

APLICAÇÃO DE ADSORVENTES NA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES ORIUNDOS DE PRÁTICAS AGRÍCOLAS

APLICACIÓN DE ADSORBENTES EN LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES DERIVADOS DE PRÁCTICAS AGRÍCOLAS

APPLICATION OF ADSORBENTS IN THE REMOVAL OF CONTAMINANTS ARISING FROM AGRICULTURAL PRACTICES

Afonso Henrique da Silva Júnior¹; Carlos Rafael Silva de Oliveira²; Lisandro Simão³; Patrícia Viera de Oliveira⁴; Leandro Pellenz⁵

DOI: <https://doi.org/10.31692/IIICIAGRO.0107>

RESUMO

Nas últimas décadas, a intensificação das práticas agrícolas no planeta vêm desencadeando diversos impactos negativos ao meio ambiente, principalmente devido a liberação de contaminantes provenientes dos defensivos agrícolas. A tendência é que aumente ainda mais a carga de agroquímicos na lavoura devido o rápido crescimento da população mundial. De acordo com órgãos internacionais, a expectativa para o ano de 2050 é que a população mundial alcance o número de 10 bilhões de pessoas. Ou seja, a agricultura vai permanecer um dos principais segmentos responsável por suprir toda a demanda de alimentos e matérias-primas para incontáveis processos industriais. Contudo, infelizmente, a liberação descontrolada de poluentes ao meio ambiente originários das lavouras está se tornando um problema em potencial para a manutenção da vida na terra. Assim, ao longo dos anos, algumas doenças podem se tornar recorrente nos organismos vivos devido a presença de compostos nocivos em alimentos e na água. Diante disso, o desenvolvimento de estratégias para reverter esse cenário e a aplicação de processos para a remediação ambiental são tendências na pesquisa científica. Além disso, cada vez mais está havendo o investimento de organizações públicas e privadas nessa temática. Hoje em dia, existem inúmeros processos utilizados para a remoção de poluentes da natureza, por exemplo, a adsorção. A adsorção é uma alternativa bastante aplicada e eficiente na descontaminação ambiental. As vantagens dos processos adsorptivos são diversos, por exemplo, o baixo custo de produção e de consumo energético. Assim, o presente artigo de revisão objetiva apresentar os principais tipos de materiais usados na produção de adsorventes, discutir pesquisas recentes que utilizaram o processo de adsorção para a remoção de poluentes oriundos de lavouras (pesticidas e metais), limitações e tendências do uso desses materiais na remediação ambiental. Além disso, o propósito desta revisão foi apresentar as possibilidades do uso de princípios da química verde na produção de adsorventes e a utilização de resíduos agroindustriais na fabricação de materiais na descontaminação ambiental.

¹ Engenheiro Agroindustrial-Agroquímico (Universidade Federal do Rio Grande – FURG), Mestre em Engenharia Química, Doutorando em Engenharia Química (Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC), afonso.silva@posgrad.ufsc.br

² Engenheiro Têxtil (Universidade Estadual de Maringá – UEM), Doutor em Engenharia Química (Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC), carlos.oliveira@ufsc.br

³ Engenheiro Ambiental e Sanitarista (Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC), Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais (Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC), lisandrosimao@gmail.com

⁴ Engenheira Química, Mestre em Nanociências (Universidade Franciscana – UNF), Doutoranda em Engenharia Química (Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC), p.v.oliveira@posgrad.ufsc.br

⁵ Engenheiro Ambiental e Sanitarista, Mestre em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis (Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS), Doutorando em Engenharia Química (Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC), leandropelenz@hotmail.com

Palavras-Chave: Remediação Ambiental, Agricultura, Poluentes Orgânicos e Inorgânicos, Adsorção, Química Verde.

RESUMEN

En las últimas décadas, la intensificación de las prácticas agrícolas en el planeta ha desencadenado varios impactos negativos en el medio ambiente, principalmente por la liberación de contaminantes provenientes de plaguicidas. La tendencia es que la carga de agroquímicos en el cultivo aumente aún más debido al rápido crecimiento de la población mundial. Según organizaciones internacionales, la expectativa para el año 2050 es que la población mundial alcance 10 mil millones de personas. En otras palabras, la agricultura seguirá siendo uno de los principales segmentos responsables de abastecer toda la demanda de alimentos y materias primas para innumerables procesos industriales. Sin embargo, lamentablemente, la liberación descontrolada de contaminantes al medio ambiente por parte de los cultivos se está convirtiendo en un problema potencial para el mantenimiento de la vida en la tierra. Así, con el paso de los años, algunas enfermedades pueden volverse recurrentes en los organismos vivos debido a la presencia de compuestos nocivos en los alimentos y el agua. Por lo tanto, el desarrollo de estrategias para revertir este escenario y la aplicación de procesos de remediación ambiental son tendencias en la investigación científica. Además, las organizaciones públicas y privadas están invirtiendo cada vez más en este tema. Hoy en día existen numerosos procesos utilizados para la eliminación de contaminantes de la naturaleza, por ejemplo, la adsorción. La adsorción es una alternativa eficiente y ampliamente aplicada en la descontaminación ambiental. Las ventajas de los procesos de adsorción son diversas, por ejemplo, el bajo costo de producción y consumo de energía. Por lo tanto, este artículo de revisión tiene como objetivo presentar los principales tipos de materiales utilizados en la producción de adsorbentes, discutir investigaciones recientes que utilizaron el proceso de adsorción para eliminar contaminantes de los cultivos (plaguicidas y metales), limitaciones y tendencias en el uso de estos materiales en el medio ambiente. Además, el propósito de esta revisión fue presentar las posibilidades del uso de principios de química verde en la producción de adsorbentes y el uso de residuos agroindustriales en la fabricación de materiales en descontaminación ambiental.

Palabras Clave: Remediación Ambiental, Agricultura, Contaminantes Orgánicos e Inorgânicos, Adsorción, Química Verde.

