas matérias-primas utilizadas para fabricação de biochar. O preço da biomassa pode variar significativamente, a depender do tempo, região, oferta e demanda e custos de transporte. Este último depende em muito da distância, mas sua influência é baixa na economia geral dos sistemas de produção de biochar (YOU; WANG, 2019).

## BIOCHAR OU CARVÃO ATIVADO?

Os processos de adsorção para tratamento de efluente estão se tornando populares devido ao intenso desenvolvimento de novos tipos de adsorventes eficazes. O carvão ativado demonstra ser excelente em remover micro poluentes orgânicos de águas residuárias (GUILLOSSOU *et al.*, 2019; FREIHARDT *et al.*, 2017), produtos farmacêuticos (DELGADO *et al.*, 2019), pesticidas (DERYLO-MARCZEWSKA *et al.*, 2019; SUO *et al.*, 2019) e corantes têxteis de diversos tipos como Malachite Green (QU *et al.*, 2019), Basic Blue 41 (AFSHIN *et al.*, 2018), Reactive Blue 4 (PUASA *et al.*, 2018) e Methylene Blue (KAZEEM *et al.*, 2018). No entanto, apesar do carvão ativado demonstrar vantagens adsorptivas, os problemas associados incluem alto consumo de energia durante a produção e alto custo variando entre US\$1100-1700/ton (THOMPSON *et al.*, 2016)). Consequentemente, é necessário a descoberta de materiais alternativos com baixo custo que comprovem a sustentabilidade dos processos de adsorção.

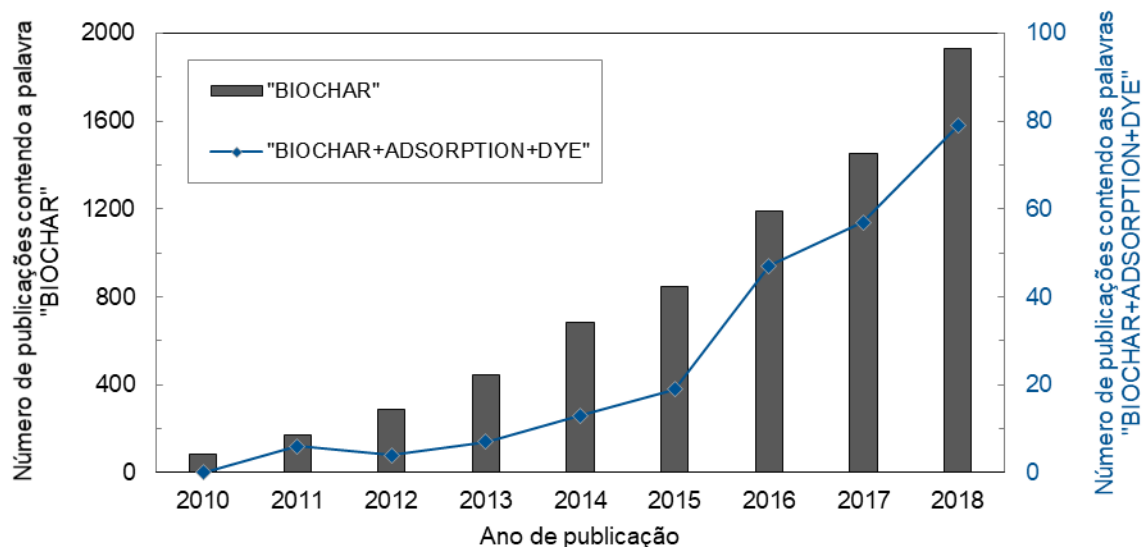
Neste cenário, o biochar tem sido considerado como um possível substituto do carvão ativado na remediação ambiental e no tratamento de águas residuárias, em consequência do seu baixo custo, abundância de matérias-primas e habilidades de sorção as quais encontram-se no mesmo patamar, ou até acima, do seu antecessor (KEARNS *et al.*, 2014).

Muitos estudos comprovam a eficiência superior do biochar ao carvão ativado. Por exemplo, Im *et al.* (2014) concluíram que o biochar mostrou-se mais eficiente à degradação de farmacêuticos. A maior capacidade de adsorção do biochar é efetivada por Huggins *et al.* (2016), afirmando que sua estrutura de macroporos é competente para tratamento de águas residuárias complexas e águas naturais complexas e que, portanto, os microporos do carvão ativado podem ser bloqueados por essas grandes matérias orgânicas.

