



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

JULIANE ARAUJO BERSI

**APLICABILIDADE DE BIOCHAR NO ÂMBITO DA ENGENHARIA
AMBIENTAL**

Sorocaba/SP
2024

JULIANE ARAUJO BERSI

**APLICABILIDADE DE BIOCHAR NO ÂMBITO DA ENGENHARIA
AMBIENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade
Estadual Paulista (UNESP), Instituto
de Ciência e Tecnologia, Sorocaba,
como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Bacharela em
Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Cláudia
Hitomi Watanabe Rezende
Coorientadora: Profa. Dra. Maria
Lúcia Pereira Antunes

Sorocaba
2024

B535a

Bersi, Juliane Araujo

Aplicabilidade de biochar no âmbito da engenharia ambiental / Juliane Araujo

Bersi. -- Sorocaba, 2024

53 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental)
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia,
Sorocaba

Orientadora: Cláudia Hitomi Watanabe Rezende

Coorientadora: Maria Lúcia Pereira Antunes

1. Biochar. 2. Sustentabilidade. 3. Gerenciamento de resíduos. 4. Sequestro de carbono. 5. Recuperação e remediação ambiental. I. Título.

JULIANE ARAUJO BERSI

**APLICABILIDADE DE BIOCHAR NO ÂMBITO DA ENGENHARIA
AMBIENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel(a) em Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 04/12/2024

Trabalho aprovado por meio de parecer, homologado pelo Conselho de Curso em reunião de 04 de dezembro de 2024.

Dedico este trabalho à minha família, mas, sobretudo, aos meus pais, Marcio e Alessandra, por todo o apoio ao longo da minha jornada acadêmica.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de força e sabedoria por me guiar em todos os momentos de lucidez dessa jornada. Aos meus pais, Marcio Peres Bersi e Alessandra de Araujo Castro Bersi, pelo amor, apoio em cada passo e por acreditarem em mim até mesmo nos dias mais difíceis. À minha irmã, Jaqueline Araujo Bersi, por ser minha companheira em todas as fases da minha vida. À professora Claudia Hitomi Watanabe Rezende, cuja dedicação e empenho foram fundamentais para a realização deste trabalho; sua orientação foi indispensável para que eu pudesse chegar até aqui. À professora Maria Lucia Pereira Antunes, que também contribuiu de forma significativa para a realização deste projeto. Às minhas amigas e colegas Ingra Davi Hoelz, Beatriz Bonifácio Jordão e demais colegas, que compartilharam comigo não apenas os desafios da faculdade, mas também as risadas, conquistas e aprendizados que ficarão marcados para sempre. Por fim, eu gostaria de agradecer ao meu parceiro e companheiro Ricardo Muniz Simões, que esteve ao meu lado durante toda essa caminhada e viu de perto todos os momentos. Sua paciência e incentivo foram essenciais para alcançar este momento. A todos vocês, minha eterna gratidão.

RESUMO

Este estudo tem por objetivo realizar uma revisão da literatura com relação a aplicabilidade do biochar inserido a área da engenharia ambiental. Desse modo, a questão que norteia este estudo é: como a aplicação do biochar pode contribuir para a sustentabilidade e a mitigação de impactos ambientais na engenharia ambiental? Assim, por meio de uma metodologia de revisão integrativa, mostrou-se que a aplicabilidade do biochar no âmbito da engenharia ambiental revela-se promissora, especialmente no tratamento de águas contaminadas e na recuperação de solos degradados. Produzido a partir de resíduos orgânicos, o biochar oferece uma alternativa sustentável e econômica para a mitigação de poluentes. Sua capacidade de adsorção eficaz de contaminantes, como metais pesados e compostos orgânicos, faz dele um recurso valioso para o tratamento de efluentes industriais e urbanos. Além de seu papel na remoção de poluentes, o biochar pode ser utilizado na melhoria da qualidade do solo. Sua incorporação em terras agrícolas pode aumentar a retenção de água e nutrientes, contribuindo para a fertilidade do solo e a produtividade das culturas. Essa dupla função, de tratar resíduos e melhorar a terra, torna o biochar uma ferramenta crucial na transição para práticas agrícolas mais sustentáveis.

Palavras-chave: Biochar. Sustentabilidade. Sequestro de Carbono. Remediação do Solo.

ABSTRACT

This study aims to carry out a literature review regarding the applicability of biochar in the environmental engineering area. Therefore, the question that guides this study is: how can the application of biochar contribute to sustainability and the mitigation of environmental impacts in environmental engineering? Thus, through an integrative review methodology, it was shown that the applicability of biochar in the scope of environmental engineering is promising, especially in the treatment of contaminated water and the recovery of degraded soil. Produced from organic waste, biochar offers a sustainable and economical alternative for mitigating pollutants. Its ability to effectively adsorb contaminants, such as heavy metals and organic compounds, makes it a valuable resource for the treatment of industrial and urban effluents. In addition to its role in removing pollutants, biochar can be used to improve soil quality. Its incorporation into agricultural land can increase water and nutrient retention, contributing to soil fertility and crop productivity. This dual function of treating waste and improving the land makes biochar a crucial tool in the transition to more sustainable agricultural practices.

Keywords: Biochar. Sustainability. Carbon Sequestration. Soil Remediation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS.....	11
3. REVISÃO DA LITERATURA	12
3.1. Resíduos sólidos e o meio ambiente	12
3.2. Biochar: principais conceitos	20
3.3. Uso de biochar no âmbito da engenharia ambiental	26
4. METODOLOGIA	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
6. CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	500

1. INTRODUÇÃO

A produção de resíduos é um dos grandes desafios ambientais da atualidade. O aumento constante da industrialização, o crescimento urbano e o consumo desenfreado se convertem na geração massiva de resíduos sólidos, que frequentemente terminam em aterros sanitários, oceanos ou acabam sendo incinerados, contribuindo significativamente para a poluição do ar, água e solo (Nogueira; Mansano, 2021).

Assim, o biochar, um material carbonáceo obtido pela pirólise de biomassa, tem ganhado destaque no campo da engenharia ambiental devido ao seu potencial para melhorar a qualidade do solo e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas. Sua aplicação é multifacetada, abrangendo desde a agricultura sustentável até a gestão de resíduos, além de desempenhar um papel importante no sequestro de carbono. A transformação de resíduos orgânicos em biochar não apenas reduz a quantidade de material que seria destinado a aterros, mas também enriquece o solo com nutrientes e melhora suas propriedades físicas e químicas (Ferreira, 2023).

Na agricultura, a adição de biochar ao solo tem demonstrado aumentar a retenção de água, melhorar a aeração e promover um ambiente mais favorável para a microbiota do solo. Isso resulta em melhores colheitas e na redução da necessidade de fertilizantes químicos, o que, por sua vez, diminui a contaminação dos recursos hídricos. A utilização desse material também se estende à recuperação de solos degradados, onde sua capacidade de adsorção pode ajudar na remoção de contaminantes e na restauração da fertilidade, tornando-se uma solução viável para muitos desafios ambientais enfrentados atualmente (Ferreira, 2023).

Além de suas aplicações agronômicas, o biochar apresenta um grande potencial no tratamento de águas residuais e na captura de poluentes. Sua estrutura porosa permite que ele funcione como um meio filtrante eficaz, removendo contaminantes como metais pesados e nutrientes em excesso. A implementação de sistemas que utilizam biochar para o tratamento de efluentes pode resultar em processos mais sustentáveis e econômicos, alinhando-se com

os objetivos da engenharia ambiental de promover soluções que minimizem o impacto humano sobre os ecossistemas (Ferreira, 2023).

Desse modo, a questão que norteia este estudo é: como a aplicação do biochar pode contribuir para a sustentabilidade e a mitigação de impactos ambientais na engenharia ambiental?

Como hipóteses há: a aplicação do biochar pode resultar em melhorias significativas na qualidade do solo, levando a um aumento na produtividade agrícola e à redução da dependência de fertilizantes químicos; pode atuar como uma solução eficaz para a remoção de contaminantes em águas residuais, promovendo a recuperação de ecossistemas degradados; e pode contribuir para o sequestro de carbono, ajudando a mitigar as mudanças climáticas ao reduzir as emissões de gases de efeito estufa provenientes da decomposição de resíduos orgânicos.

Ainda, a utilização do biochar oferece uma alternativa sustentável para a gestão de resíduos orgânicos, contribuindo para a diminuição de aterros e a promoção de práticas agrícolas mais responsáveis. Com o aumento da população e a crescente demanda por alimentos, a adoção do biochar pode beneficiar comunidades rurais, melhorando a fertilidade do solo e, conseqüentemente, a segurança alimentar. Além disso, sua capacidade de reter água e nutrientes pode ajudar pequenos agricultores a se adaptarem às mudanças climáticas, garantindo uma produção agrícola mais resiliente.

O estudo e a aplicação do biochar no contexto da engenharia ambiental representam uma área de pesquisa emergente que pode enriquecer o conhecimento sobre soluções sustentáveis para problemas contemporâneos. A investigação sobre suas propriedades e efeitos no solo, na água e na atmosfera pode gerar dados valiosos que contribuam para a formação de novos paradigmas em práticas agrícolas e de gestão de resíduos.

Cientificamente, o biochar é um material intrigante que apresenta propriedades únicas, como alta porosidade e capacidade de adsorção, que podem ser exploradas em diversas aplicações ambientais. Pesquisas sobre suas interações com contaminantes, sua eficiência no sequestro de carbono e seus efeitos na microbiota do solo são cruciais para entender como o biochar pode ser utilizado para mitigar impactos ambientais e promover a sustentabilidade.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Realizar uma revisão da literatura com relação a aplicabilidade do biochar na engenharia ambiental.

2.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo proposto, elencam-se como objetivos específicos:

- Selecionar e filtrar artigos relevantes em base de dados de periódicos, relacionados aos termos “biochar” e “engenharia ambiental”.
- Realizar uma categorização quanto à ocorrência e importância dos artigos relacionados aos termos, ao longo dos anos

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Resíduos sólidos e o meio ambiente

A gestão de resíduos sólidos é um tema de crescente importância para o meio ambiente, à medida que a população mundial continua a aumentar e as atividades econômicas se intensificam. Os resíduos sólidos, que incluem materiais como plásticos, metais, papel e restos de alimentos, podem ter um impacto ambiental significativo quando não são geridos de forma adequada. O acúmulo de lixo em aterros sanitários, a poluição dos oceanos e a contaminação do solo e das águas subterrâneas são alguns dos problemas ambientais associados ao manejo inadequado desses resíduos. Portanto, a implementação de práticas de gestão eficazes e sustentáveis é essencial para minimizar esses impactos negativos (Brasil, 2011).

Um dos principais desafios na gestão de resíduos sólidos está relacionado ao alto volume de produção. A urbanização e o aumento do consumo resultam em um volume maior de lixo, sobrecarregando os sistemas de coleta e tratamento. Além disso, a composição dos resíduos também mudou, com um aumento na quantidade de plásticos e eletrônicos, que são mais difíceis de reciclar e podem levar centenas de anos para se decompor. Isso sublinha a necessidade de políticas que promovam a redução na fonte, ou seja, a diminuição da quantidade de resíduos gerados através de mudanças nos padrões de produção e consumo (Brasil, 2011).

A reciclagem e a compostagem são estratégias importantes para a gestão sustentável de resíduos sólidos. A reciclagem permite que materiais como plástico, vidro e papel sejam reprocessados e reutilizados, reduzindo a necessidade de extração de novos recursos naturais. A compostagem, por sua vez, trata os resíduos orgânicos, transformando-os em adubo natural que pode ser utilizado na agricultura e na jardinagem. No entanto, para que essas práticas sejam eficazes, é necessário o engajamento da sociedade, a existência de infraestrutura adequada e políticas públicas que incentivem a separação e o descarte correto dos materiais recicláveis (Campos, 2012).