ABSTRACT

In recent decades, the intensification of agricultural practices on the planet has triggered several negative impacts on the environment, mainly due to the release of contaminants from pesticides. The trend is that a load of agrochemicals in the crop will increase even more due to the rapid growth of the world population. According to international organizations, the expectation for the year 2050 is that the world population will reach 10 billion people. In other words, agriculture will remain one of the main segments responsible for supplying all the demand for food and raw materials for countless industrial processes. However, unfortunately, the uncontrolled release of pollutants to the environment from crops is becoming a potential problem for the maintenance of life on earth. Thus, over the years, some diseases can become recurrent in living organisms due to harmful compounds in food and water. Therefore, developing strategies to reverse this scenario and applying processes for environmental remediation are trends in scientific research. In addition, public and private organizations are increasingly investing in this topic. Nowadays, numerous techniques are used to remove pollutants from nature, for example, adsorption. Adsorption is a widely applied and efficient alternative to environmental decontamination. The advantages of adsorptive processes are diverse, for example, the low cost of production and energy consumption. Thus, this review article aims to present the main types of materials used in the production of adsorbents, discuss recent research that used the adsorption process to remove pollutants from crops (pesticides and metals), limitations and trends in the use of these materials in environmental remediation. In addition, the purpose of this review was to present the possibilities of using green chemistry principles in the production of adsorbents and the use of agro-industrial residues in the manufacture of materials in environmental decontamination.

Keywords: Environmental Remediation, Agriculture, Organic and Inorganic Pollutants, Adsorption, Green Chemistry.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a intensificação das práticas agrícolas no planeta vêm desencadeando inúmeras consequências ao meio ambiente, como a liberação de contaminantes oriundos de agroquímicos e fertilizantes aplicados nas lavouras (DA SILVA JÚNIOR *et al.*, 2022). A principal causa dessa intensificação é atribuída ao aumento do número da população mundial que é aproximadamente 8 bilhões. De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO), a estimativa da população mundial em 2050 é de 10 bilhões de pessoas (DIAS *et al.*, 2021). No entanto, a partir do número atual de pessoas e o aumento da taxa de crescimento da população a cada ano, essa estimativa pode ser alcançada antes do ano previsto (NEME *et al.*, 2021). Ou seja, o setor agrícola é e vai ser um segmento ainda mais importante para amparar o possível número expressivo da população do planeta nas próximas décadas (SALOMON; CAVAGNARO, 2022).

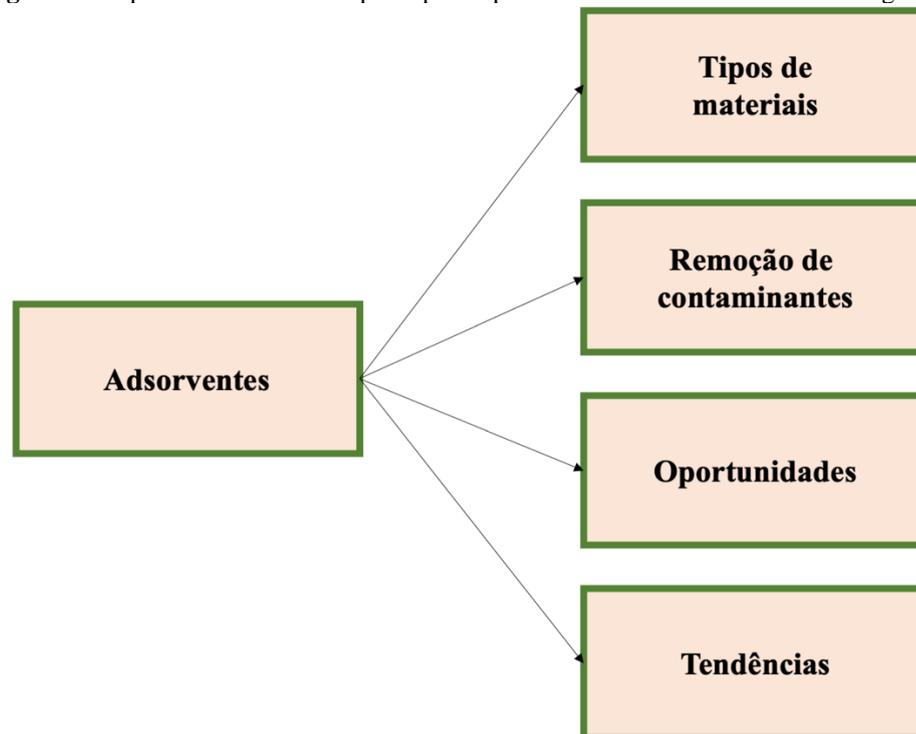
Diante desse cenário, o setor agrícola deve amparar o enorme número de pessoas no mundo, principalmente suprindo a demanda de alimentos. Contudo, para o aumento da produção de alimentos há a necessidade de intensificar a aplicação de insumos agrícolas, por exemplo, fertilizantes (VASA; POTHANAMKANDATHIL CHACKO, 2021). Além disso, o aparecimento de novos patógenos que acometem o desenvolvimento das plantas vem promovendo o uso de agroquímicos com formulações cada vez mais nocivos ao humano e ao meio ambiente (NEME *et al.*, 2021). Apesar de haver uma tendência na utilização de produtos naturais, ainda permanece o intenso uso de defensivos agrícolas sintéticos. Com isso, o desenvolvimento de novos produtos e processos que promova a redução do uso de defensivos agrícolas e/ou que contribua para a remediação ambiental de contaminantes presentes na natureza oriundos da agricultura são caminhos interessantes para serem aplicados (ALI *et al.*, 2021).

A contaminação de recursos hídricos e de solos é uma temática que merece bastante atenção, visto que a manutenção desses ecossistemas é fundamental para a vida na terra (RASTOGI *et al.*, 2017). Existem inúmeros processos que podem ser aplicados objetivando a remoção de contaminantes da água e do solo, por exemplo, a adsorção. A adsorção é um alternativa bastante eficiente e utilizada na remoção de contaminantes emergentes do meio

ambiente (THAKUR *et al.*, 2022). As vantagens dos processos adsorptivos são diversos, como o baixo custo, a facilidade de produção dos adsorventes, a operação simples, a possibilidade de utilizar resíduos para a preparação de carvões, o baixo consumo energético e a aplicação para remediação ambiental de inúmeros compostos orgânicos e inorgânicos (LIU *et al.*, 2022). Além disso, é possível reutilizar os adsorventes, no qual é um ponto muito positivo, podendo ser direcionado para um tratamento que apresente viabilidade econômica e ecológica (IGHALO; ADENIYI, 2020).