Xu *et al.* (2016) comprovaram a eficiência de adsorção de dois tipos de biochar produzidos a partir de bagaço e lascas de madeira para remoção de mercúrio Hg (II) em comparação ao carvão ativado. Os autores concluíram que a adsorção das biomassas foi atribuída aos grupos funcionais hidroxila fenólico (CO<sup>-</sup>) e carboxílico (COO<sup>-</sup>). Ainda assim, os autores evidenciaram a necessidade de processos mais custosos para fabricação do carvão ativado, requerendo mais energia, enquanto que o biochar é produzido a temperaturas mais baixas, consumindo menos energia e sendo uma alternativa de custo-benefício mais rentável.

Alhashimi e Aktas (2017) avaliaram, através de uma meta-análise, o desempenho ambiental e econômico do biochar em comparação ao carvão ativado para adsorver metais pesados. Os autores concluíram que o biochar possui menor demanda de energia e impacto potencial de aquecimento global do que o carvão ativado, sendo a demanda média de energia 6,1 MJ/kg e 97 MJ/kg e média de emissões de gases de efeito estufa calculado como -0,9 kg CO<sub>2</sub>eq/kg e 6,6 CO<sub>2</sub>eq/kg para o biochar e o carvão ativado, respectivamente.

Assim sendo, é notável que há interesses consideráveis ao uso do biochar para remover poluentes de soluções aquosas, principalmente porque este material é amplamente difundido para remoção de diversos corantes têxteis. O número de publicações em revistas indexadas contendo a palavra-chave “BIOCHAR” tem se desenvolvido entre os anos 2010 e 2018, possibilitando uma expectativa de que esse assunto ganhe mais força de publicação nos anos seguintes (Figura 1). Os estudos que possuem as palavras-chave “BIOCHAR+ADSORPTION+DYE” também receberam bastante atenção entre esses anos, considerando a alta carga poluidora dos corantes e a possibilidade de aplicar um método de remoção com um custo-benefício atrativo.



**Figura 1.** Evolução do número de publicações em revistas contendo as palavras-chave “BIOCHAR” e “BIOCHAR+ADSORPTION+DYE” entre 2010 e 2018.

O carvão ativado sempre recebeu os enfoques para tratamentos por adsorção, porém, em comparação, o biochar surge como um novo potencial e efetivo adsorvente, uma vez que sua produção é mais barata. As propriedades específicas do biochar, as quais incluem grupos funcionais, componentes minerais e estrutura porosa bem definida, torna possível sua utilização na validação da eficiência de remoção de contaminantes em soluções aquosas.