Além dos impactos ambientais diretos, a má gestão dos resíduos sólidos também pode ter consequências sociais e econômicas. Comunidades que vivem perto de aterros sanitários inadequados ou lixões a céu aberto estão expostas a riscos à saúde devido à contaminação do ar, do solo e da água. Esses locais também podem atrair animais e insetos, contribuindo para a disseminação de doenças. Portanto, a gestão de resíduos sólidos deve ser vista como uma questão de justiça ambiental, onde todas as comunidades têm o direito de viver em um ambiente saudável. A conscientização da população sobre a importância de reduzir, reutilizar e reciclar pode levar a mudanças significativas nos comportamentos e atitudes em relação ao consumo e ao descarte de materiais. Além disso, as políticas públicas devem ser acompanhadas de campanhas educativas que incentivem a participação ativa dos cidadãos na gestão de resíduos. Somente através de um esforço conjunto entre governos, empresas e sociedade civil será possível minimizar os impactos negativos dos resíduos sólidos no meio ambiente e promover um futuro mais sustentável (Campos, 2012).

Diante dessa situação, é necessária uma abordagem preventiva, focada na minimização do desperdício desde o início dos processos de produção e consumo. Práticas como a adoção de embalagens reutilizáveis, a diminuição do uso de plásticos descartáveis e a preferência por produtos duráveis podem contribuir significativamente para a redução do volume de lixo gerado. Além disso, a promoção de hábitos de consumo consciente entre os cidadãos é essencial para evitar o acúmulo desnecessário de resíduos, diminuindo a pressão sobre os sistemas de gestão de lixo.

A responsabilidade compartilhada na gestão de resíduos sólidos é outro conceito central para a proteção do meio ambiente. Governos, empresas e consumidores têm papéis complementares nesse processo. As empresas, por exemplo, podem adotar práticas de produção mais limpas e investir em tecnologias que facilitem a reciclagem de seus produtos. Já os governos são responsáveis por criar e implementar políticas públicas que incentivem a redução, a reutilização e a reciclagem, além de garantir que os sistemas de coleta e tratamento de resíduos sejam eficientes. Os consumidores, por sua vez, podem contribuir separando corretamente os resíduos e optando por produtos que gerem menos lixo (Silva, 2015).

A gestão inadequada de resíduos sólidos urbanos pode causar sérios impactos nos ecossistemas, principalmente nos ambientes aquáticos. Resíduos plásticos, em particular, têm sido um dos maiores poluentes nos oceanos, causando a morte de milhares de animais marinhos todos os anos. Microplásticos, resultantes da degradação de plásticos maiores, podem ser ingeridos por espécies aquáticas, entrando na cadeia alimentar e representando uma ameaça também para a saúde humana. Esse cenário ressalta a importância de medidas globais para combater a poluição marinha e proteger os ecossistemas aquáticos (Silva, 2015).

Os resíduos eletrônicos, também representam um desafio significativo na gestão de resíduos sólidos. Com o rápido avanço da tecnologia, o ciclo de vida dos dispositivos eletrônicos tem se tornado cada vez mais curto, resultando em grandes volumes. Esses resíduos contêm materiais tóxicos, como metais pesados, que podem causar sérios danos ao meio ambiente e à saúde humana se não forem geridos corretamente. A reciclagem de eletrônicos, além de prevenir a contaminação ambiental, permite a recuperação de materiais valiosos, reduzindo a necessidade de extração de recursos naturais (Silva, 2015)

É crucial que a gestão de resíduos sólidos seja integrada em uma abordagem mais ampla de desenvolvimento sustentável. Isso inclui a consideração dos impactos sociais, econômicos e ambientais ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos, desde a extração de matérias-primas até o descarte final. Investir em tecnologias inovadoras, como a economia circular, onde os resíduos são reintegrados ao ciclo produtivo, pode transformar os desafios da gestão de resíduos em oportunidades para a criação de valor e a promoção de um futuro mais sustentável. Assim, a gestão eficiente dos resíduos sólidos não apenas protege o meio ambiente, mas também contribui para o bem-estar social e o desenvolvimento econômico (Silva, 2015).

Governos em todo o mundo têm adotado regulamentações e programas que visam reduzir a geração de resíduos e promover práticas de reciclagem e compostagem. Exemplos incluem a criação de leis que proíbem o uso de sacolas plásticas, incentivos fiscais para empresas que adotam práticas sustentáveis e a implementação de programas de coleta seletiva em comunidades. Essas iniciativas demonstram o papel crucial que as políticas

públicas desempenham na transformação dos sistemas de gestão de resíduos, promovendo uma cultura de sustentabilidade (Crispim, 2016).

A inovação tecnológica é outra força motriz na melhoria da gestão de resíduos sólidos. Avanços em tecnologias de reciclagem, como o desenvolvimento de novos processos para reciclar plásticos complexos e o uso de inteligência artificial para melhorar a eficiência na triagem de materiais, estão revolucionando o setor. Além disso, o surgimento de tecnologias de conversão de resíduos em energia oferece uma solução adicional para o tratamento de resíduos que não podem ser reciclados, transformando-os em recursos energéticos. Essas inovações são essenciais para lidar com o crescente volume de resíduos e para criar um ciclo de gestão mais eficiente e sustentável (Crispim, 2016).

A conscientização da sociedade sobre a importância da gestão de resíduos sólidos é fundamental para o sucesso das políticas e tecnologias implementadas. Programas de educação ambiental que ensinam sobre os impactos dos resíduos no meio ambiente e como reduzir, reutilizar e reciclar são ferramentas poderosas para engajar a população. Campanhas de conscientização que destacam os efeitos negativos da poluição por resíduos e a importância da participação de todos na solução desse problema podem gerar mudanças significativas nos comportamentos diários. A educação ambiental, portanto, é uma peça-chave para criar uma sociedade mais responsável e comprometida com a sustentabilidade (Crispim, 2016).

O papel das comunidades locais na gestão de resíduos sólidos não pode ser subestimado. Muitas vezes, são as iniciativas comunitárias que lideram esforços de reciclagem e compostagem, especialmente em áreas onde a infraestrutura pública é limitada. Essas comunidades desenvolvem soluções adaptadas às suas realidades, como a criação de cooperativas de catadores de recicláveis, que não apenas ajudam a reduzir a quantidade de resíduos destinados aos aterros, mas também geram emprego e renda para os moradores locais. Apoiar e fortalecer essas iniciativas comunitárias é essencial para a construção de sistemas de gestão de resíduos que sejam inclusivos e eficazes. O acúmulo inadequado de lixo em áreas urbanas pode levar à proliferação de vetores de doenças, como ratos e mosquitos, que transmitem enfermidades graves como leptospirose e dengue. Além disso, a queima de

resíduos a céu aberto, uma prática comum em regiões sem infraestrutura adequada, libera poluentes tóxicos no ar, prejudicando a qualidade do ar e causando problemas respiratórios na população. Portanto, garantir que os resíduos sejam coletados, tratados e descartados de maneira adequada é essencial não apenas para proteger o meio ambiente, mas também para preservar a saúde e o bem-estar das comunidades (Gouveia, 2012).

A economia circular surge como um modelo alternativo ao sistema tradicional de produção e consumo, que tem gerado volumes crescentes de resíduos sólidos. Ao contrário da economia linear, que segue o ciclo "extrairproduzir-descartar", a economia circular busca manter os materiais em uso pelo maior tempo possível. Isso envolve a reutilização, reciclagem e recuperação de produtos e materiais, transformando resíduos em recursos valiosos. A adoção desse modelo pode reduzir significativamente a geração de resíduos, ao mesmo tempo em que estimula a inovação e cria novas oportunidades econômicas em setores como reciclagem, remanufatura e design de produtos sustentáveis (Gouveia, 2012).

A participação do setor privado é vital para o sucesso de uma gestão eficiente de resíduos sólidos. Empresas têm um papel crucial na implementação de práticas sustentáveis em suas operações, desde o design de produtos que gerem menos resíduos até a criação de sistemas de logística reversa, onde os consumidores podem devolver produtos e embalagens para serem reciclados ou reutilizados. Além disso, parcerias entre o setor privado e o governo podem resultar em soluções inovadoras para o gerenciamento de resíduos, como a construção de instalações de tratamento de resíduos que utilizem tecnologias avançadas para minimizar os impactos ambientais (Gouveia, 2012).

O desenvolvimento de políticas de responsabilização ampliada do produtor (RAP) é uma abordagem que está ganhando força na gestão de resíduos sólidos. A RAP exige que os fabricantes assumam a responsabilidade pelo ciclo de vida completo de seus produtos, incluindo a fase de pós-consumo. Isso incentiva as empresas a projetarem produtos que sejam mais fáceis de reciclar e a estabelecerem sistemas de coleta para os produtos que chegam ao fim de sua vida útil. A implementação eficaz da RAP pode reduzir a pressão sobre os sistemas de gestão de resíduos públicos e estimular práticas mais sustentáveis no setor privado (Gouveia, 2012).

A inovação social também desempenha um papel importante na gestão de resíduos sólidos, especialmente em comunidades de baixa renda. Iniciativas lideradas por organizações não governamentais (ONGs) e grupos comunitários muitas vezes introduzem soluções criativas para a gestão de resíduos, como programas de reciclagem que oferecem incentivos financeiros para os participantes ou projetos de compostagem comunitária que transformam resíduos orgânicos em fertilizantes para a agricultura local. Essas iniciativas não apenas ajudam a reduzir o volume de resíduos, mas também promovem a inclusão social, criando oportunidades de emprego e fortalecendo a coesão comunitária.

Ferramentas como sensores inteligentes e sistemas de monitoramento em tempo real podem otimizar a coleta de resíduos, reduzindo custos e emissões de gases de efeito estufa. Além disso, plataformas digitais que conectam consumidores a serviços de reciclagem ou troca de produtos usados incentivam a reutilização e a reciclagem, facilitando o desvio de materiais dos aterros sanitários. A aplicação dessas tecnologias é um passo crucial na modernização dos sistemas de gestão de resíduos e na promoção de cidades mais inteligentes e sustentáveis (Marques, 2016).

A conscientização sobre a gestão de resíduos sólidos começa nas escolas, onde a educação ambiental pode moldar a próxima geração de cidadãos conscientes e responsáveis. Incorporar temas como reciclagem, compostagem e redução de resíduos nos currículos escolares ajuda a criar uma cultura de sustentabilidade desde cedo. Programas escolares que incentivam a coleta seletiva e a criação de hortas comunitárias, por exemplo, podem ensinar aos alunos a importância de cuidar do meio ambiente e a necessidade de adotar práticas de consumo responsáveis. A educação ambiental nas escolas é, portanto, uma ferramenta poderosa para construir uma sociedade mais comprometida com a preservação do planeta (Marques, 2016).

A gestão de resíduos sólidos também deve levar em consideração as disparidades socioeconômicas que existem entre diferentes comunidades. Em muitas regiões de baixa renda, a infraestrutura para coleta e tratamento de resíduos é insuficiente, o que pode levar a práticas informais e prejudiciais, como a queima de lixo ou o descarte em terrenos baldios. Essas práticas não só degradam o meio ambiente, mas também afetam desproporcionalmente as

populações mais vulneráveis, que estão mais expostas aos riscos à saúde associados ao manejo inadequado de resíduos. Políticas públicas inclusivas que garantam o acesso universal a sistemas de gestão de resíduos eficazes são essenciais para promover a justiça ambiental (Marques, 2016).