O uso de tecnologias e novos materiais para a remediação ambiental é uma temática bastante explorada por cientistas e vem sendo aprimorada ao longo dos anos na escala laboratorial e cada vez mais estão sendo realizados investimentos para implementar nas estações reais de tratamento de águas e efluentes. Assim, a aplicação de uma técnica simples como é o processo de adsorção para a remoção de contaminantes oriundos de práticas agrícolas é uma alternativa que pode contribuir enormemente com a diminuição dos impactos negativos ocasionados pela agricultura. Portanto, o presente artigo de revisão objetiva apresentar os principais tipos de materiais para a produção de (bio)adsorventes, discutir alguns trabalhos recentes da literatura que utilizaram o processo de adsorção para a remoção de poluentes advindos de lavouras em diferentes sistemas, limitações e perspectivas futuras do uso desses materiais na remediação ambiental. Na Figura 1 apresenta um esquema ilustrativo dos principais tópicos abordados no trabalho. Também, o propósito desta revisão foi apresentar as possibilidades do uso de princípios da química verde na produção de bioadsorventes e a utilização de resíduos agroindustriais como precursores de novos materiais para a remoção de contaminantes da natureza.

Figura 1: Esquema ilustrativo dos principais tópicos abordados nesta revisão bibliográfica.



Fonte: Própria (2022).

REFERENCIAL TEÓRICO

As crescentes demandas por alimentos vêm promovendo nos últimos anos a acentuação das práticas agrícolas. A principal razão desse incremento é dada ao número da população mundial que hoje em dia é de aproximadamente 8 bilhões. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO), a previsão da população mundial para o ano de 2050 é de 10 bilhões de pessoas (DIAS *et al.*, 2021). Contudo, diante do número atual de pessoas e o aumento da taxa de crescimento da população a cada ano, essa estimativa pode ser alcançada antes do ano previsto (NEME *et al.*, 2021). Assim, a agricultura é e vai ser um segmento ainda mais significativo para amparar o possível número expressivo da população do planeta nas próximas décadas (SALOMON; CAVAGNARO, 2022). Com isso, os aumentos do uso de agroquímicos nas lavouras têm preocupado os especialistas devido a constatação recorrente de altas concentrações de poluentes na natureza.

A poluição de recursos hídricos e de solos é um *hot topic* da literatura e que merece bastante atenção, visto que o cuidado desses ecossistemas é importante para a vida na terra (RASTOGI *et al.*, 2017). Atualmente, há diversos processos que podem ser aplicados visando a retirada de poluentes da água e do solo, por exemplo, a adsorção. A adsorção é uma alternativa

bastante eficiente e utilizada na remoção de contaminantes emergentes do meio ambiente (THAKUR *et al.*, 2022). Os pontos positivos dos processos adsorptivos são inúmeros, como o baixo custo e a facilidade de produção dos adsorventes (LIU *et al.*, 2022). Logo, o aprimoramento dos processos adsorptivos e a produção de novos materiais adsorventes são caminhos interessantes para a remediação ambiental de contaminantes advindos da agricultura. Além disso, cada vez mais está havendo investimento em estruturas para implementação de novas estações de tratamento de águas e efluentes otimizadas.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste artigo de revisão foram realizadas buscas nas principais bases científicas, como ScienceDirect, Scopus, Google Scholar, Springer e Wiley Online Library. As palavras-chave utilizadas foram: adsorção, bioadsorventes, adsorventes de resíduos agroindustriais, adsorventes baseados em argila, contaminantes oriundos de práticas agrícolas, pesticidas, fertilizantes sintéticos, agroquímicos, defensivos agrícolas e adsorção de contaminantes advindos de práticas agrícolas. As buscas foram executadas em português e em inglês. Realizou-se a leitura dos títulos e dos resumos para a escolha das referências. Assim, incluiu-se as publicações que estavam dentro do escopo proposto pelo trabalho. Portanto, nesta revisão objetivou apresentar os principais tipos de materiais para a produção de (bio)adsorventes, discutir alguns trabalhos recentes da literatura que utilizaram o processo de adsorção para a remoção de poluentes advindos de lavouras em diferentes sistemas, limitações e perspectivas futuras do uso desses materiais na remediação ambiental.

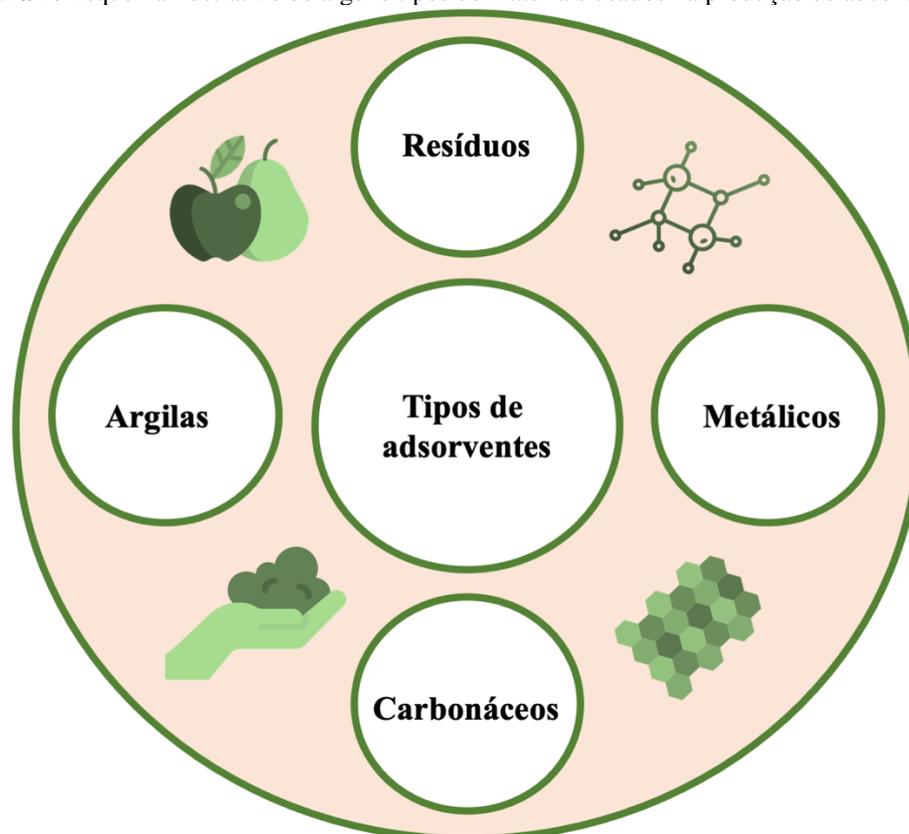
RESULTADOS E DISCUSSÃO

PRODUÇÃO DE ADSORVENTES

A produção de adsorventes pode ser através de diferentes metodologias e precursores, por exemplo, adsorventes produzidos hidrotermicamente com estrutura metal-orgânica (LIU *et al.*, 2022). Diante disso, estratégias podem ser aplicadas na síntese de adsorventes, e assim, adequar ao propósito da aplicação. Hoje em dia, existem diversos trabalhos publicados que utilizaram resíduos agroindustriais ou materiais baseados em argila para a produção de adsorventes com o objetivo de remoção de poluentes da água e do solo (SHELKE; JOPALE;