## CONCLUSÃO

Diante destes resultados expostos, é notável a relevância do biochar como material adsorvente. Um lado parte do pressuposto de que há a problemática de contaminação exacerbada de efluentes têxteis, os quais contêm concentrações elevadas de corantes, e devem ser tratados adequadamente para que então sejam descartados de forma correta. Por outro lado, a importância da utilização de materiais altamente sustentáveis para realizar esses tratamentos de forma eficiente e, por fim, a excelente variabilidade de produção do biochar, com aproveitamento dos mais diversos materiais, o que pode ser visto como uma alternativa de ganho dos pontos de vista ambiental e econômico. Todos os estudos consultados nessa revisão sobre a aplicação de biochar como adsorvente apontam para a mesma conclusão de que esse material é totalmente viável para o processo de adsorção. Isso é explicado não somente pela excelente habilidade de adsorção, mas também pelos benefícios econômicos e ambientais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo incentivo e suporte financeiro fornecido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDEL-FATAH, M.A., SHERIF, H.O., AGOUR, F., HAWASH, S.I. *Textile wastewater treatment by chemical coagulation technology. Global Journal of Advanced Engineering Technologies and Sciences*, v.2, n.12, p. 20-28, dez. 2015.
2. AFSHIN, S., MOKHTARI, S. A., VOSOUGHI, M., SADEGHI, H., RASHTBARI, Y. *Data of adsorption of Basic Blue 41 dye from aqueous solutions by activated carbon prepared from filamentous algae. Data in Brief*, v.21, p. 1008-1013, dez. 2018.
3. AHMAD, M., LEE, S. S., DOU, X., MOHAN, D., SUNG, J. K., YANG, J. E., OK, Y. S. *Effects of pyrolysis temperature on soybean stover and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. Bioresource Technology*, v.118, p. 536-544, ago. 2012.
4. AHMAD, M., RAJAPAKSHA, A. U., LIM, J. E., ZHANG, M., BOLAN, N., MOHAN, D., VITHANAGE, M., LEE, S. S., OK, Y. S. *Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. Chemosphere*, v.99, p. 19-33, mar. 2014.
5. ALHASHIMI, H. A., AKTAS, C. B. *Life cycle environmental and economic performances of biochar compared with activated carbon: A meta-analysis. Resources, Conservation and Recycling*, v.118, p. 13-26, mar. 2017.
6. ANAWAR, H. M., AKTER, F., SOLAIMAN, Z. M., STREZOV, V. *Biochar: an emerging panacea for remediation of soil contaminants from mining, industry and sewage wastes. Pedosphere*, v.25, n.5, p. 654-665, jul. 2015.
7. ANTÓN-HERRERO, R., GARCÍA-DELGADO, C., ALONSO-IZQUIERDO, M., GARCÍA-RODRÍGUEZ, G., CUEVAS, J., EYMAR, E. *Comparative adsorption of tetracyclines on biochar and stevensite: Looking for the most effective adsorbent. Applied Clay Science*, v.160, p. 162-172, ago. 2018.
8. BANITALEBI, G., MOSADDEGHI, M. R., SHARIATMADARI, H. *Feasibility of agricultural residues and their biochar for plant growing media: Physical and hydraulic properties. Waste Management*, v.87, p. 577-589, mar. 2019.
9. BUTNAN, S., DEENIK, J. L., TOOMSAN, B., VITYAKON, P. *Biochar properties affecting carbon stability in soils contrasting in texture and mineralogy. Agriculture and Natural Resources*, v.51, n.6, p. 492-498, dez. 2017.
10. CABRERA, A., COX, L., SPOKAS, K., HERMOSÍN, M. C., CORNEJO, J., KOSKINEN, W. C. *Influence of biochar amendments on the sorption-desorption of aminocyclopyrachlor, bentazone and pyraclostrobin pesticides to na agricultural soil. Science of the Total Environment*, v.470-471, p. 438-443, fev. 2014.
11. CANTRELL, K. B., HUNT, P. G., UCHIMIYA, M., NOVAK, J. M., RO, K. S. *Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. Bioresource Technology*, v.107, p. 419-428, mar. 2012.
12. CARNEIRO, P.A., UMBUZEIRO, G.A., OLIVEIRA, D.P., ZANONI, M.V.B. *Assessment of water contamination caused by a mutagenic textile effluent/dyehouse effluent bearing disperse dyes. Journal of Hazardous Materials*, v.174, n.1-3, p. 694-699, fev. 2010.
13. CHANDRA, S., BHATTACHARYA, J. *Influence of temperature and duration of pyrolysis on the property heterogeneity of rice straw biochar and optimization of pyrolysis conditions for its application in soils. Journal of Cleaner Production*, v.215, p. 1123-1139, jan. 2019.
14. CHENG, S., ZHANG, L., MA, A., XIA, H., PENG, J., LI, C., SHU, J. *Comparison of activated carbon and iron/cerium modified activated carbon to remove methylene blue from wastewater. Journal of Environmental Sciences*, v.65, p. 92-102, mar. 2018.
15. CHICATTO, J.A., RAINER, K.T., GONÇALVES, M.J., HELM, C.V., ALTMAJER-VAZ, D., TAVARES, B.B. *Decolorization of textile industry wastewater in solid state fermentation with Peach-Palm (Bactris gasipaes) residue. Brazilian Journal of Biology*, v.78, n.4, p. 718-727, fev. 2018.
16. COLIN, N., MACEDA-VEIGA, A., FLOR-ARNAU, N., MORA, J., FORTUÑO, P., VIEIRA, C., PRAT, N., CAMBRA, J., SOSTOSA, A. *Ecological impact and recovery of a Mediterranean river after receiving the effluent from a textile dyeing industry. Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 132, p. 295-303, out. 2016.
17. CYBULAK, M., SOKOŁOWSKA, Z., BOGUTA, P., TOMCZUK, A. *Influence of pH and grain size on physicochemical properties of biochar and released humic substances. Fuel*, v.240, p. 334-338, mar. 2019.