O papel dos catadores de materiais recicláveis na gestão de resíduos sólidos é muitas vezes subestimado, apesar de sua contribuição significativa para a reciclagem e a redução de resíduos. Em muitos países, os catadores desempenham um papel crucial na coleta e triagem de materiais recicláveis, contribuindo para a economia circular e reduzindo a pressão sobre os aterros sanitários. No entanto, esses trabalhadores frequentemente enfrentam condições de trabalho precárias e falta de reconhecimento formal. O apoio a cooperativas de catadores e a inclusão desses trabalhadores nas políticas de gestão de resíduos são medidas fundamentais para garantir que eles sejam valorizados e protegidos em seu trabalho (Marques, 2016).

A poluição plástica não conhece fronteiras, afetando ecossistemas e comunidades em todo o mundo. Iniciativas internacionais, como a Convenção de Basileia, que regula o movimento transfronteiriço de resíduos perigosos, e acordos para reduzir o uso de plásticos descartáveis, são passos importantes para combater essa crise. No entanto, a solução para o problema dos resíduos plásticos também depende de esforços locais, como a promoção de alternativas sustentáveis aos plásticos e a criação de infraestruturas de reciclagem robustas. A combinação de esforços globais e locais é crucial para mitigar os impactos dos resíduos plásticos no meio ambiente (Jacobi, 2011).

A logística reversa é um componente essencial na gestão de resíduos sólidos, especialmente em setores que geram produtos com alto potencial de impacto ambiental, como eletroeletrônicos e embalagens plásticas. Este sistema permite que os produtos retornem ao ciclo produtivo após o consumo, seja para reciclagem, reutilização ou descarte adequado. Empresas que adotam a logística reversa não apenas cumprem obrigações legais, mas também fortalecem sua imagem corporativa e contribuem para a economia circular. Implementar a logística reversa de maneira eficiente requer planejamento, infraestrutura e colaboração entre todos os elos da cadeia produtiva, desde os fabricantes até os consumidores (Jacobi, 2011).

Os resíduos hospitalares apresentam desafios específicos para a gestão de resíduos sólidos, devido ao seu potencial de contaminação e riscos à saúde pública. Esses resíduos incluem materiais infecciosos, químicos perigosos e resíduos perfurocortantes, que necessitam de tratamento especializado para evitar a disseminação de doenças e a contaminação ambiental. O manejo inadequado de resíduos hospitalares pode levar a graves consequências, como a poluição de cursos d'água e a exposição de trabalhadores e comunidades a substâncias tóxicas. Por isso, é fundamental que as instituições de saúde sigam protocolos rigorosos de segregação, coleta, tratamento e descarte de resíduos hospitalares, garantindo a segurança de todos os envolvidos (Jacobi, 2011).

O setor de construção civil também enfrenta desafios significativos relacionados à gestão de resíduos sólidos, dado o grande volume de entulho gerado em obras e demolições. Estes resíduos, se não forem geridos de forma adequada, podem resultar em desperdício de recursos e degradação ambiental. A reciclagem de materiais de construção, como concreto, tijolos e metais, é uma prática que pode reduzir significativamente a quantidade de entulho destinado aos aterros, além de promover a economia de recursos naturais. Incentivar práticas de construção sustentável, como o uso de materiais reciclados e técnicas de demolição seletiva, pode transformar o setor da construção em um exemplo de economia circular (Jacobi, 2011).

A compostagem de resíduos orgânicos é uma solução eficaz para reduzir a quantidade de lixo enviado aos aterros sanitários, ao mesmo tempo em que cria um produto valioso para a agricultura e jardinagem. Resíduos orgânicos, como restos de alimentos e poda de jardins, podem ser transformados em adubo natural por meio do processo de compostagem, que envolve a decomposição controlada da matéria orgânica. A implementação de programas de compostagem em escala doméstica, comunitária e municipal pode contribuir significativamente para a gestão sustentável de resíduos sólidos, além de promover a conscientização sobre a importância de fechar o ciclo de nutrientes na natureza. Resíduos como plásticos, metais e produtos químicos podem contaminar rios, lagos e oceanos, afetando a vida aquática e a qualidade da água potável. Além disso, a poluição dos corpos d'água pode ter efeitos indiretos sobre a saúde humana e a economia, prejudicando a pesca, o turismo

e outras atividades dependentes de recursos hídricos saudáveis. A implementação de políticas de prevenção e controle, como a instalação de sistemas de coleta de lixo em áreas de risco e a educação da população sobre o descarte correto de resíduos, é essencial para proteger os recursos hídricos e garantir a sustentabilidade a longo prazo (Jacobi, 2011).

3.2. Biochar: principais conceitos

Morales et al. (2013) descrevem o biochar como um material orgânico com características variáveis, que possui um grande potencial para melhorar a qualidade do solo, promovendo o aumento da fertilidade e otimizando a retenção de água. A composição química do biochar é complexa e variável, influenciada por diversos fatores, como a fonte de matéria-prima, o tamanho das partículas e as condições de pirólise. Uma das propriedades relevantes do biochar é sua interação com o fósforo (P), especialmente em solos tropicais, onde a biodisponibilidade de P é frequentemente limitada por componentes do solo, como o ferro (Fe) e o alumínio (Al).

Os autores realizaram dois conjuntos de estudos para explorar a sorção e dessorção de P em solos tratados com biochar. O primeiro estudo analisou biochars produzidos a partir da madeira de três espécies de árvores da Amazônia, focando nas características de interação do P. O segundo conjunto de experimentos avaliou o efeito de um biochar obtido por pirólise rápida adicionado a um solo tropical degradado, investigando como esse material alterou a dinâmica de sorção e dessorção de P. Em um dos casos, o biochar de pirólise rápida diminuiu a capacidade de retenção de P em um solo degradado. Por outro lado, os biochars resultantes de pirólise lenta mostraram efeitos variados na sorção de P, indicando que eles podem ser utilizados para gerenciar a disponibilidade de P de maneiras distintas, dependendo do tipo de solo (Morales, 2013).

Apoiado pelas pesquisas de Lehmann (2009), o estudo buscou avaliar se a aplicação de biochar no solo poderia ajudar a reduzir as emissões de N₂O (óxido nitroso), um gás que contribui para o aquecimento global e que está relacionado aos fertilizantes nitrogenados usados na agricultura. Realizado pela

Embrapa Agrobiologia, o experimento utilizou um delineamento aleatório, com diferentes doses de biochar, especificamente carvão vegetal comercial. Os resultados mostraram uma redução de até 52% nas emissões totais de N₂O, evidenciando o potencial do biochar para mitigar essas emissões.

No mesmo contexto, Carmo et al. (2010) investigaram os efeitos do biochar na mitigação de gases de efeito estufa, utilizando solo do Cerrado, o segundo maior bioma do Brasil. Essa região é crucial para a produção de soja, carne, arroz, milho, café, feijão, mandioca e cana-de-açúcar. Os experimentos utilizaram biochar derivado de eucalipto (*Eucalyptus sp.*), aplicado em parcelas experimentais, onde foram avaliadas as concentrações de elementos como Ca, Mg, Al, H + Al, P, K, Cu, Zn, Fe, Mn, matéria orgânica e pH. Os resultados mostraram uma redução significativa no alumínio e um aumento no potássio, atribuídos à composição do biochar. A diminuição do alumínio deve-se à presença de carbono fenólico, que se liga ao metal, enquanto o aumento do potássio se relaciona com as cinzas ricas nesse elemento. Essas mudanças promovem a redução da acidez do solo, melhoram o desenvolvimento do feijoeiro e minimizam os efeitos adversos da escassez de água.

O biochar é frequentemente descrito como biomassa carbonizada, destinada à aplicação no solo, onde melhora suas propriedades e contribui para o sequestro de carbono. Esse sequestro ocorre devido à presença de carbono altamente estável e predominantemente aromático no biochar. Produzido pela pirólise, o biochar se degrada de maneira muito mais lenta, armazenando carbono no solo de forma 1500 a 2000 vezes mais duradoura do que a matéria orgânica não pirolisada, podendo permanecer por séculos ou até milênios. Suas estruturas internas, semelhantes ao grafite, favorecem essa estabilidade, tornando-o um sistema eficiente de sequestro de carbono (Maia, 2010). O biochar tem sido recentemente estudado como uma técnica promissora para a fixação de carbono no solo, por três motivos principais: sua produção é relativamente simples e de baixo impacto ambiental, a biomassa está amplamente disponível, e ele tem um grande potencial para melhorar a qualidade do solo. Além disso, pode transformar resíduos que, se descartados inadequadamente, se tornam poluentes. Praticamente qualquer tipo de biomassa pode ser carbonizada para produzir biochar (Maia, 2010).

O sequestro de carbono em solos agrícolas é atraente devido à capacidade significativa de armazenamento de carbono nesses ambientes. O aumento do carbono no solo resulta do equilíbrio entre as entradas e saídas de carbono, sendo as entradas relacionadas à biomassa gerada por plantas e à adição externa de carbono, como o biochar. Mudanças nas práticas agrícolas, como rotação de culturas e aplicação de resíduos orgânicos (compostos, restos de colheitas, esterco, entre outros), podem incrementar o carbono orgânico no solo, aumentando as entradas e reduzindo a taxa de decomposição (Maia, 2010).

O biochar é composto principalmente por carbono recalcitrante, macro e micronutrientes, com a quantidade e a disponibilidade destes elementos variando conforme a matéria-prima e as condições de pirólise. Esse material pirolisado, caracterizado por altas concentrações de carbono e baixo teor de nitrogênio, apresenta uma relação C/N elevada e uma taxa de mineralização baixa, o que contribui para sua longa permanência no solo (Vaccari, 2011).

A composição estrutural e química do biochar é bastante diversa entre seus diferentes tipos, mas algumas características são comuns, como a coloração escura, pH geralmente neutro a básico, alto conteúdo de carbono e grau de aromaticidade, que ajudam a explicar sua recalcitrância. A exata composição do biochar depende da combinação do tipo de matéria-prima e das condições de pirólise, fatores que também influenciam o tamanho das partículas, a distribuição dos poros e o comportamento funcional do material no meio ambiente (Vaccari, 2011).

A porosidade do biochar determina sua área superficial, com uma distribuição de poros que varia de nano (<0,9 nm) e micro (<12 nm) a macroporos (>50 nm) (Lehmann et al., 2009). A capacidade de troca catiônica (CTC) do biochar é influenciada pelo tipo de biomassa utilizada e pela temperatura da pirólise, sendo que temperaturas mais altas tendem a reduzir a CTC devido à perda de grupos funcionais. Com o envelhecimento, a CTC tende a aumentar pela formação de grupos funcionais, como os carboxílicos, enquanto a capacidade de troca aniônica (CTA) diminui, resultante da perda de carga positiva na superfície (Vaccari, 2011).

O uso do biochar como estratégia para impulsionar o crescimento de microrganismos benéficos, além de servir para produção de energia, manejo do

solo e sequestro de carbono, pode começar com iniciativas individuais, como as de agricultores e municípios, mas pode evoluir para políticas governamentais e de organizações internacionais, facilitando o avanço tecnológico e o estudo dessa prática. Essa abordagem permite expandir suas aplicações em diversos setores.

É fundamental considerar a utilização de biomassa, que desempenha outras funções importantes no ecossistema, e equilibrá-las com as necessidades humanas. É preciso avaliar os potenciais conflitos entre a produção de biochar e a de alimentos. Além disso, o uso de resíduos como cobertura do solo pode proteger sua superfície, complementando a ação do biochar, que melhora a qualidade do solo e sua produtividade. Assim, enquanto o biochar contribui para a saúde do solo, a cobertura de resíduos ajuda a controlar a erosão hídrica e eólica. Portanto, nem toda a biomassa deve ser direcionada para a produção de biochar (Singh, B.P, 2010).

O biochar é amplamente reconhecido por sua capacidade de melhorar a retenção de água no solo, o que é especialmente valioso em regiões propensas a secas. Essa característica é crucial para a agricultura sustentável, pois ajuda a manter a umidade do solo por períodos mais longos, reduzindo a necessidade de irrigação frequente. Isso não apenas economiza recursos hídricos, mas também pode aumentar a resiliência das culturas diante de condições climáticas adversas.