KATEGAONKAR, 2022). Neste sentido, os precursores para a fabricação de adsorventes são diversos e podem ser escolhidos com base na aplicação. Assim, a escolha do precursor e a metodologia de preparação dos adsorventes são etapas fundamentais para se obter êxito na aplicação, visto que a composição de cada material e a morfologia de cada estrutura produzida pode contribuir com resultados satisfatórios dependendo do contaminante. Na Figura 2 visualiza um esquema ilustrativo de alguns tipos de materiais utilizados na produção de adsorventes.

Figura 2: Esquema ilustrativo de alguns tipos de materiais usados na produção de adsorventes.



Fonte: Própria (2022).

Adsorventes Obtidos a Partir de Resíduos Agroindustriais

A utilização de resíduos para a fabricação de adsorventes é uma estratégia promissora devido ao baixo custo de produção, o fácil manuseio, a disponibilidade e por resolver um grande problema que é o descarte adequado (MESELDZIJA *et al.*, 2019). Os resíduos agrícolas são gerados em grande quantidade e pode ser tóxico ao meio ambiente quando exposto por um longo tempo às intempéries ambientais (MO *et al.*, 2018). Geralmente, os resíduos agrícolas

possuem enorme teor de carbono que após as modificações adequadas pode se converter em um carvão ativado de alta performance. Além disso, na literatura há inúmeros trabalhos em que alguns adsorventes de baixo custo produzidos a partir de resíduos agrícolas apresentaram eficiência maior quando comparados aos carvões comerciais (SHELKE; JOPALE; KATEGAONKAR, 2022). Os principais resíduos advindos de práticas agrícolas utilizados para a síntese de adsorventes são a casca de arroz, o bagaço de cana-de-açúcar, a espiga de milho e a casca de amendoim (MO *et al.*, 2018). No Quadro 1 mostra alguns trabalhos que utilizaram resíduos agrícolas para a produção de carvões ativados e aplicaram na remoção de poluentes.

Quadro 1: Alguns trabalhos encontrados na literatura que utilizaram resíduos agrícolas para a produção de adsorventes e aplicaram na remoção de contaminantes.

Resíduo utilizado	Condições aplicadas na síntese	Informações complementares	Referência
Sementes de graviola e casca de amendoim	Os adsorventes foram preparados em diversas condições (<i>in natura</i> , carbonizado, pirolisado, quimicamente ativo e tratamento básico).	Os adsorventes foram testados para a remoção de íons Cd^{2+} e Pb^{2+} .	(SANTOS <i>et al.</i> , 2022)
Biomassa de <i>Pseudomonas stutzeri</i> e sementes de <i>Delonix regia</i>	A produção do adsorvente de sementes de <i>Delonix regia</i> foi através de tratamento com ácido sulfúrico concentrado.	O adsorvente foi aplicado na remoção rápida de pesticidas.	(SARAVANAN <i>et al.</i> , 2022)
Farelo de arroz, farelo de trigo, casca de lentilha e casca de arroz	Os adsorventes foram preparados a partir de um tratamento térmico e posteriormente moídos para aplicação.	O adsorvente preparado a partir da casca de lentilha vermelha foi o mais adequado para a remoção de cádmio.	(BASU; GUHA; RAY, 2017)
Casca de arroz	O adsorvente preparado foi funcionalizado com enxofre.	A aplicação do material fabricado foi aprimorada devido a funcionalização para a adsorção de Cd^{2+} .	(QU <i>et al.</i> , 2018)
Folha de manga	As folhas de manga passaram por um processo térmico e em seguida triturado. Além disso, os corantes presentes nas folhas foram retirados.	O adsorvente foi aplicado para a remoção de azul de metileno de soluções aquosas.	(UDDIN <i>et al.</i> , 2017)

Fonte: Própria (2022).

A produção de adsorventes a partir de resíduos agroindustriais é uma alternativa bastante viável. No entanto, modificações na estrutura e composição, por exemplo funcionalizações, são necessárias para a otimização durante a aplicação do material. A fabricação de bioadsorventes de cana-de-açúcar e mandioca com modificações físico-químicas foram testados na remoção de um corante catiônico (DE OLIVEIRA *et al.*, 2019). As matérias-

primas foram tratadas com hidróxido de sódio. Além disso, as cinzas foram produzidas a partir da carbonização e calcinação. A síntese de um novo carvão ativado utilizando a pirólise de uma mistura de borra de café, serragem de eucalipto, hidróxido de cálcio e óleo de soja a 800°C também foi reportada (ROVANI *et al.*, 2014). A síntese de um adsorvente a partir da casca de limão não modificado foi reportado como um excelente material para a adsorção de íons cobre em soluções aquosas (MESELDZIJA *et al.*, 2019). Diante desse contexto, o uso de resíduos agroindustriais para a produção de adsorventes é um caminho *eco-friendly* a seguir, ainda mais em países com um enorme potencial agrícola. Além disso, a utilização de adsorventes oriundos de resíduos contribui na redução dos impactos ambientais ocasionados pela disposição dessa carga no meio ambiente e na possibilidade de desenvolver novos materiais para remediação ambiental.