18. DAI, L., ZHU, W., HE, L., TAN, F., ZHU, N., ZHOU, Q., HE, M., HU, G. *Calcium-rich biochar from crab shell: an unexpected super adsorbent for dye removal. Bioresource Technology*, v.267, p. 510-516, nov. 2018.
19. DAYSTAR, J., GONZALEZ, R., REEB, C., VENDITTI, R., TREASURE, T., ABT, R., KELLEY, S. *Economics, environmental impacts, and supply chain analysis of cellulosic biomass for biofuels in the Southern US: Pine, eucalyptus, unmanaged hardwoods, forest residues, switchgrass, and sweet sorghum. BioResources*, v.9, n.1, p. 393-444, 2014.
20. DELGADO, N., CAPPARELLI, A., NAVARRO, A., MARINO, D. *Pharmaceutical emerging pollutants removal from water using powdered activated carbon: Study of kinetics and adsorption equilibrium. Journal of Environmental Management*, v.236, p. 301-308, abr. 2019.
21. DERYLO-MARCZEWSKA, A., BLACHNIO, M., MARCZEWSKI, A. W., SECZKOWSKA, M., TARASIUK, B. *Phenoxyacid pesticide adsorption on activated carbon – Equilibrium and kinetics. Chemosphere*, v.214, p. 349-360, jan. 2019.
22. DIAS, B. O., SILVA, C. A., HIGASHIKAWA, F. S., ROIG, A., SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A. *Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification. Bioresource Technology*, v.101, n.4, p. 1239-1246, fev. 2010.
23. FAN, R., CHEN, C-I., LIN, J-y., TZENG, J-h., HUANG, C-p., DONG, C., HUANG, C.P. *Adsorption characteristics of ammonium ion onto hydrous biochars in dilute aqueous solutions. Bioresource Technology*, v. 272, p. 465-472, jan. 2019.
24. FAN, S., WANG, Y., WANG, Z., TANG, J., TANG, J., LI, X. *Removal of methylene blue from aqueous solution by sewage sludge-derived biochar: Adsorption kinetics, equilibrium, thermodynamics and mechanism. Journal of Environmental Chemical Engineering*, v.5, n.1, p. 601-611, fev. 2017.
25. FAZAL, T., MUSHTAQ, A., REHMAN, F., KHAN, A.U., RASHID, N., FAROOQ, W., REHMAN M.S.U., XU, J. *Bioremediation of textile wastewater and successive biodiesel production using microalgae. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.82, n.3, p. 3107-3126, fev. 2018.
26. FREIHARDT, J., JEKEL, M., RUHL, A. S. *Comparing test methods for granular activated carbon for organic micropollutant elimination. Journal of Environmental Chemical Engineering*, v.5, n.3, p. 2542-2551, jun. 2017.
27. GUILLOSSOU, R., LE ROUX, J., MAILLER, R., VULLIET, E., MORLAY, C., NAULEAU, F., GASPERI, J., ROCHER, V. *Organic micropollutants in a large wastewater treatment plant: What are the benefits of an advanced treatment by activated carbon adsorption in comparison conventional treatment? Chemosphere*, v.218, p. 1050-1060, mar. 2019.
28. GWENZI, W., CHAUKURA, N., MUKOME, F.N.D., MACHADO, S., NYAMASOKA, B. *Biochar production and applications in sub-Saharan Africa: Opportunities, constraints, risks and uncertainties. Journal of Environmental Management*, v.150, p. 250-261, mar. 2015.
29. HOLKAR, C.R., JADHAV, A.J., PINJARI, D.V., MAHAMUNI, N.M., PANDIT, A. B. *A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. Journal of Environmental Management*, v.182, p. 351-366, mar. 2016.
30. HOMAGAIN, K., SHAHI, C., LUCKAI, N., SHARMA, M. *Life cycle cost and economic assessment of biochar-based bioenergy production and biochar lan application in Northwestern Ontario, Canada. Forest Ecosystems*, v.3, n.21, p. 1-10, set. 2016.
31. HOSSAIN, L., SARKER, S.K., KHAN, M.S. *Evaluation of present and future wastewater impacts of textile dyeing industries in Bangladesh. Environmental Development*, v.26, p. 23-33, jun. 2018.
32. HOSSAIN, M. K., STREZOV, V., CHAN, K. Y., ZIOLKOWSKI, A., NELSON, P. F. *Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. Journal of Environmental Management*, v.92, p. 223-228, jan. 2011.
33. HUGGINS, T. M., HAEGER, A., BIFFINGER, J. C., REN, Z. J. *Granular biochar compared with activated carbon for wastewater treatment and resource recovery. Water Research*, v.94, p. 225-232, maio. 2016.
34. IM, J. K., BOATENG, L. K., FLORA, J. R. V., HER, N., ZOH, K. D., SON, A., YOON, Y. *Enhanced ultrasonic degradation of acetaminophen and naproxen in the presence of powdered activated carbon and biochar adsorbents. Separation and Purification Technology*, v.123, p. 96-105, fev. 2014.
35. JIMENO, V.A.V., MERCADO, E.R.A., BALLESTEROS, D.M.P., YÉPEZ, J.G.T., VEGA, M.E.P. *Uso de la microalga Chlorella sp. viva em suspensión en la decoloración del agua residual de uma empresa têxtil. Prospect*, v.15, n.1, p. 93-99, jan. 2017.