Além de sua função de retenção de água, o biochar também desempenha um papel importante na melhoria da fertilidade do solo. Sua estrutura porosa permite que ele armazene nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, tornando-os mais disponíveis para as plantas. Quando aplicado ao solo, o biochar ajuda a criar um ambiente mais favorável ao crescimento das raízes e à atividade microbiana, promovendo um ciclo de nutrientes mais eficiente. Outra vantagem do biochar é sua capacidade de sequestrar carbono, o que contribui para a mitigação das mudanças climáticas. Ao ser incorporado ao solo, ele pode permanecer estável por longos períodos, reduzindo a quantidade de dióxido de carbono liberado na atmosfera. Isso transforma o biochar em uma solução potencial para enfrentar o aquecimento global, ao mesmo tempo em que melhora as condições do solo (Nematian, 2021). Além disso, a aplicação de biochar pode ajudar a reduzir a acidez do solo, um

problema comum em várias regiões agrícolas. A neutralização da acidez pode melhorar a disponibilidade de nutrientes e criar um ambiente mais propício para o crescimento das plantas. Essa capacidade de modificação do pH do solo torna o biochar uma ferramenta valiosa para agricultores que buscam otimizar a produtividade de suas lavouras. Muitas vezes, o biochar é produzido a partir de resíduos agrícolas, florestais ou urbanos que, de outra forma, seriam descartados de maneira inadequada. Isso não apenas ajuda a minimizar a poluição, mas também transforma resíduos em um recurso valioso que pode beneficiar tanto o solo quanto as práticas agrícolas. Assim, a adoção do biochar não só promove a sustentabilidade ambiental, mas também pode oferecer soluções econômicas para os agricultores (Nematian, 2021).

A aplicação de biochar no solo também pode favorecer a biodiversidade do ecossistema agrícola. A estrutura porosa do biochar cria micro habitats que podem abrigar uma variedade de organismos benéficos, como fungos e bactérias. Esses microrganismos desempenham um papel vital na decomposição da matéria orgânica e na ciclagem de nutrientes, contribuindo para um solo mais saudável e produtivo. Essa interação entre o biochar e a microbiota do solo é crucial para a sustentabilidade a longo prazo das práticas agrícolas.

Em solos onde a lixiviação é alta, os nutrientes essenciais podem ser facilmente levados pela água da chuva ou pela irrigação, resultando em desperdício e na necessidade de fertilizantes adicionais. O biochar, ao reter nutrientes, pode reduzir essas perdas, promovendo uma fertilização mais eficiente e econômica. A adoção do biochar também se alinha com as práticas de agricultura regenerativa, que buscam restaurar a saúde do solo e aumentar a resiliência dos sistemas agrícolas. Ao melhorar a estrutura do solo e aumentar sua capacidade de retenção de água e nutrientes, o biochar apoia os princípios dessa abordagem, que enfatiza a importância de trabalhar em harmonia com os processos naturais. Isso não só resulta em solos mais produtivos, mas também em ecossistemas mais equilibrados (Tan, 2015).

O potencial do biochar vai além da agricultura, podendo ser utilizado em diversas aplicações ambientais. Por exemplo, sua capacidade de absorver poluentes torna-o um material promissor para a remediação de solos contaminados. Quando aplicado em áreas afetadas por poluentes, o biochar

pode ajudar a filtrar substâncias tóxicas, contribuindo para a recuperação ambiental. Dessa forma, o biochar se destaca como uma solução multifuncional, beneficiando tanto a agricultura quanto a preservação do meio ambiente (Tan, 2015).

A incorporação do biochar nas práticas agrícolas também pode promover uma melhor adaptação às mudanças climáticas. Com o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como secas e enchentes, a resiliência do solo torna-se essencial para a segurança alimentar. O biochar, ao melhorar a estrutura e a capacidade de retenção de água do solo, ajuda as culturas a suportarem essas condições adversas, reduzindo os riscos para os agricultores e garantindo colheitas mais estáveis (Tan, 2015).

Ao transformar resíduos orgânicos em biochar, é possível fechar o ciclo de produção e consumo, aproveitando materiais que, de outra forma, seriam descartados. Essa prática não apenas reduz a quantidade de resíduos enviados a aterros, mas também gera um produto que oferece benefícios tanto ambientais quanto econômicos. Novas tecnologias e métodos de pirólise estão sendo explorados para otimizar a qualidade do biochar e aumentar sua eficiência em diferentes contextos agrícolas. À medida que mais agricultores adotam essas práticas, espera-se que o biochar se torne uma ferramenta cada vez mais valiosa na busca por sistemas agrícolas mais sustentáveis e produtivos (Tan, 2015). Em suma, o biochar emerge como uma solução inovadora e multifacetada para enfrentar diversos desafios enfrentados pela agricultura moderna e pela sustentabilidade ambiental. Sua capacidade de melhorar a qualidade do solo, aumentar a retenção de água e nutrientes, promover a biodiversidade, e auxiliar na mitigação das mudanças climáticas destaca sua relevância em um mundo que busca práticas agrícolas mais sustentáveis. Ao transformar resíduos em um recurso valioso, o biochar não apenas contribui para uma economia circular, mas também oferece aos agricultores uma ferramenta eficaz para aumentar a resiliência de suas culturas. À medida que as pesquisas avançam e mais agricultores adotam essa prática, o biochar tem o potencial de se tornar um componente fundamental na construção de um futuro agrícola mais sustentável, equilibrando produtividade e responsabilidade ambiental, e garantindo a segurança alimentar em face de um clima em constante mudança (Wang, 2023).

3.3. Uso de biochar no âmbito da engenharia ambiental

O biochar, um material carbonizado produzido a partir da queima controlada de biomassa, tem ganhado destaque no campo da engenharia ambiental devido ao seu potencial de melhorar a qualidade do solo, sequestrar carbono e tratar poluentes. Este material poroso é criado através do processo de pirólise, onde a biomassa é aquecida em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio, resultando em um produto rico em carbono. O uso de biochar na engenharia ambiental é amplamente estudado por suas propriedades de adsorção, que permitem a retenção de nutrientes e a remediação de contaminantes, tornando-o uma ferramenta promissora na mitigação de impactos ambientais (Lehmann, 2009).

Uma das principais aplicações do biochar na engenharia ambiental é a melhoria da qualidade do solo. Sua capacidade de aumentar a retenção de água, melhorar a estrutura do solo e fornecer uma superfície para a colonização de microrganismos benéficos contribui para a fertilidade e a saúde do solo. Além disso, o biochar pode reduzir a lixiviação de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, prevenindo a contaminação de corpos d'água próximos e promovendo a eficiência do uso de fertilizantes. Isso é particularmente relevante em áreas agrícolas, onde o uso de biochar pode aumentar a produtividade de forma sustentável (Lehmann, 2009).

O sequestro de carbono é outra vantagem significativa do uso de biochar no contexto ambiental. Ao converter biomassa em biochar, o carbono que de outra forma seria liberado na forma de dióxido de carbono durante a decomposição é armazenado no solo por longos períodos. Esse processo contribui para a mitigação das mudanças climáticas, oferecendo uma estratégia viável para remover o carbono da atmosfera e reduzi-lo como gás de efeito estufa. A aplicação do biochar em solos agrícolas e florestais pode, portanto, desempenhar um papel importante na captura de carbono e na mitigação do aquecimento global (Lehmann, 2009).

Além de suas aplicações no solo, o biochar é eficaz na remediação de ambientes contaminados. Sua alta capacidade de adsorção permite que ele

remova poluentes como metais pesados, pesticidas e outros compostos orgânicos do solo e da água. Isso faz do biochar uma opção atrativa para a biorremediação de áreas industriais poluídas e para o tratamento de águas residuais. O uso de biochar em sistemas de tratamento de água, como filtros, pode melhorar a qualidade da água potável e reduzir a carga de poluentes em ambientes aquáticos, contribuindo para a proteção dos recursos hídricos (Lehmann, 2009).

O potencial do biochar na engenharia ambiental vai além do sequestro de carbono e da remediação. Estudos sugerem que ele pode ser utilizado na recuperação de áreas degradadas, na estabilização de resíduos sólidos e até na redução de emissões de gases de efeito estufa provenientes de aterros sanitários. A versatilidade do biochar, aliada ao seu baixo custo e à possibilidade de produção a partir de resíduos agrícolas e florestais, faz dele uma solução promissora para diversos desafios ambientais. Assim, o uso do biochar representa uma abordagem integrada e sustentável dentro da engenharia ambiental, promovendo a resiliência dos ecossistemas e a sustentabilidade dos recursos naturais (Nobrega, 2011).

O uso de biochar na agricultura sustentável tem se mostrado uma prática inovadora e benéfica para a gestão de resíduos e para a recuperação de solos degradados. Ao incorporar biochar em solos empobrecidos, é possível não apenas melhorar a estrutura e a fertilidade do solo, mas também aumentar a capacidade de retenção de nutrientes, o que é crucial em ambientes sujeitos à erosão e à degradação. Essa prática ajuda a restaurar áreas que, de outra forma, seriam improdutivas, promovendo a regeneração da vegetação e a biodiversidade local. Em longo prazo, o biochar pode contribuir para a recuperação de ecossistemas inteiros, transformando solos inférteis em áreas produtivas e ecologicamente saudáveis (Nobrega, 2011).

Outro aspecto importante do biochar na engenharia ambiental é o seu potencial para reduzir a emissão de gases de efeito estufa, particularmente em sistemas agrícolas e de gestão de resíduos. Quando aplicado ao solo, o biochar não apenas sequestra carbono, mas também pode diminuir as emissões de metano e óxido nitroso, dois potentes gases de efeito estufa que são liberados durante a decomposição de matéria orgânica em condições anaeróbicas. Em aterros sanitários, por exemplo, a adição de biochar pode

ajudar a estabilizar os resíduos e reduzir a produção desses gases, contribuindo para um menor impacto ambiental e uma gestão de resíduos mais sustentável (Nobrega, 2011).

O biochar também se destaca no tratamento de águas residuais, uma área crítica na engenharia ambiental. Devido à sua alta porosidade e superfície específica, o biochar tem uma capacidade superior de adsorver contaminantes presentes na água, como metais pesados, compostos orgânicos e até mesmo resíduos farmacêuticos. Isso faz dele uma excelente opção para uso em sistemas de tratamento de água, como leitos filtrantes e wetlands construídas. Além de ser uma solução eficaz para a purificação da água, o uso de biochar nesses sistemas é econômico e sustentável, pois pode ser produzido a partir de resíduos agrícolas e florestais, agregando valor a materiais que seriam descartados (Rezende, 2011).

No contexto da gestão de resíduos sólidos, o biochar oferece uma solução interessante para a reciclagem de resíduos orgânicos. A pirólise de resíduos vegetais, por exemplo, não só reduz o volume de resíduos destinados aos aterros, mas também gera biochar, que pode ser reaproveitado em diversas aplicações ambientais. Isso cria um ciclo virtuoso, onde os resíduos são transformados em um recurso valioso, contribuindo para a economia circular e reduzindo a dependência de recursos não renováveis. A produção de biochar a partir de resíduos também reduz as emissões associadas à decomposição anaeróbica em aterros, oferecendo uma alternativa ambientalmente amigável e economicamente viável (Rezende, 2011).