Adsorventes Baseados em Argila

Adsorventes baseados em argila são considerados uma classe de material em potencial para remoção de contaminantes em diferentes sistemas. As vantagens inerentes a esses adsorventes são a grande capacidade de adsorção e a troca iônica. Além disso, os adsorventes baseados em argila são considerados abundantes no planeta. Os argilominerais naturais podem ser categorizados de acordo com a sua estrutura, por exemplo, bentonita e caulinita (DAS *et al.*, 2018). Geralmente, a alta capacidade de adsorção dos argilominerais se origina das cargas negativas de sua estrutura superficial. Argila de caulinita modificada e não modificada foram testadas na remoção de chumbo (JIANG *et al.*, 2009). Na síntese de caulinita modificada utilizaram sulfato de alumínio e carvão ativo. Também, a produção de nanocompósitos híbridos com argila é recorrente na literatura. A fabricação de um híbrido inorgânico-orgânico através da modificação seletiva da superfície externa negativa de argila de haloisita com dois organossilanos diferentes foram aplicados como adsorventes novos e econômicos para a extração de poluentes inorgânicos em solução aquosa (DAS *et al.*, 2018). A aplicação de argilas *in natura* encontradas na natureza é uma estratégia bastante utilizada por pesquisadores. Amostras de argila natural (argilas montmoriloníticas e calcárias) coletadas na Tunísia foram aplicadas na remoção de diversos contaminantes inorgânicos (SDIRI *et al.*, 2011). Portanto, os adsorventes baseados em argila são materiais em potencial para a descontaminação ambiental. No entanto, ainda são poucos os trabalhos que exploram de maneira aprofundada e em grande

escala a sua aplicação na remoção de contaminantes oriundos da agricultura em diferentes ecossistemas.

Outros Tipos de Adsorventes

Além dos materiais apresentados anteriormente, existem outros inúmeros tipos de adsorventes, por exemplo, materiais baseados em metais, carbonáceos e híbridos (ALI *et al.*, 2021). Adsorvente fibroso de troca de ligantes carregado com zircônio foi utilizado para adsorção de arsênio de águas contaminadas (AWUAL *et al.*, 2012). As fibras continham grupos fosfonato e sulfonato. A fibra foi sintetizada através da polimerização por enxerto de clorometilostireno em fibra de polipropileno revestida com polietileno por meio de irradiação de elétrons. Um material conjugado poroso funcionalizado com ligante de 4-nitro-1-naftilamina foi preparado para monitoramento e remoção eficiente de nitrito de amostras de água (AWUAL *et al.*, 2019).

Adsorventes baseados em nanotubos de carbono são materiais com potencial na remoção de contaminantes da natureza (LI *et al.*, 2003). Os nanotubos de carbono são considerados notáveis devido às inúmeras características, (1) Alta porosidade, (2) Microporos acessíveis, (3) Baixo peso, (4) Propriedades de superfície ajustáveis, (5) Alta resistência à corrosão, (6) Estruturas bem definidas, (7) Facilidade de ativação química, (8) Estrutura interna oca, (9) Estrutura em camadas e (10) Hidrofobicidade (SAJID *et al.*, 2022). Nanotubos de carbono oxidados que apresentaram adsorção eficiente de cádmio foi reportado (LI *et al.*, 2003). A preparação desse material foi através da decomposição térmica do metano em fluxo de hidrogênio à temperatura de 750°C usando nanopartículas de níquel como catalisadores.

Além disso, a fabricação de adsorventes híbridos é uma solução bastante aplicada na literatura devido o melhoramento de suas propriedades e características, como o aumento de área superficial. Um híbrido de organossilica mesoporosa integrado com grupos dissulfeto e amina foi sintetizado por um método de co-condensação sol-gel usando Pluronic P123 (direcionador estrutural) (SANTHAMOORTHY *et al.*, 2022). O híbrido foi aplicado na adsorção simultânea de íons Hg^{2+} e Cu^{2+} de solução aquosa. Também, materiais magnéticos à base de carbono podem ser aplicados na adsorção de poluentes (ALI *et al.*, 2021). Portanto, a ampla variedade de tipos de materiais que podem ser utilizados na síntese de adsorventes é incontável. Assim, traçar estratégias metodológicas e a aplicação de planejamentos

experimentais pode ser um caminho interessante a seguir para a aplicação de materiais adsorventes na remediação ambiental.

ADSORÇÃO DE CONTAMINANTES ORIUNDOS DE PRÁTICAS AGRÍCOLAS

Na lavoura são utilizados diversos insumos necessários para o desenvolvimento das plantas, por exemplo, pesticidas e fertilizantes baseados em metais (DA SILVA JÚNIOR *et al.*, 2022). Infelizmente, grande parte da carga aplicada nos talhões são perdidos para o meio ambiente devido aos exageros praticados no atual manejo agrícola (SALOMON; CAVAGNARO, 2022). As *commodities*, produtos básicos globais não industrializados, principalmente os grãos são os alguns dos produtos que na lavoura são aplicados grande quantidade de defensivos. No Brasil, a soja, o milho e a cana-de-açúcar consomem mais da metade do total de defensivos agrícolas comercializados em território nacional. Os pesticidas podem ser aplicados diretamente na planta ou no solo (LAN *et al.*, 2022). Contudo, metade do produto tem como destino recursos hídricos e solo devido as perdas. Atualmente, a presença de metais advindos da fertilização agrícola e pesticidas na água é alarmante (VASA; POTHANAMKANDATHIL CHACKO, 2021). Assim, a necessidade de remoção desses poluentes é crucial para a manutenção dos organismos vivos. Portanto, os processos adsorventes é uma saída para a remoção desses contaminantes emergentes da natureza. No Quadro 2 mostra alguns trabalhos que aplicaram adsorventes na remoção de contaminantes oriundos de práticas agrícolas em diferentes sistemas.

Quadro 2: Alguns trabalhos encontrados na literatura que utilizaram adsorventes na remoção de poluentes oriundos de práticas agrícolas.

Adsorvente	Contaminante	Informações complementares	Referência
Filme de polietileno agrícola e palha de trigo	Malathion, Difluzenuron, Difenconazole e Carbendazim.	A adsorção foi um processo espontâneo de aumento endotérmico, sugerindo que a principal força de adsorção dos agrotóxicos sobre o filme e produtos de degradação da palha foi a difusão hidrofóbica.	(LAN <i>et al.</i> , 2022)
Biocarvão de <i>frass</i> de <i>Tenebrio molitor</i> modificado	Pesticidas neonicotinóides	Os parâmetros termodinâmicos visualizados no trabalho sugeriram que a adsorção dos pesticidas foi um processo espontâneo, endotérmico e aleatoriamente crescente.	(SHI <i>et al.</i> , 2022)
Bagaço de cana-de-açúcar e polpa de beterraba	Manganês	A etapa limitante da taxa de adsorção foi estudada usando diferentes modelos cinéticos como pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem, equação de	(A. AHMED; EL-ROUDI; SALEM, 2015)