36. JING, F., SOHI, S.P., LIU, Y., CHEN, J. *Insight into mechanism of aged biochar for adsorption of PAEs: Reciprocal effects of ageing and coexisting Cd<sup>2+</sup>*. *Environmental Pollution*, v.242, p. 1098-1107, ago. 2018.
37. KAUSAR, A., IQBAL, M., JAVED, A., AFTAB, K., NAZLI, Z. H., BHATTI, H. N., NOUREN, S. *Dyes adsorption using clay and modified clay: A review*. *Journal of Molecular Liquids*, v.256, p. 305-477, abr. 2018.
38. KAZEEM, T. S., LATEEF, S. A., GANIYU, S. A., QAMARUDDIN, M., TANIMU, A., SULAIMAN, K. O., JILLANI, S. M. S., ALHOOSHANI, K. *Aluminium-modified activated carbon as efficient adsorbent for cleaning of cationic dye in wastewater*. *Journal of Cleaner Production*, v.205, p. 303-312, dez. 2018.
39. KEARNS, J. P., WELBORN, L. S., SUMMERS, R. S., KNAPPE, D. R. U. *2,4-D adsorption to biochars: Effect of preparation conditions on equilibrium adsorption capacity and comparison with commercial activated carbon literature data*. *Water Research*, v.62, p. 20-28, out. 2014.
40. KUMAR, A., SCHREITER, I.J., WEFER-ROEHL, A., TSECHANSKY, L., SCHÜTH, C., GRABER, E.R. *Chapter 5 - Production and utilization of biochar from organic wastes for pollutant control on contaminated sites*. *Resource Recovery and Pollution Prevention*, p. 91-116, 2016.
41. KUNG, C. C., MCCARL, B. A., CAO, X. *Economics of pyrolysis-based energy production and biochar utilization: A case study in Taiwan*. *Energy Policy*, v.60, p. 317-323, set. 2013.
42. LAWRENKO, M., LAIRD, D. A., JOHNSON, R. L., JING, D. *Accelerated aging of biochars: Impact on anion exchange capacity*. *Carbon*, v.103, p. 217-227, jul. 2016.
43. LEHMANN, J., JOSEPH, S. *Biochar for environmental management: an introduction*. In: *Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), Biochar for Environmental Management Science and Technology*. Earthscans, UK, pp. 1-12.
44. LI, G., ZHU, W., ZHANG, C., ZHANG, S., LIU, L., ZHU, L., ZHAO, W. *Effect of a magnetic field on the adsorptive removal of methylene blue onto wheat straw biochar*. *Bioresource Technology*, v.206, p. 16-22, jan. 2016.
45. LI, Y., RUAN, G., JALILOV, A. S., TARKUNDE, Y. R., FEI, H., TOUR, J. M. *Biochar as a renewable source for high-performance CO<sub>2</sub> sorbent*. *Carbon*, v.107, p. 344-351, out. 2016.
46. LITTLEWOOD, J., MURPHY, R. J., WANG, L. *Importance of policy support and feedstock prices on economic feasibility of bioethanol production from wheat straw in the UK*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.17, p. 291-300, jan. 2013.
47. LIU, Y., HE, P., SHAO, L., ZHANG, H., LÜ, F. *Significant enhancement by biochar of caproate production via chain elongation*. *Water Research*, v.119, p. 150-159, ago. 2017.
48. MEIRELES, G., DAAM, M.A., SANCHES, A.L.M., ZANONI, M.V.B., SOARES, A.M.V.M., GRAVATO, C., OLIVEIRA, D.P. *Red disperse dyes (DR 60, DR 73, and DR 78) at environmentally realistic concentrations impact biochemical profile of early life stages of zebrafish (Danio rerio)*. *Chemico-Biological Interactions*, v.292, p. 94-100, ago. 2018.
49. MOHANTY, S. K., CANTRELL, K. B., NELSON, K. L., BOEHM, A. B. *Efficacy of biochar to remove Escherichia coli from stormwater under steady and intermittent flow*. *Water Research*, v.61, p. 288-296, set. 2014.
50. MUNERA-ECHEVERRI, J. L., MARTINSEN, V., STRAND, L. T., ZIVANOVIC, V., CORNELISSEN, G., MULDER, J. *Cation Exchange capacity of biochar: An urgent method modification*. *Science of the Total Environment*, v.642, p. 190-197, nov. 2018.
51. NAUTIYAL, P., SUBRAMANIAN, K.A., DASTIDAR, M.G. *Adsorptive removal of dye using biochar derived from residual algae after in-situ transesterification: Alternate use of waste of biodiesel*. *Journal of Environmental Management*, v.182, p. 187-197, jul. 2016.
52. NGUYEN, V. H., TOPNO, S., BALINGBING, C., NGUYEN, V. C. N., RÖDER, M., QUILTY, J., JAMIESON, C., THORNLEY, P., GUMMERT, M. *Generating a positive energy balance from using rice straw for anaerobic digestion*. *Energy Reports*, v.2, p. 117-122, maio. 2016.
53. NING, S. K., HUNG, M. C., CHANG, Y. H., WAN, H. P., LEE, H. T., SHIH, R. F. *Benefit assessment of cost, energy, and environment for biomass pyrolysis oil*. *Journal of Cleaner Production*, v.59, p. 141-149, jul. 2013.
54. OLADIPO, A.A., IFEBAJO, A.O. *Highly efficient magnetic chicken bone biochar for removal of tetracycline and fluorescent dye from wastewater: Two-stage adsorber analysis*. *Journal of Environmental Management*, v.209, p. 9-16, mar. 2018.
55. OLIVEIRA, G.A.R., LEME, D.M., LAPUENTE, J., BRITO, L.B., PORREDÓN, C., RODRIGUES, L.B., BRULL, N., SERRET, J.T., BORRÀS, M., DISNER, G.R., CESTARI, M.M., OLIVEIRA, D.P. A