Ao integrar o biochar em projetos de restauração ecológica, gestão de recursos hídricos e agricultura, é possível criar soluções que beneficiam tanto o meio ambiente quanto as comunidades locais. Além disso, o uso de biochar pode incentivar a adoção de tecnologias de baixo impacto ambiental, promovendo a inovação e o desenvolvimento de novas metodologias de gestão de recursos naturais. Dessa forma, o biochar não é apenas um insumo versátil, mas também uma ferramenta estratégica para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos de maneira integrada e sustentável (Rezende, 2011). Durante o processo de pirólise, que transforma a biomassa em biochar, é possível capturar e utilizar os gases liberados como fonte de energia. Essa bioenergia, que pode ser convertida em calor ou eletricidade, oferece uma alternativa

sustentável aos combustíveis fósseis, contribuindo para a redução das emissões de carbono e para a diversificação da matriz energética. O aproveitamento dos subprodutos da pirólise para a geração de energia cria uma sinergia entre a gestão de resíduos, a produção de biochar e a oferta de energia limpa.

Além disso, o biochar tem sido explorado como uma solução promissora para a remediação de solos contaminados com hidrocarbonetos e metais pesados. Devido à sua alta capacidade de adsorção, o biochar pode imobilizar esses contaminantes, reduzindo sua biodisponibilidade e minimizando os riscos de contaminação das águas subterrâneas. Essa aplicação é especialmente relevante em áreas industriais e urbanas, onde a contaminação do solo é uma preocupação crescente. A utilização do biochar na remediação de solos não só ajuda a mitigar os impactos ambientais, mas também oferece uma alternativa mais econômica e menos invasiva em comparação com outras técnicas de descontaminação (Souza, 2016).

Na agricultura, o uso de biochar pode contribuir para a sustentabilidade dos sistemas agroflorestais, promovendo a saúde do solo e a produtividade das culturas. Em sistemas agroflorestais, onde árvores e culturas agrícolas são cultivadas de forma integrada, o biochar pode melhorar a retenção de água e nutrientes no solo, favorecendo o crescimento das plantas e aumentando a resistência das culturas a condições de estresse, como secas prolongadas. Além disso, o biochar pode atuar como um reservatório de carbono a longo prazo, ajudando a mitigar as emissões de gases de efeito estufa associadas à agricultura e contribuindo para a resiliência climática das áreas rurais (Souza, 2016).

A pesquisa sobre o uso do biochar também está avançando na área da construção civil, onde ele pode ser utilizado como aditivo em materiais de construção. Incorporar biochar em concreto e tijolos, por exemplo, pode melhorar as propriedades desses materiais, como a resistência à compressão e a durabilidade, ao mesmo tempo em que reduz a pegada de carbono do setor de construção. Essa abordagem inovadora não só contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também abre novas oportunidades para o desenvolvimento de produtos de construção ecológicos, que podem ser uma resposta à crescente demanda por práticas construtivas mais sustentáveis. A

produção e o uso de biochar promovem a valorização dos resíduos, fechando o ciclo de produção e consumo de forma sustentável. Isso cria um modelo econômico em que os resíduos são minimizados e os recursos são continuamente reaproveitados, contribuindo para a redução da pressão sobre os recursos naturais e a mitigação dos impactos ambientais. A integração do biochar na economia circular exemplifica como práticas inovadoras e sustentáveis podem ser adotadas para enfrentar os desafios ambientais globais, promovendo um futuro mais equilibrado e sustentável (Souza, 2016).

O uso de biochar na gestão de biorresíduos urbanos apresenta uma oportunidade inovadora para as cidades se tornarem mais sustentáveis. Biorresíduos, como resíduos alimentares e de jardins, são frequentemente descartados em aterros sanitários, onde se decompõem e geram metano, um potente gás de efeito estufa. No entanto, ao processar esses resíduos em biochar através da pirólise, não só se evita a emissão de metano, mas também se produz um material útil que pode ser reintegrado ao solo urbano. Essa abordagem não apenas diminui o impacto ambiental dos resíduos urbanos, mas também contribui para a criação de espaços verdes mais saudáveis nas cidades. O potencial do biochar na mitigação das mudanças climáticas vai além do sequestro de carbono. Estudos indicam que sua aplicação pode também melhorar a eficiência dos fertilizantes, reduzindo a necessidade de insumos químicos e, conseqüentemente, as emissões de óxidos de nitrogênio, outro grupo de gases de efeito estufa. Ao melhorar a eficiência do uso de nutrientes no solo, o biochar contribui para uma agricultura mais sustentável e menos dependente de produtos químicos, o que é crucial para a redução das emissões agrícolas e a proteção dos ecossistemas aquáticos de contaminação por nutrientes (Matovic, 2016).

Em áreas urbanas, o biochar pode ser utilizado em projetos de infraestrutura verde, como telhados e paredes verdes, e em sistemas de drenagem sustentável, como jardins de chuva. Nessas aplicações, o biochar atua como um meio de filtração natural, melhorando a qualidade da água ao remover poluentes e promovendo a infiltração da água da chuva no solo, o que ajuda a mitigar enchentes. Além disso, seu uso em telhados e paredes verdes pode melhorar a eficiência energética dos edifícios, ao proporcionar isolamento térmico e reduzir a necessidade de aquecimento e resfriamento artificial,

promovendo um ambiente urbano mais sustentável e resiliente (Matovic, 2016). No contexto da recuperação de áreas mineradas, o biochar oferece uma solução para restaurar a fertilidade e a funcionalidade ecológica dos solos degradados. As atividades de mineração frequentemente deixam o solo empobrecido e contaminado, com baixa capacidade de suporte à vegetação. Ao incorporar biochar nesses solos, é possível melhorar suas propriedades físicas e químicas, como a retenção de água e nutrientes, e promover a reestabilização da vegetação nativa. Isso facilita a recuperação da biodiversidade e a reintegração dessas áreas ao ecossistema, transformando terrenos anteriormente devastados em paisagens produtivas e ambientalmente equilibradas (Matovic, 2016).

Ao ser aplicado em práticas como o plantio direto e a agrofloresta, o biochar contribui para a retenção de carbono no solo e para a melhoria da estrutura e fertilidade do solo, aspectos essenciais para a sustentabilidade a longo prazo da produção agrícola. Essas práticas não apenas combatem as mudanças climáticas, mas também aumentam a resiliência das comunidades rurais frente aos desafios ambientais e econômicos, promovendo um modelo de agricultura que é simultaneamente produtivo e regenerativo (Matovic, 2016). Quando adicionado a sistemas de cultivo de peixes e moluscos, o biochar ajuda a melhorar a qualidade da água, reduzindo a concentração de amônia e nitritos, que são prejudiciais aos organismos aquáticos. Além disso, o biochar pode servir como substrato para o crescimento de microalgas e bactérias benéficas que contribuem para a remoção de poluentes e a estabilização do ambiente aquático. Essa aplicação do biochar não apenas melhora as condições de cultivo, mas também promove práticas de aquicultura mais sustentáveis e com menor impacto ambiental.

O uso de biochar no controle de erosão do solo é outra aplicação promissora que pode beneficiar a engenharia ambiental. Em áreas propensas à erosão, como encostas e áreas desmatadas, a aplicação de biochar pode ajudar a estabilizar o solo, reduzindo a perda de partículas e a sedimentação em corpos d'água próximos. A estrutura porosa do biochar melhora a coesão do solo e aumenta a retenção de água, o que contribui para a prevenção da erosão e a conservação da qualidade do solo. Esse uso do biochar pode ser especialmente valioso em projetos de restauração de áreas afetadas por

desastres naturais ou atividades humanas, ajudando a recuperar a integridade do solo e promover a recuperação ecológica (Novak, 2009).

A pesquisa em engenharia ambiental tem explorado também o potencial do biochar como um material de construção sustentável. Incorporar biochar em misturas de concreto e outros materiais de construção pode não apenas reduzir a pegada de carbono desses produtos, mas também melhorar suas propriedades térmicas e acústicas. O biochar pode atuar como um agente de leveza e isolamento, reduzindo o peso dos materiais e aumentando sua eficiência energética. Essa aplicação é relevante em um contexto de crescente demanda por práticas de construção ecológicas, oferecendo uma solução que combina a gestão de resíduos e a inovação em materiais de construção sustentáveis (Novak, 2009).

O uso de biochar no tratamento de resíduos industriais também tem mostrado promissora eficácia. Indústrias que lidam com resíduos orgânicos ou contaminantes podem utilizar biochar para adsorver substâncias tóxicas e reduzir a carga poluente em efluentes. O biochar pode ser aplicado em processos de filtragem e purificação, melhorando a eficiência no tratamento de resíduos e possibilitando a recuperação de materiais valiosos. Essa aplicação contribui para a minimização do impacto ambiental das atividades industriais e para a promoção de práticas de gestão de resíduos mais responsáveis e sustentáveis (Novak, 2009).

Além dos benefícios já mencionados, o biochar pode ter um impacto positivo em projetos de recuperação de áreas afetadas por queimadas e desastres naturais. Em solos queimados, onde a estrutura do solo é danificada e a fertilidade é reduzida, a aplicação de biochar pode ajudar a restaurar a capacidade de retenção de água e nutrientes, facilitando o crescimento de novas vegetações. Essa prática contribui para a restauração do habitat e a recuperação da biodiversidade, oferecendo uma solução eficaz para enfrentar os desafios ambientais resultantes de queimadas e outros eventos de degradação do solo. O biochar, assim, se destaca como uma ferramenta versátil e sustentável na engenharia ambiental, com múltiplas aplicações que beneficiam tanto os ecossistemas quanto as comunidades humanas (Novak, 2009).

Devido à sua alta área de superfície e capacidade de adsorção, o biochar pode capturar e reter poluentes atmosféricos como gases ácidos e compostos orgânicos voláteis. Quando usado em filtros de ar ou sistemas de ventilação, o biochar pode ajudar a reduzir a concentração de poluentes em ambientes industriais e urbanos, melhorando a qualidade do ar e contribuindo para a saúde pública. Essa aplicação é particularmente relevante em áreas com alta carga de poluentes atmosféricos e pode ser uma solução prática e sustentável para a purificação do ar (Sohi, 2010).

No setor de energia, o biochar pode ser integrado em sistemas de armazenamento de energia, como baterias e supercapacitores. Sua estrutura porosa e propriedades elétricas permitem que o biochar funcione como um material condutor e de armazenamento de carga em dispositivos de energia. Estudos têm mostrado que o biochar pode melhorar a capacidade e a eficiência desses sistemas, oferecendo uma alternativa sustentável e de baixo custo aos materiais tradicionais utilizados em armazenamento de energia. Esta aplicação pode não apenas ajudar a promover o uso mais eficiente da energia renovável, mas também reduzir a dependência de materiais raros e caros (Sohi, 2010). O uso de biochar para a recuperação de áreas mineradas ou degradadas pode transformar terrenos anteriormente inutilizáveis em áreas produtivas e ecologicamente saudáveis. Ao adicionar biochar aos solos afetados pela mineração, é possível melhorar a fertilidade, promover o crescimento de vegetação e estabilizar o solo. O biochar também pode ajudar a imobilizar contaminantes residuais e melhorar as condições para o desenvolvimento de ecossistemas naturais. Essa abordagem não só facilita a recuperação de áreas degradadas, mas também contribui para a sustentabilidade da mineração ao fornecer uma solução prática para a reabilitação ambiental (Sohi, 2010).