		Elovich e o modelo de difusão intrapartícula. Os dados de cinética foram bem ajustados com o tipo de pseudo-segunda ordem.	
Serragem de madeira ativada e não ativada	Cobre	Os dados experimentais de adsorção foram ajustados ao modelo de Langmuir para as duas amostras. A capacidade de equilíbrio da serragem e da serragem ativada foi de 5,432 e 13,495 mg de cobre por g de adsorvente, respectivamente em temperatura ambiente e pH natural.	(ACAR; EREN, 2006)
Resíduos comerciais de café	Cobre e cromo	A capacidade máxima de adsorção dos resíduos de café chegou a 70 mg g ⁻¹ para remoção de cobre e 45 mg g ⁻¹ para cromo.	(KYZAS, 2012)
Adsorvente a base de goma arábica e poliamidoxima	Clorpirifós	O resultado dos experimentos de adsorção-dessorção revelou que o bioadsorvente pode ser eficientemente regenerado e reutilizado após três execuções sequenciais sem um declínio considerável em seu desempenho de adsorção.	(HASSANZADEH-AFRUZI; MALEKI; ZARE, 2022)
Biotita modificada com dupla camada de hidróxidos	Cobre, chumbo, glifosato e ácido 2-metil-4-clorofenoxiacético	Os experimentos isotérmicos de cobre e chumbo foram bem descritos pelo modelo de Freundlich. Para os agroquímicos os experimentos isotérmicos foram bem ajustados pelo modelo de Langmuir.	(HUANG <i>et al.</i> , 2022)
Casca de <i>Eucalyptus sheathiana</i>	Zinco	O processo de adsorção foi fortemente dependente do pH e a porcentagem de adsorção do íon cresceu à medida que aumentou o pH da solução de 2,5 para 5,1. Por outro lado, a porcentagem de adsorção de zinco diminuiu com o aumento da dosagem do adsorvente, concentração inicial do metal, temperatura e força iônica.	(AFROZE; SEN; ANG, 2016)

Fonte: Própria (2022).

Um nanocompósito de hidrogel orgânico-inorgânico à base de poliamidoxima enxertada com goma arábica e nanopartículas magnéticas de CuFe₂O₄ foi reportado (HASSANZADEH-AFRUZI; MALEKI; ZARE, 2022). A eficiência de adsorção do nanocompósito para remover um pesticida organofosforado (clorpirifós) de soluções aquosas foi testado. Avaliaram o efeito de diferentes condições experimentais como pH da solução, dosagem de adsorvente, tempo de contato e concentração inicial na eficiência de adsorção. Os dados experimentais de adsorção foram bem ajustados pelo modelo isotérmico de Langmuir e a capacidade máxima de adsorção do bioadsorvente preparado para clorpirifós foi de 769,23 mg g⁻¹. Os dados de cinética de

adsorção foram bem ajustados pelo modelo de pseudo-segunda ordem. Foi sugerido que o clorpirifós adsorvido no nanocompósito ocorreu através das interações eletrostáticas e ligações de hidrogênio. Além disso, o resultado dos experimentos de adsorção-dessorção revelou que o bioadsorvente pode ser eficientemente regenerado e reutilizado após três execuções sequenciais sem um declínio considerável em seu desempenho de adsorção.

Remoção e recuperação magnética de metais pesados e pesticidas do solo por uma nova biotita modificada com dupla camada de hidróxidos foi recentemente reportado (HUANG *et al.*, 2022). O efeito sinérgico dos precursores do adsorvente promoveu o aumento da capacidade de remoção dos íons metálicos (cobre e chumbo) e dos agroquímicos (glifosato e ácido 2-metil-4-clorofenoxiacético). Através dos experimentos cinéticos observaram que houve um ajuste bem adequado ao modelo de pseudo-segunda ordem e ao modelo de difusão intrapartícula. Os experimentos isotérmicos de cobre e chumbo foram bem descritos pelo modelo de Freundlich. Para os agroquímicos os experimentos isotérmicos foram bem ajustados pelo modelo de Langmuir. Os mecanismos de remoção pelo compósito foram de precipitação para os íons metálicos e adsorção superficial para os agroquímicos. No experimento de lixiviação em coluna, o material adsorvente apresentou efetivamente interceptar metais pesados e pesticidas a fim de evitar a difusão. Além disso, a pesquisa sugeriu que a propriedade magnética do adsorvente pode evitar os riscos potenciais de poluentes no solo.

A aplicação de um adsorvente produzido a partir da casca de *Eucalyptus sheathiana* em sua forma bruta e modificada com hidróxido de sódio foi utilizado para a remoção de zinco em soluções aquosas (AFROZE; SEN; ANG, 2016). O processo foi fortemente dependente do pH e a porcentagem de adsorção do íon cresceu à medida que aumentou o pH da solução de 2,5 para 5,1. Por outro lado, a porcentagem de adsorção de zinco diminuiu com o aumento da dosagem do adsorvente, concentração inicial do metal, temperatura e força iônica. As medições cinéticas mostraram que o processo foi em multietapas, rápido e controlado por difusão. Além disso, verificou-se que a cinética segue a equação de pseudo-segunda ordem. A partir dos experimentos de equilíbrio mostraram que os modelos de Freundlich e Langmuir foram aplicáveis tanto para a casca de eucalipto crua quanto modificada com a base.

A adsorção é um tratamento bastante explorado pela classe científica e vem sendo otimizado a cada ano, seja através do entendimento dos mecanismos ou da obtenção de novos materiais adsorventes. Além disso, os processos adsorptivos são aliados na remediação ambiental