- test for assessing the ecotoxic effects of textile dyes. *Chemico-Biological Interactions*, v.291, p. 171-179, ago. 2018.
56. PAN, H., FENG, J., HE, G.X., CERNIGLIA, C.E., CHEN, H. *Evaluation of impact of exposure of Sudan azo dyes and their metabolites on human intestinal bacteria. Anaerobe*, v.18, n.4, p. 445-453, ago. 2012.
  57. PIGNATELLO, J. J., MITCH, W. A., XU, W. *Activity and reactivity of pyrogenic carbonaceous matter toward organic compounds. Environmental Science and Technology*, v.51, n.16, p. 8893-8908, jul. 2017.
  58. PRZYSTAS, W., ZABLOCKA-GODLEWSKA, E., GRABINSKA-SOTA, E. *Efficacy of fungal decolorization of a mixture of dyes belonging to different classes. Brazilian Journal of Microbiology*, v.46, n.2, p. 415-424, 2015.
  59. PUASA, S. W., ISMAIL, K. N., KHAIRI, N. A. I. A. *Cleavable surfactant-impregnated activated carbon for enhanced adsorptive removal of reactive dye from an aqueous solution. Materials Today: Proceedings*, v.5, n.10, p. 22020-22028, 2018.
  60. QU, W., YUAN, T., YIN, G., XU, S., ZHANG, Q., SU, H. *Effect of properties of activated carbon on Malachite Green adsorption. Fuel*, v.249, p. 45-53, mar. 2019.
  61. REDL, S., SUKUMARA, S., PLOEGER, T., WU, L., JENSEN, T. Ø., NIELSEN, A. T., NOORMAN, H. *Thermodynamics and economic feasibility of acetone production from syngas using the thermophilic production host Moorella thermoacetica. Biotechnology for Biofuels*, v.10, n.150, p. 1-17, jun. 2017.
  62. SANTOS, E.M.A., NASCIMENTO, A.P., PAULINO, T.R.S., BARROSO, B.C.S., AGUIAR, C.R. *Reator anaeróbio tipo UASB conjugado com processo Fenton para remoção de cor e demanda química de oxigênio de água residuária sintética de indústria têxtil. Eng. Sanit. Ambient.*, v.22, n.2, p. 285-292, mar. 2017.
  63. SEWU, D.D., BOAKYE, P., WOO, S.H. *Highly efficient adsorption of cationic dye by biochar produced with Korean cabbage waste. Bioresource Technology*, v.224, p. 206-213, jan. 2017.
  64. SHACKLEY, S., CARTER, S., KNOWLES, T., MIDDELINK, E., HAEFELE, S., SOHI, S., CROSS, A. HASZELDINE, S. *Sustainable gasification-biochar systems? A case-study of rice-husk gasification in Cambodia, Part I: Context, chemical properties, environmental and health and safety issues. Energy Policy*, v.42, p. 49-58, mar. 2012.
  65. SUO, F., LIU, X., LI, C., YUAN, M., ZHANG, B., WANG, J., MA, Y., LAI, Z., JI, M. *Mesoporous activated carbon from starch for superior rapid pesticides removal. International Journal of Biological Macromolecules*, v.121, p. 806-813, jan. 2019.