A integração do biochar em projetos de urbanismo sustentável, como a criação de jardins comunitários e hortas urbanas, oferece benefícios tanto ambientais quanto sociais. Ao melhorar a qualidade do solo e aumentar a retenção de água, o biochar pode ajudar a criar espaços verdes mais produtivos e resilientes nas cidades. Esses espaços não apenas fornecem alimentos frescos e locais para as comunidades urbanas, mas também contribuem para o bem-estar psicológico e social dos residentes. O uso de biochar nesses contextos promove a sustentabilidade urbana e fortalece a conexão das pessoas com a

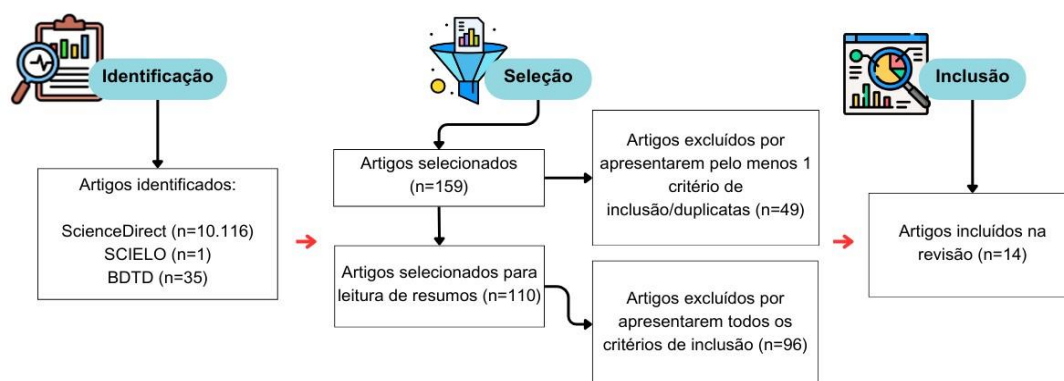
natureza. O biochar pode ser utilizado para estabilizar e reduzir a massa de resíduos sólidos, melhorando a eficiência dos processos de compostagem e digestão anaeróbica. Além disso, sua capacidade de adsorver contaminantes e nutrientes pode ajudar a prevenir a poluição do solo e da água associada ao descarte inadequado de resíduos. O uso de biochar na gestão de resíduos não só contribui para a redução do impacto ambiental, mas também promove uma abordagem circular para a utilização de recursos e gestão de resíduos (Sohi, 2010).

4. METODOLOGIA

Para que o objetivo proposto neste estudo de revisão bibliográfica integrativa seja alcançado, foram estabelecidos alguns critérios de inclusão e exclusão, para um total de 14 trabalhos considerados na coletânea. Com essa visão, de acordo com (Batista e Kumada, 2021), a importância do rigor metodológico na pesquisa científica e acadêmica destaca a necessidade de os pesquisadores se orientarem pela literatura existente para decidir sobre as abordagens e procedimentos de coleta e análise de dados. As diferentes tipologias de pesquisa, incluindo métodos qualitativos, quantitativos e mistos, definem o caráter da revisão bibliográfica. Uma abordagem qualitativa ou quantitativa são métodos mais precisos.

Desta forma, foi realizada uma busca por palavras-chave e termos relacionados relevantes para o tema em questão, como: “aplicabilidade de biochar” e “engenharia ambiental”. A pesquisa se restringiu a artigos, trabalhos de conclusão de curso e dissertações de mestrado publicados pela plataforma Science Direct (10.116 trabalhos), pela SciELO (1 trabalho) e pela BDTD, ou Base Digital de Teses e Dissertações (35 trabalhos), no período entre 2014 e 2023 (últimos 10 anos). Ao todo, foram 159 trabalhos, dos quais 145 foram excluídos pelo critério de exclusão, resultando em 14 artigos incluídos na revisão. Como critérios de exclusão, foi considerada a repetição do termo “biochar” por menos de 10 vezes.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia da etapa de seleção e inclusão dos estudos



Fonte: própria autoria

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dos 159 artigos selecionados, foram incluídos 14 datados entre os anos de 2014 e 2023. No quadro 1, apresenta-se os trabalhos incluídos no estudo através de revisão integrativa ordenada por: título e ano, autor, objetivo, origem e resultados de pesquisa.

Quadro 1 – Trabalhos selecionados para compor a Revisão Integrativa

ARTIGO 1
<p>TÍTULO: Caracterização de diferentes biomassas vegetais para produção de biocarvões (2017)</p> <p>AUTOR: VEIGA, T. R. L. A. et al.</p> <p>OBJETIVO: Analisar diferentes biomassas, caracterizando-as como potenciais para produção de biochar.</p> <p>ORIGEM: UFLA, Brasil.</p> <p>RESULTADOS: As biomassas foram moídas e peneiradas e, em seguida, armazenadas sob condições de temperatura e umidade controlada. Posteriormente realizou-se a caracterização dos materiais, por meio de análise química, química imediata, elementar (CHNS-O), térmica (TGA e DTA) e de espectroscopia vibracional na região do infravermelho (FTIR). De forma geral, todas as biomassas apresentaram potencial para serem utilizadas na produção de biocarvão, no entanto, a casca de café apresentou maiores teores de lignina, extrativos, cinzas e carbono fixo, o que, certamente, contribuiu para que a mesma apresentasse maior potencial de utilização como condicionador de solos. Com relação à análise de FTIR, observou-se a presença de bandas referentes aos grupos químicos recalcitrantes, como os carboxílicos e fenólicos nos espectros de todas as biomassas.</p>
ARTIGO 2
<p>TÍTULO: Solar pyrolysis and electrical furnace pyrolysis of <i>Luffa cylindrica</i></p>

fibers to obtain adsorbent biochar (2022)

AUTOR: SOUZA, P. H. C.

OBJETIVO: Estudar a pirólise de fibras de *Luffa cylindrica* (em conjuntos elétricos e solares) para obter um bom biochar adsorvente.

ORIGEM: UFMG, Brasil.

RESULTADOS: Dois pirolisares solares de diferentes designs foram construídos neste trabalho, um com coletor de calha parabólica e o outro com coletor de prato parabólico. Os custos de construção foram de R\$ 10.000 e R\$ 200, respectivamente. Os cálculos de transferência de calor estão disponíveis como resultado deste trabalho. Este projeto de pesquisa estudou a pirólise lenta de *Luffa cylindrica* para a obtenção de biocarvão nos pirolisados solares e em um reator elétrico. Diferentes temperaturas terminais (300, 400 e 500 °C) e taxas de aquecimento (2, 10 e 20 ° C.min⁻¹) foram testadas sob atmosfera de nitrogênio no forno elétrico. O experimento de pirólise solar foi realizado no reator com coletor de prato parabólico sob fluxo de nitrogênio por 1 hora, chegando a temperaturas de até 417 °C. O pirolisador de calha parabólica não foi operacionalizado até a redação deste documento devido a questões técnicas e logísticas. Os biocarvões obtidos foram caracterizados via número de iodo, TG/DTG, FTIR, PCS e MEV. A influência dos parâmetros de pirólise no rendimento, composição, grupos funcionais de superfície, poder calorífico e morfologia dos biocarvões foi estudada e discutida neste trabalho. Todos os biocarvões produzidos e um carvão ativado comercial também foram submetidos a testes de adsorção de iodo para avaliar a influência dos parâmetros do processo no desempenho de adsorção.

ARTIGO 3

TÍTULO: Efeito da aplicação de biochar na retenção e mobilidade do corante Direct Black 22 num solo aluvionar do Alto Capibaribe (2021)

AUTOR: BEZERRA, A. M. N. 39

OBJETIVO: Avaliar a eficiência de aplicação de biochar, realizada em porcentagens pré-estabelecidas (0,25%; 0,50%; 0,75% e 1,00% da massa de

solo), em uma camada de solo aluvionar para retenção e mobilidade do corante têxtil tetra- azo Direct Black 22 através de ensaios, em triplicata, de cinética e isoterma de adsorção.

ORIGEM: UFPE, Brasil.

RESULTADOS: Os resultados obtidos demonstraram que, para cinética, o melhor modelo aplicável é o de pseudo- segunda ordem e, para a isoterma, o melhor modelo que descreve o processo é o de Freundlich. A aplicação de 0,25% de BC demonstrou melhor capacidade de adsorção (47 mg/kg), sendo que a aplicação de 1,00% BC obteve desempenho mais baixo (16 mg/kg) do que a CM2 (21,7 mg/kg). Neste caso, o BC proporcionou interação eletrostática entre adsorvente e adsorvato, tornando a carga superficial do solo mais negativa, dificultando a adsorção do corante aniônico DB22.

ARTIGO 4

TÍTULO: Biocarvão de biossólido na composição de substratos para a produção de mudas florestais (2019)

AUTOR: LOPES, D. A.

OBJETIVO: Determinar o crescimento e a qualidade de mudas de Senna multijuga em substratos a partir de biossólido e biocarvão de biossólido.

ORIGEM: UFRRJ, Brasil.

RESULTADOS: Os tratamentos consistem na combinação de dois resíduos sólidos (biossólido e biocarvão de biossólido) em três doses (25, 50 e 75%), homogêneos em proporção volumétrica (v/v) com solo mineral, com e sem inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA). Os controles consistiram em 100% de solo inoculado ou não com FMA. Os substratos foram caracterizados quimicamente. Foram avaliados os parâmetros de crescimento e qualidade das mudas, como altura, diâmetro do coleto, massa de matéria seca da parte aérea, do sistema radicular e total, índice de robustez, índice de 40 qualidade de Dickson e a taxa de colonização micorrízica das raízes. Sem a inoculação com FMA as mudas de Senna multijuga cultivadas nos

substratos com 50% e 75% de biossólido e com 50% de biocarvão de biossólido apresentaram maior crescimento e qualidade morfológica. A inoculação de FMA induziu um maior crescimento das mudas cultivadas nos substratos com 50% de biocarvão de biossólido e 50% de biossólido. A baixa colonização observada nas raízes das mudas pode estar relacionada aos altos teores de nutrientes nos resíduos. Ao comparar todos os tratamentos com o controle (solo não inoculado e inoculado), os substratos com 50 e 75% de biossólido proporcionaram mudas com maior qualidade, sendo os inoculados com FMA superiores.

ARTIGO 5

TÍTULO: Sewage sludge derived biochar for environmental improvement: Advances, challenges, and solutions (2023)

AUTOR: ZHAO, L. et al.

OBJETIVO: Revisar o estado atual da aplicação do biochar derivado de lodo de forma abrangente, e os avanços no mecanismo e capacidade do biochar de lodo na remoção de contaminantes da água, remediação do solo e redução de emissão de carbono foram descritos, com atenção especial aos principais desafios envolvidos, por exemplo, possíveis riscos ambientais e baixa eficiência.

ORIGEM: Harbin Institute of Technology, China.

RESULTADOS: Várias novas estratégias para superar as barreiras de aplicação do biochar de lodo para realizar uma melhoria ambiental altamente eficiente foram destacadas, incluindo modificação do biochar, co-pirólise, seleção de matéria-prima e pré-tratamento.

ARTIGO 6

TÍTULO: Application of biochar in concrete – A review (2022)

AUTOR: SENADHEERA, S. S. et al. 41

OBJETIVO: Investigar sobre a mitigação das mudanças climáticas através de

revisão bibliográfica.

ORIGEM: Korea University, Coreia do Sul. Indian Institute of Science, Índia. National University of Singapore, Singapura. Tsinghua University, China.

RESULTADOS: O biochar, um produto rico em carbono da pirólise de biomassa, é considerado um substituto potencial para a substituição do cimento que pode melhorar as propriedades estruturais se usado em quantidades adequadas. Embora o biochar tenha sido convencionalmente usado como um aditivo de solo na indústria agrícola, os pesquisadores investigaram recentemente sua aplicabilidade no concreto. É importante ressaltar que os resultados até agora relataram sua contribuição para o aprimoramento das propriedades mecânicas, térmicas e físicas do cimento.

ARTIGO 7

TÍTULO: Gasified olive stone biochar as a green construction fill material (2023)

AUTOR: BAI, Y.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S.; CHU, J.

OBJETIVO: Avaliar as propriedades de engenharia e ambientais do biochar de caroço de oliveira (OSB) como material de preenchimento de construção verde.

ORIGEM: University of Technology, Australia. Suranaree University of Technology, Tailândia. Nanyang Technological University, Singapura.