de contaminantes oriundos de práticas agrícolas. Portanto, a partir da discussão desse tópico, percebe-se que existem inúmeros trabalhos publicados na literatura que buscam propor técnicas e materiais de alta performance na remoção de pesticidas e metais aplicados nas lavouras. Assim, buscar identificar lacunas para investigação e melhorar a compreensão do processo torna o material a ser desenvolvido ainda mais competitivo em um cenário em que há um crescimento exponencial de alternativas. Também, ainda é carente na literatura de tratamentos adequados para o descarte e/ou metodologias de regeneração de adsorventes. Além disso, a análise financeira é um fator importante e que deve ser considerado na pesquisa científica, por isso, que a utilização de resíduos agroindustriais pode ser um caminho interessante (ambiental e econômico).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas próximas décadas, a estimativa é que a população mundial alcance o número de 10 bilhões de pessoas. Diante desse panorama, o setor agrícola vai se tornar ainda mais importante para a sociedade. No entanto, o impulsionamento da agricultura deve ocorrer harmoniosamente com relação à diversos aspectos, por exemplo, a carga aplicada de defensivos agrícolas nas lavouras. Hoje em dia, a preocupação dos especialistas está relacionada ao perigo iminente que esses compostos na natureza apresentam aos organismos vivos e à manutenção do planeta. Com isso, a aplicação de processos (*i.e.*, adsorção) para a remoção de poluentes no ecossistema é importante para reverter as consequências de exageros provocadas pelas atividades antrópicas. Assim, nesta revisão, buscou-se apresentar alguns materiais adsorventes utilizados na descontaminação ambiental (resíduos agroindustriais, argilas, carbonáceos, metálicos e híbridos). Também, discutiu-se os principais poluentes originários da agricultura (pesticidas e metais) e as vantagens da aplicação de processos adsorventes na remoção desses poluentes. Portanto, realizar discussões amparadas com estudos experimentais sobre as possíveis consequências a longo prazo desses contaminantes, reduzir a carga massiva aplicada de defensivos agrícolas na lavoura, desenvolver novos produtos que sejam brandos aos ecossistemas, aprofundar sobre os mecanismos envolvidos no processo de adsorção e estudar medidas viáveis (ambientalmente e financeiramente) para a reutilização de adsorventes são alternativas que podem se caracterizar eficazes no equilíbrio e manutenção da vida no planeta. Além disso, a conscientização para a elaboração de processos ambientalmente corretos e a

aplicação de novas tecnologias são caminhos que as futuras pesquisas devem estar atreladas.

REFERÊNCIAS

A. AHMED, S.; EL-ROUDI, A. M.; SALEM, A. A. A. Removal of Mn(II) from Ground Water by Solid Wastes of Sugar Industry. **Journal of Environmental Science and Technology**, v. 8, n. 6, p. 338–351, 15 out. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3923/jest.2015.338.351>>.

ACAR, F. N.; EREN, Z. Removal of Cu(II) ions by activated poplar sawdust (Samsun Clone) from aqueous solutions. **Journal of Hazardous Materials**, v. 137, n. 2, p. 909–914, 21 set. 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.03.014>>.

AFROZE, S.; SEN, T. K.; ANG, H. M. Adsorption removal of zinc (II) from aqueous phase by raw and base modified Eucalyptus sheathiana bark: Kinetics, mechanism and equilibrium study. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 102, n. Ii, p. 336–352, jul. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.04.009>>.

ALI, N.; HASSAN RIEAD, M. M.; BILAL, M.; YANG, Y.; KHAN, A.; ALI, F.; KARIM, S.; ZHOU, C.; WENJIE, Y.; SHER, F.; IQBAL, H. M. N. Adsorptive remediation of environmental pollutants using magnetic hybrid materials as platform adsorbents. **Chemosphere**, v. 284, n. April, p. 131279, dez. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131279>>.

AWUAL, M. R.; HASAN, M. M.; ISLAM, A.; RAHMAN, M. M.; ASIRI, A. M.; KHALEQUE, M. A.; SHEIKH, M. C. Introducing an amine functionalized novel conjugate material for toxic nitrite detection and adsorption from wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 778–785, ago. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.280>>.

AWUAL, M. R.; SHENASHEN, M. A.; YAITA, T.; SHIWAKU, H.; JYO, A. Efficient arsenic(V) removal from water by ligand exchange fibrous adsorbent. **Water Research**, v. 46, n. 17, p. 5541–5550, nov. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2012.07.038>>.

BASU, M.; GUHA, A. K.; RAY, L. Adsorption Behavior of Cadmium on Husk of Lentil. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 106, p. 11–22, fev. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.11.025>>.

DA SILVA JÚNIOR, A. H.; MULINARI, J.; DE OLIVEIRA, P. V.; DE OLIVEIRA, C. R. S.; REICHERT JÚNIOR, F. W. Impacts of metallic nanoparticles application on the agricultural soils microbiota. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 7, n. April, p. 100103, ago. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100103>>.

DAS, S.; SAMANTA, A.; GANGOPADHYAY, G.; JANA, S. Clay-Based Nanocomposites as Recyclable Adsorbent toward Hg(II) Capture: Experimental and Theoretical Understanding. **ACS Omega**, v. 3, n. 6, p. 6283–6292, 30 jun. 2018. Disponível em: <

<https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00789>>.

DE OLIVEIRA, A. V. B.; RIZZATO, T. M.; BARROS, B. C. B.; FAVARO, S. L.; CAETANO, W.; HIOKA, N.; BATISTELA, V. R. Physicochemical modifications of sugarcane and cassava agro-industrial wastes for applications as biosorbents. **Bioresource Technology Reports**, v. 7, n. July, p. 100294, set. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100294>>.

DIAS, T. A. da C.; LORA, E. E. S.; MAYA, D. M. Y.; OLMO, O. A. del. Global potential assessment of available land for bioenergy projects in 2050 within food security limits. **Land Use Policy**, v. 105, n. March, p. 105346, jun. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105346>>.

HASSANZADEH-AFRUZI, F.; MALEKI, A.; ZARE, E. N. Efficient remediation of chlorpyrifos pesticide from contaminated water by superparamagnetic adsorbent based on Arabic gum-grafted-polyamidoxime. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 203, n. November 2021, p. 445–456, abr. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.157>>.

HUANG, H.; XIA, C.; LIANG, D.; XIE, Y.; KONG, F.; FU, J.; DOU, Z.; YANG, Q.; SUO, W.; ZHANG, Q.; MENG, Z. Removal and magnetic recovery of heavy metals and pesticides from soil by layered double hydroxides modified biotite. **Chemical Engineering Journal**, v. 431, n. P2, p. 134113, mar. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134113>>.

IGHALO, J. O.; ADENIYI, A. G. Adsorption of pollutants by plant bark derived adsorbents: An empirical review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 35, n. March, p. 101228, jun. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101228>>.

JIANG, M.; WANG, Q.; JIN, X.; CHEN, Z. Removal of Pb(II) from aqueous solution using modified and unmodified kaolinite clay. **Journal of Hazardous Materials**, v. 170, n. 1, p. 332–339, out. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.092>>.

KYZAS, G. Z. Commercial Coffee Wastes as Materials for Adsorption of Heavy Metals from Aqueous Solutions. **Materials**, v. 5, n. 10, p. 1826–1840, 10 out. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma5101826>>.