  66. THERS, H., DJOMO, S. N., ELSGAARD, L., KNUDSEN, M. T. *Biochar potentially mitigates greenhouse gas emissions from cultivation of oilseed rape for biodiesel. Science of the Total Environment*, v.671, p. 180-188, mar. 2019.
  67. THOMPSON, K. A., SHIMABUKU, K. K., KEARNS, J. P., KNAPPE, D. R. U., SUMMERS, R. S., COOK, S. M. *Environmental comparison of biochar and activated carbon for tertiary wastewater treatment. Environmental Science and Technology*, v.50, n.20, p. 11253-11262, set. 2016.
  68. VIDAL, C.B., LIMA, A.C.A., RAULINO, G.S.C., MELO, D.Q., NASCIMENTO, R.F. *Princípios básicos. In: Adsorção – aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária*, 2014.
  69. VYAVAHARE, G., JADHAV, P., JADHAV, J., PATIL, R., AWARE, C., PATIL, D., GOPHANE, A., YANG, Y.H., GURAV, R. *Strategies for crystal violet dye sorption on biochar derived from mango leaves and evaluation of residual dye toxicity. Journal of Cleaner Production*, v.207, p. 296-305, out. 2018.
  70. WANG, Y., ZHANG, Y., LI, S., ZHONG, W., WEI, W. *Enhanced methylene blue adsorption onto activated reed-derived biochar by tannic acid. Journal of Molecular Liquids*, v.268, p. 658-666, jul. 2018.
  71. WEBER, K., QUICKER, P. *Properties of biochar. Fuel*, v.217, p. 240-261, abr. 2018.
  72. XU, X., SCHIERZ, A., XU, N., CAO, X. *Comparison of the characteristics and mechanisms of Hg(II) sorption by biochars and activated carbon. Journal of Colloid and Interface Science*, v.463, p. 55-60, fev. 2016.
  73. YOU, S., WANG, X. *Chapter 20 – On the carbon abatement potential and economic viability of biochar production systems: Cost-benefit and life cycle assessment. Biochar from Biomass and Waste*, p. 385-408, 2019.
  74. YUKSELER, H., UZAL, N., SAHINKAYA, E., KITIS, M., DILEK, F.B., YETIS, U. *Analysis of the best available techniques for wastewater from a denim manufacturing textile mill. Journal of Environmental Management*, v.203, n.3, p. 1118-1125, dez. 2017.

75. ZAZYCKI, M.A., GODINHO, M., PERONDI, D., FOLETTTO, E.I., COLLAZZO, G.C., DOTTO, G.L. *New biochar from pecan nutshells as an alternative adsorbent for removing reactive red 141 from aqueous solutions. Journal of Cleaner Production*, v.171, p. 57-65, jan. 2018.
76. ZHANG, Q., ZHOU, D., FANG, X. *Analysis on the policies of biomass power generation in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.32, p. 926-935, fev. 2014.
77. ZHOU, N., CHEN, H., XI, J., YAO, D., ZHOU, Z., TIAN, Y., LU, X. *Biochars with excellent PB(ii) adsorption property produced from fresh and dehydrated banana peels via hydrothermal carbonization. Bioresource Technology*, v.232, p. 204-210, fev. 2017.