RESULTADOS: Os resultados indicaram que o OSB gaseificado era um material de biomassa estável e exibia bom desempenho de engenharia quando usado como material de aterro de construção. Em casos em que era necessária maior resistência, o OSB pode ser misturado com RG para atingir valores mais altos de razão de suporte da Califórnia (CBR) e módulo resiliente. Todas as misturas de OSB/RG foram consideradas como atendendo ao requisito mínimo de CBR para materiais de subleito, conforme especificado pela autoridade rodoviária local. Testes ambientais revelaram que a aplicação de 42 de OSB como material de aterro de construção não teria nenhum impacto

ambiental adverso. Esta pesquisa destacou o potencial do OSB para substituir materiais de pedra virgens em aplicações de aterro geotécnico e subleito de estrada.

ARTIGO 8

TÍTULO: Influence of biochar on soil air permeability and greenhouse gas emissions in vegetated soil: a review (2023)

AUTOR: WANG, Y.; GU, J.; NI, J.

OBJETIVO: Fornecer uma revisão abrangente dos efeitos do biochar na permeabilidade dos gases do solo e, conseqüentemente, na emissão de gases de efeito estufa em solos vegetados.

ORIGEM: The Hong Kong University of Science and Technology, China.

RESULTADOS: Os mecanismos pelos quais o biochar influencia a emissão de gases de efeito estufa são explicados em termos de aeração modificada do solo, capacidade de retenção de água, adsorção, pH, nutrientes disponíveis e atividade de micróbios e enzimas do solo. O papel das plantas na emissão de gases de efeito estufa em solos alterados por biochar também é analisado comparando o grupo vegetado com o grupo não vegetado. O artigo inclui uma discussão sobre os vários métodos usados para medir a permeabilidade de gases do solo, como os métodos de estado estacionário e transiente, bem como técnicas de medição de emissão de gases de efeito estufa, como o sistema de câmara e métodos micrometeorológicos.

ARTIGO 9

TÍTULO: Application of biochar derived from crops residues for biofuel production (2022)

AUTOR: AWOGBEMI, O.; KALLON, D. V. V. 43

OBJETIVO: Fornecer uma nova visão sobre as técnicas de conversão de várias classes de resíduos de colheitas, como palhas, cascas, bagaço, cascas, espigas e restolhos em biochar para produção de biocombustíveis.

ORIGEM: University of Johannesburg, África do Sul.

RESULTADOS: As informações atualizadas sobre a descrição, benefícios e desvantagens de várias técnicas de produção de biochar, incluindo técnicas tradicionais, modernas e inovadoras, também são pesquisadas. A implantação de biochar derivado de resíduos de colheita é econômica, ecologicamente correta e contribui para a sustentabilidade ambiental.

ARTIGO 10

TÍTULO: Granular waterworks sludge-biochar composites: Characterization and dye removal application (2022)

AUTOR: NUANHCHAMNONG, C; KOSITKANAWUTH, K.; WANTANEEYAKUL, N.

OBJETIVO: Investigar compósitos granulares de lodo de tratamento de água e biochar, que combinam o alto teor de carbono e a área de superfície do biochar com as propriedades argilosas do lodo de tratamento de água em uma sinergia para aumentar as funções do compósito na remoção de corantes.

ORIGEM: King Mongkut's University of Technology Thonburi, Tailândia.

RESULTADOS: A capacidade de sorção do corante azul de metileno (MB) em dois adsorventes compostos; (1) composto de lodo de biochar de casca de arroz (BSC) e (2) composto de lodo de casca de arroz cru (RSC) é investigada em comparação com um controle de matérias-primas não modificadas, incluindo biochar de casca de arroz (RHB) e lodo de obras hidráulicas (lodo). Os materiais compostos exibem propriedades de superfície herdadas de ambas as matérias-primas; no entanto, suas composições químicas são mais comparáveis ao lodo. Em comparação ao lodo, maior área de superfície e capacidade de remoção de MB são notadas em ambos os compósitos. Tanto o BSC quanto o RSC exibem uma isoterma de adsorção semelhante à RHB, 44 que é melhor descrita por um modelo de Langmuir, enquanto um modelo de isoterma de adsorção de Freundlich é mais adequado para o lodo. O BSC possui a maior capacidade de sorção de MB de 16,949 mg/g, seguido por

RHB, RSC e lodo com capacidade de 14,493, 13,966 e 8,576 mg/g, respectivamente.

ARTIGO 11

TÍTULO: Biochar-facilitated batch co-digestion of food waste and cattle rumen content: An assessment of process stability, kinetic studies, and pathogen fate (2023)

AUTOR: IHOEGHIAN, N. A. et al.

OBJETIVO: Avaliar o papel do biochar na estabilidade do processo e no destino do patógeno para codigestão em lote de resíduos alimentares (FW) e conteúdo ruminal do gado (CRC).

ORIGEM: University of Benin, Nigéria. Lancaster University, Reino Unido.

RESULTADOS: O biochar tinha diferentes grupos funcionais, uma grande área de superfície (627,50 m²/g) e um volume de poros (0,32 cm³/g). As emendas do biochar ajudaram a estabilizar o pH e reduzir o acúmulo de ácidos graxos voláteis (VFAs) e nitrogênio amoniacal total (TAN). A emenda do biochar usando 5 g de biochar também facilitou a produção de biogás em condições de baixo pH (3,72 – 4,45), produzindo um rendimento cumulativo de biogás de 706,11 ml/gVS com uma composição de biometano de 64,3%. As contagens de patógenos revelaram reduções significativas de log na faixa de 3,0–3,2 para E. coli, Bacillus e Salmonella nos primeiros 7 dias de digestão, correspondendo a 99,9% de remoção, indicando a segurança do digestato resultante para uso agrícola. O modelo de Gompertz modificado representou adequadamente a cinética do processo de digestão anaeróbica.

ARTIGO 12

TÍTULO: Zinc-bis-8-hydroxyquinoline doped by biochar extracted from red sea algae Chlorophyta as a novel photoactive layer in heterojunction solar cells (2023)

AUTOR: ALSHARIF, M. A. et al.

OBJETIVO: Misturar Zinco-bis-8-hidroxiquinolina (Zn-Hq2) com 10% de biochar obtido de microalgas do mar vermelho (Chlorophyta) para observação de um processo de combustão por micro-ondas.

ORIGEM: University of Tabuk, Arábia Saudita. Alexandria University, Egito. Zarqa University, Jordania.

RESULTADOS: A análise mostrou que o Zn-Hq2@BC tinha nano-rods uniformemente distribuídos dentro da rede de nanoporos do BC, com larguras variando de 26,94 a 30,90 nm e comprimentos variando de 136,43 a 192,38 nm. Ao medir a densidade de corrente escura-voltagem, foi descoberto que o Zn-Hq2@BC/n-Si apresentou melhores características de retificação em comparação ao Zn-Hq2/n-Si puro, com uma maior taxa de retificação. Os resultados também mostraram que a densidade de corrente e a voltagem no ponto de potência máxima aumentaram para 5,63 mA/cm² e 0,45 V, respectivamente, devido à ativação do biochar. Quando exposto à luz, a adição de aproximadamente 10% de biochar resultou em um aumento de 15% no fator de preenchimento e um aumento de 92% na eficiência de conversão de energia.

ARTIGO 13

TÍTULO: A Biochar-producing, Dung-burning Cookstove for Humanitarian Purposes (2014)

AUTOR: BIRZER, C. et al.

OBJETIVO: Investigar as emissões nocivas produzidas por fogões tradicionais conhecidas por causar doenças fatais.

ORIGEM: The University of Adelaide, Australia. 46

RESULTADOS: Os resultados indicam que o esterco de vários animais de pasto queimados no fogão TLUD tem propriedades de aquecimento semelhantes, o que implica que o fogão é aplicável a uma ampla base de clientes. Além disso, o biochar da combustão de esterco de vaca é tão bom, se não melhor, do que algum biochar disponível comercialmente.

ARTIGO 14

TÍTULO: Removal of Organic Contaminant from Aqueous Solution Using Magnetic Biochar (2016)

AUTOR: SALEH, S.; KAMARUDIN, K. B.; WAN, A. W.; GHANI, K.; KHEANG, L. S.

OBJETIVO: Preparar biochar e biochar magnético como adsorventes para remover 4-nitrotolueno do ambiente aquoso.

ORIGEM: Universiti Putra Malaysia, Malásia.

RESULTADOS: O biochar magnético (MB) foi sintetizado com sucesso usando biochar bruto de casca de palmiste (PKS), cloreto ferroso e cloreto férrico para remoção de 4-nitrotolueno. Cloreto ferroso e cloreto férrico usados como meio magnético e misturados com biochar pelo método de coprecipitação química. As características desses adsorventes foram analisadas com infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), microscópio eletrônico de varredura (SEM) e área de superfície BET. Os desempenhos do biochar modificado e bruto foram comparados para avaliar a eficácia da capacidade de adsorção. Foi descoberto que o biochar magnético teve melhor desempenho em comparação ao biochar bruto na remoção de 4-nitrotolueno de meios aquosos. As isotermas de Langmuir e Freundlich foram aplicadas para descrever as características de adsorção e a isoterma de Langmuir descreve os fenômenos de adsorção neste estudo muito melhor do que a isoterma de Freundlich.

Fonte: Própria Autoria (2024)

A remoção de contaminantes orgânicos de soluções aquosas tem se tornado uma preocupação crescente em diversos contextos ambientais. Um estudo relevante neste campo é o de Saleh et al. (2020), que investigou a eficácia do biochar magnético (MB) como adsorvente para a remoção de 4nitrotolueno, um contaminante amplamente encontrado em efluentes industriais. A utilização de biochar, produzido a partir de resíduos orgânicos, apresenta uma abordagem sustentável para a mitigação da poluição aquática.

Os autores utilizaram biochar bruto de casca de palmiste (PKS) em combinação com cloreto ferroso e cloreto férrico para sintetizar o biochar magnético. O método de co precipitação química foi empregado para incorporar esses sais metálicos ao biochar, conferindo propriedades magnéticas ao material. Essa modificação não só potencializa a eficiência de adsorção, mas também facilita a separação do adsorvente do meio aquoso após o processo de remoção.

As características físicas e químicas do biochar e do biochar magnético foram avaliadas utilizando técnicas como FTIR e SEM. A espectroscopia FTIR revelou grupos funcionais que favorecem a adsorção, enquanto a análise SEM proporcionou uma visão detalhada da morfologia das superfícies dos adsorventes. Essas análises são cruciais para entender como as modificações estruturais impactam na eficiência do processo de adsorção.

Os resultados mostraram que o biochar magnético apresentou um desempenho superior em comparação ao biochar bruto na remoção de 4-nitrotolueno. Esse achado é significativo, pois evidencia que a modificação do biochar com agentes magnéticos não apenas melhora a capacidade de adsorção, mas também oferece uma solução prática para a remoção de poluentes orgânicos em águas contaminadas.

A comparação das isotermas de adsorção, especificamente as de Langmuir e Freundlich, também foi um aspecto importante da pesquisa. A isoterma de Langmuir, que assume a formação de uma camada monomolecular de adsorvente sobre a superfície, se ajustou melhor aos dados experimentais. Esse resultado sugere que a adsorção de 4-nitrotolueno ocorre de forma homogênea nas superfícies do biochar magnético, um aspecto essencial para o design de sistemas de tratamento de águas residuais.

Além disso, a avaliação da área de superfície BET foi fundamental para entender a capacidade de adsorção dos materiais utilizados. Um aumento significativo na área de superfície do biochar magnético em relação ao biochar bruto foi observado, o que corrobora a ideia de que a modificação magnética não apenas altera a estrutura física, mas também potencializa a eficácia na captura de poluentes.