LAN, T.; CAO, F.; CAO, L.; WANG, T.; YU, C.; WANG, F. A comparative study on the adsorption behavior and mechanism of pesticides on agricultural film microplastics and straw degradation products. **Chemosphere**, v. 303, n. P2, p. 135058, set. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135058>>.

LI, Y.-H.; WANG, S.; LUAN, Z.; DING, J.; XU, C.; WU, D. Adsorption of cadmium(II) from aqueous solution by surface oxidized carbon nanotubes. **Carbon**, v. 41, n. 5, p. 1057–1062, 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(02\)00440-2](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00440-2)>.

LIU, B.; GAI, S.; LAN, Y.; CHENG, K.; YANG, F. Metal-based adsorbents for water eutrophication remediation: A review of performances and mechanisms. **Environmental**

Research, v. 212, n. PB, p. 113353, set. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113353>>.

MESELDZIJA, S.; PETROVIC, J.; ONJIA, A.; VOLKOV-HUSOVIC, T.; NESIC, A.; VUKELIC, N. Utilization of agro-industrial waste for removal of copper ions from aqueous solutions and mining-wastewater. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 75, p. 246–252, jul. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.031>>.

MO, J.; YANG, Q.; ZHANG, N.; ZHANG, W.; ZHENG, Y.; ZHANG, Z. A review on agro-industrial waste (AIW) derived adsorbents for water and wastewater treatment. **Journal of Environmental Management**, v. 227, n. April, p. 395–405, dez. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.069>>.

NEME, K.; NAFADY, A.; UDDIN, S.; TOLA, Y. B. Application of nanotechnology in agriculture, postharvest loss reduction and food processing: food security implication and challenges. **Heliyon**, v. 7, n. 12, p. e08539, dez. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08539>>.

QU, J.; MENG, X.; JIANG, X.; YOU, H.; WANG, P.; YE, X. Enhanced removal of Cd(II) from water using sulfur-functionalized rice husk: Characterization, adsorptive performance and mechanism exploration. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 880–886, maio 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.208>>.

RASTOGI, A.; ZIVCAK, M.; SYTAR, O.; KALAJI, H. M.; HE, X.; MBARKI, S.; BRESTIC, M. Impact of Metal and Metal Oxide Nanoparticles on Plant: A Critical Review. **Frontiers in Chemistry**, v. 5, n. October, p. 1–16, 12 out. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00078>>.

ROVANI, S.; CENSI, M. T.; PEDROTTI, S. L.; LIMA, É. C.; CATALUÑA, R.; FERNANDES, A. N. Development of a new adsorbent from agro-industrial waste and its potential use in endocrine disruptor compound removal. **Journal of Hazardous Materials**, v. 271, p. 311–320, abr. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.02.004>>.

SAJID, M.; ASIF, M.; BAIG, N.; KABEER, M.; IHSANULLAH, I.; MOHAMMAD, A. W. Carbon nanotubes-based adsorbents: Properties, functionalization, interaction mechanisms, and applications in water purification. **Journal of Water Process Engineering**, v. 47, n. April, p. 102815, jun. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102815>>.

SALOMON, M. J.; CAVAGNARO, T. R. Healthy soils: The backbone of productive, safe and sustainable urban agriculture. **Journal of Cleaner Production**, v. 341, n. February, p. 130808, mar. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130808>>.

SANTHAMOORTHY, M.; THIRUPATHI, K.; PERIYASAMY, T.; THIRUMALAI, D.; RAMKUMAR, V.; ASRAFALI, S.; KIM, S.-C. Synthesis of bifunctional groups-integrated mesoporous silica hybrid adsorbent for simultaneous removal of Hg²⁺ and Cu²⁺ ions from aqueous solution. **Surfaces and Interfaces**, v. 29, n. February, p. 101808, abr. 2022. Disponível

em: <<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.101808>>.

SANTOS, V. H.; DO NASCIMENTO, G. E.; SALES, D. C. S.; DOS SANTOS, J. H. L.; RODRÍGUEZ-DÍAZ, J. M.; DUARTE, M. M. M. B. Preparation of adsorbents from agro-industrial wastes and their application in the removal of Cd²⁺ and Pb²⁺ ions from a binary mixture: evaluation of ionic competition. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 184, p. 152–164, jun. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.05.043>>.

SARAVANAN, A.; KUMAR, P. S.; JEEVANANTHAM, S.; HARIKUMAR, P.; BHUVANESWARI, V.; INDRAGANTI, S. Identification and sequencing of bacteria from crop field: Application of bacteria — agro-waste biosorbent for rapid pesticide removal. **Environmental Technology & Innovation**, v. 25, p. 102116, fev. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102116>>.

SDIRI, A.; HIGASHI, T.; HATTA, T.; JAMOSSI, F.; TASE, N. Evaluating the adsorptive capacity of montmorillonitic and calcareous clays on the removal of several heavy metals in aqueous systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 172, n. 1, p. 37–46, ago. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2011.05.015>>.

SHELKE, B. N.; JOPALE, M. K.; KATEGAONKAR, A. H. Exploration of biomass waste as low cost adsorbents for removal of methylene blue dye: A review. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 99, n. 7, p. 100530, jul. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100530>>.

SHI, Y.; WANG, S.; XU, M.; YAN, X.; HUANG, J.; WANG, H. Removal of neonicotinoid pesticides by adsorption on modified *Tenebrio molitor* frass biochar: Kinetics and mechanism. **Separation and Purification Technology**, p. 121506, jun. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121506>>.

THAKUR, A. K.; SINGH, R.; TEJA PULLELA, R.; PUNDIR, V. Green adsorbents for the removal of heavy metals from Wastewater: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 57, p. 1468–1472, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.373>>.

UDDIN, M. T.; RAHMAN, M. A.; RUKANUZZAMAN, M.; ISLAM, M. A. A potential low cost adsorbent for the removal of cationic dyes from aqueous solutions. **Applied Water Science**, v. 7, n. 6, p. 2831–2842, 3 out. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13201-017-0542-4>>.

VASA, T. N.; POTHANAMKANDATHIL CHACKO, S. Recovery of struvite from wastewaters as an eco-friendly fertilizer: Review of the art and perspective for a sustainable agriculture practice in India. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 48, n. October 2020, p. 101573, dez. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101573>>.