Esse estudo contribui para a crescente literatura sobre o uso de materiais biosustentáveis no tratamento de efluentes, alinhando-se com os

objetivos de economia circular e sustentabilidade ambiental. A valorização de resíduos agroindustriais, como a casca de palmiste, para a produção de biochar e biochar magnético representa uma estratégia inovadora e eficiente para a remoção de contaminantes.

Ainda, a pesquisa de Saleh et al. abre caminhos para futuras investigações sobre a aplicação de outros resíduos orgânicos na produção de biochar magnético, bem como a exploração de diferentes contaminantes orgânicos. A versatilidade dos métodos de modificação química também sugere que diversas combinações de materiais poderiam ser testadas para otimizar ainda mais a capacidade de adsorção.

Ainda, a aplicação prática dos resultados obtidos no estudo é uma questão relevante. A implementação do biochar magnético em sistemas de tratamento de água poderia representar um avanço significativo na eficiência da remoção de poluentes, contribuindo para a saúde pública e a preservação dos ecossistemas aquáticos. A pesquisa não apenas fornece um modelo experimental valioso, mas também ressalta a importância da inovação na abordagem de desafios ambientais contemporâneos.

6. CONCLUSÃO

A aplicabilidade do biochar no âmbito da engenharia ambiental revela-se promissora, especialmente no tratamento de águas contaminadas e na recuperação de solos degradados. Produzido a partir de resíduos orgânicos, o biochar oferece uma alternativa sustentável e econômica para a mitigação de poluentes. Sua capacidade de adsorção eficaz de contaminantes, como metais pesados e compostos orgânicos, faz dele um recurso valioso para o tratamento de efluentes industriais e urbanos. Além de seu papel na remoção de poluentes, o biochar pode ser utilizado na melhoria da qualidade do solo. Sua incorporação em terras agrícolas pode aumentar a retenção de água e nutrientes, contribuindo para a fertilidade do solo e a produtividade das culturas. Essa dupla função, de tratar resíduos e melhorar a terra, torna o biochar uma ferramenta crucial na transição para práticas agrícolas mais sustentáveis.

Em relação à quantidade de materiais e pesquisas envolvendo a aplicabilidade do biochar, foi constatado um crescimento significativo, com o número de artigos publicados aumentando de aproximadamente 350, em 2014, para mais de 7.500 até 2023, de acordo com dados da ScienceDirect. Os temas mais explorados incluem sua utilização no manejo de solos, com destaque para a remediação de áreas contaminadas e a remoção de poluentes, além de seu potencial no sequestro de carbono, que tem apresentado resultados promissores. Outra área em expansão é a aplicação do biochar na produção de materiais de construção sustentáveis, reforçando sua versatilidade. Geograficamente, os países líderes na produção de estudos são China e Estados Unidos, enquanto o Brasil também se destaca, ocupando a oitava posição em número de publicações, evidenciando a relevância do tema no cenário científico nacional.

A pesquisa e desenvolvimento contínuos são essenciais para maximizar o potencial do biochar na engenharia ambiental. Estudos adicionais sobre suas propriedades, eficácia e interações com diferentes contaminantes e solos são necessários para informar melhores práticas e políticas. Investimentos em tecnologias que promovam a produção em larga escala também são

fundamentais para a disseminação desse material. A integração do biochar nas práticas de engenharia ambiental representa um avanço significativo em direção à sustentabilidade. Ao combinar a gestão de resíduos com a proteção ambiental, o biochar não apenas contribui para a resolução de problemas contemporâneos, mas também se alinha aos objetivos globais de desenvolvimento sustentável, promovendo um futuro mais equilibrado e saudável.

REFERÊNCIAS

ALSHARIF, M. A. *et al.* Zinc-bis-8-hydroxyquinoline doped by biochar extracted from red sea algae Chlorophyta as a novel photoactive layer in heterojunction solar cells. **Alexandria Engineering Journal**, [S.l.], v. 78, p. 307-317, 2023.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016823006233>. Acesso em: 30 set. 2024.

AWOGBEMI, O.; KALLON, D. V. V. Application of biochar derived from crops residues for biofuel production. **Fuel Communications**, [S.l.], v. 15, p. 100088, 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666052023000043>. Acesso em: 30 set. 2024.

BAI, Y.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S.; CHU, J. Gasified olive stone biochar as a green construction fill material. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 403, p. 133003, 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823027204>. Acesso em: 30 set. 2024.

BEZERRA, A. M. N. **Efeito da aplicação de biochar na retenção e mobilidade do corante Direct Black 22 num solo aluvionar do Alto Capibaribe**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.

BIRZER, C. *et al.* A biochar-producing, dung-burning cookstove for humanitarian purposes. **Procedia Engineering**, [S.l.], v. 78, p. 243-249, 2014.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814010509>. Acesso em: 30 set. 2024.

BRASIL. **Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. Destaques da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Ministério do Meio Ambiente. Brasília/DF: Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano, 2011.

CAMPOS, HELIANA KÁTIA TAVARES. **Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil**. Eng. Sanit. Ambient. vol.17, nº.2 Rio de Janeiro Abr./Jun 2012.

CARMO, H. F.; SILVA, M. A. S.; MADARIC, B. E. **Utilização do biochar como adicionador de carbono no solo e seus efeitos químicos nas propriedades do solo, sob feijoeiro comum no Cerrado brasileiro**. In: WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE CLIMA E RECURSOS NATURAIS NOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 2., 2010. Bragança. Anais [...], Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, novembro de 2010. p. 159-165.

CRISPIM, D. L., FERNANDES, J. D., ANDRADE, S. O., SOUSA, E. P., & SALES,

J. C. F. **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos**: um estudo de caso em uma escola estadual de ensino médio em Pombal-PB. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 11 (1) : p. 01-07, 2016.

FERREIRA, Maria Laura Harada. **Biochar**: estado da arte do uso agrícola no cenário brasileiro. 2023. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/562f1e8e-feac-4a77a288-c64328c61058/content>. Acesso em: 12 set. 2024.

GOUVEIA, Nelson. **Resíduos sólidos urbanos**: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. *Revista Ciência & saúde coletiva*, 17 : p. 1503-1510, 2012.

IHOEGHIAN, N. A. *et al.* Biochar-facilitated batch co-digestion of food waste and cattle rumen content: an assessment of process stability, kinetic studies, and pathogen fate. **Green Technologies and Sustainability**, [S.l.], v. 1, n. 3, p. 100035, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949736123000283>. Acesso em: 30 set. 2024.

JACOBI, P. R.; BENSEN, G. R. **Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade**. *Estudos Avançados*, v. 25, n. 71, p 135-158, fev. 2011.

LEHMANN, J. et al. **Stability of biochar in soil**. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). *Biochar for environment management*. London: Sterling: Earthscan Publ., 2009. p. 183- 198.

LOPES, D. A. **Biocarvão de biossólido na composição de substratos para a produção de mudas florestais**. 2019. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2019.

Maia, C.M.B.F. (2010) **Biochar**: uma nova ferramenta no manejo de solos. *Anais do II Seminário de Atualização Florestal e XI Semana de Estudos Florestais*.

MARQUES, M. S., LOPES, A. A., FERNANDEZ, J. A. B., & BATTISTELLE, R. A. G. **Avaliação da Área de Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Município de Rio Verde–GO**. 10º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. Anais. Porto Alegre–RS: SQA/ABES-RS, 2016.

MATOVIC, Darko. **Biochar as a viable carbon sequestration option**: Global and Canadian perspective, *Energy*, vol. 36, 2011, pp. 2011-2016.

MORALES, M. M. et al. **Sorption and desorption of phosphate with biochar**. *Soil Use and Management*, England, v. 29, n. 3 p. 306–314. Sep, 2013.

Nematian, M.; Keske, C.; Ng'ombe, J.N. A techno-economic analysis of biochar production and the bioeconomy for orchard biomass. **Waste Management**. v. 135, p. 467–477, 2021

NOGUEIRA, Eduardo de FARIA; MANSANO, Sonia Regina Vargas. **Do consumo à produção de lixo**. 2021. Disponível em: <https://periodicos.pucminas.br/index.php/economiaegestao/article/download/15108/18817/>. Acesso em: 10 set. 2024.

NOVAK, J. M.; Lima, I.; Xing, B.; Gaskin, J. W.; Steiner, C.; Das, K. C.; Ahmedna, M.; Rehrh, D.; Watts, D.W.; Bussher, W. J.; Schomberg, H.. **Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on loamy sand**. *Annals of Environmental Science*, vol. 3, 2009, pp. 195-206.

NÓBREGA, I. P. C. **Efeitos do biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: sequestro de carbono no solo**. 2011. 46f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Instituto de Agronomia – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

NUANHCHAMNONG, C.; KOSITKANAWUTH, K.; WANTANEEYAKUL, N. Granular waterworks sludge-biochar composites: Characterization and dye removal application. **Results in Engineering**, [S.l.], v. 14, p. 100451, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022001219>. Acesso em: 30 set. 2024.

REZENDE, E. I. P. et. al. **Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono**. *Revista Virtual de Química*, Niterói, v. 3, n. 5, p. 428. Nov, 2011.

SALEH, S.; KAMARUDIN, K. B.; WAN, A. W.; GHANI, K.; KHEANG, L. S. Removal of Organic Contaminant from Aqueous Solution Using Magnetic Biochar. **Procedia Engineering**, [S.l.], v. 148, p. 228-235, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816310591>. Acesso em: 30 set. 2024.

SILVA FILHO, CARLOS ROBERTO VIEIRA DA; SOLER, FABRICIO DORADO. **Gestão de resíduos sólidos: o que a lei diz**. 3.ed. São Paulo; Trevisan, 2015.

SENADHEERA, S. S. *et al.* Application of biochar in concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, [S.l.], v. 143, p. 105204, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946523002780>. Acesso em: 30 set. 2024.

SOUZA, A. J. **Impacto da diversidade bacteriana sob a degradação clorotalonil no solo manejado com biochar**. 2016. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

SOUZA, P. H. C. **Solar pyrolysis and electrical furnace pyrolysis of *Luffa cylindrica* fibers to obtain adsorbent biochar**. 2022. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas em Processos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2022. 155 f.

Sohi, S.P; Knull, E.; Lopez-Cape, E.; Bol, R.. Chapter 2- **A review of Biochar and its use and function in soil**, **Advances in Agronomy**, 2010, vol. 105, pp. 47-82.

Singh, B.P.; Hatton, B.J.; Singh, B.; Cowiw, A.L.; Kathuria, A. (2010) Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils. **Journal of Environmental Quality**. 39:1224–1235.

Tan, X.; Liu, Y.; Zeng, G.; Wang, X.; Xinjiang, H.; Yanling, G.; Yang, Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions, **Chemosphere**, v. 125, p. 70-85. 2015.

Vaccari, F.P.; Baronti, S.; Lugato, E.; Genesio, L.; Castaldi, S.; Fornasier, F.; Miglietta, F. (2011) Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. **European Journal of Agronomy**.

VEIGA, T. R. L. A. *et al.* Caracterização de diferentes biomassas vegetais para produção de biocarvões. **CERNE**, [S.l.], v. 23, n. 4, p. 529-536, 2017.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cerne/a/7kss6mbBQFR74yQMRKg8rtJ/?lang=en>. Acesso em: 29 set. 2024.

Wang, L.; Deng, J.; Yang, X.; Hou, R.; Hou, D. Role of biochar toward carbon neutrality. **Carbon Research**, n. 2. 2023.

WANG, Y.; GU, J.; NI, J. Influence of biochar on soil air permeability and greenhouse gas emissions in vegetated soil: a review. **Biogeotechnics**, [S.l.], v.

1, n. 4, p. 100040, 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949929123000402>. Acesso em: 30 set. 2024.

ZHAO, L. *et al.* Sewage sludge derived biochar for environmental improvement: Advances, challenges, and solutions. **Water Research X**, [S.l.], v. 18, p.

100167, 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589914723000038>. Acesso em: 30 set. 2024.