

BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA COM BIBLIOMETRIX NO RSTUDIO

**KAROLINE FARIAS KOLOSZUKI MACIEL¹; LORRAN DE LIMA TRECHA²;
LUANA NUNES CENTENO³; MIGUEL DAVID FUENTES-GUEVARA⁴; LIZETE
STUMPF⁵; ADILSON LUÍS BAMBERG⁶**

^{1,2,5}Universidade Federal de Pelotas – karolinefkmaciell@gmail.com; zete.stumpf@gmail.com

⁴Universidade Estadual do Centro Oeste - miguelguevara@unicentro.br;

^{3,6}Embrapa Clima Temperado – luanahunesceneno@gmail.com; adilson.bamberg@embrapa.br

1. INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto caracteriza-se como um resíduo de alta complexidade, gerado nas estações de tratamento de águas residuais e rico em matéria orgânica, nutrientes e pode conter também poluentes, incluindo metais pesados, patógenos e contaminantes orgânicos emergentes (WANG; WANG, 2019; GŁAB et al., 2016). Sua composição físico-química varia significativamente em função da matriz de entrada e das etapas de tratamento adotadas, podendo apresentar concentrações elevadas de nutrientes úteis à agricultura, assim como compostos tóxicos que limitam sua aplicação em solos (PARIYAR et al., 2020; AL-WABEL et al., 2017).

No Brasil, o avanço das redes de saneamento básico tem ampliado o volume de lodo gerado, tornando essencial o desenvolvimento de estratégias sustentáveis para sua gestão. Embora a legislação, em especial a Resolução CONAMA 498/2020, defina critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, a disposição em aterros sanitários ainda persiste como prática dominante, enquanto tecnologias como compostagem, digestão anaeróbia e produção de biochar atraem crescente interesse científico (BRASIL, 2020; Tang et al., 2018; Zhang et al., 2019). A pirólise surge como a rota termoquímica mais promissora para valorização do lodo, promovendo sua conversão em biochar, bio-óleo e biogás de alto valor energético. Esse processo simultaneamente reduz a carga de patógenos e estabiliza metais pesados, além de gerar subprodutos passíveis de aproveitamento energético (Wang; Wang, 2019).

O biochar resultante caracteriza-se por elevada estabilidade estrutural, área de superfície específica e pH alcalino, atributos que o tornam um condicionador de solos eficiente, adsorvente de poluentes (KLEEMANN et al., 2025) e suporte para práticas de remediação ambiental. Adicionalmente, sua capacidade de sequestro de carbono e retenção de nutrientes reforça seu papel na promoção de sistemas agrícolas mais sustentáveis (WANG; WANG, 2019; GŁAB et al., 2016; PARIYAR et al., 2020). Contudo, a possível mobilidade e biodisponibilidade de metais pesados presentes no biochar demandam avaliações criteriosas, de modo a assegurar sua aplicação segura em ambientes agrícolas e ecossistemas adjacentes (ZHANG et al., 2019). Diante disso, o presente estudo propõe-se a realizar uma revisão bibliométrica de literatura sobre biochar derivado de lodo de esgoto, com o intuito de mapear tendências globais e identificar lacunas tecnológicas.

2. METODOLOGIA

Realizou-se uma análise bibliométrica com foco nas tendências e padrões da produção científica global sobre biochar de lodo de esgoto. A coleta de dados

foi realizada nas bases de dados Web of Science e Scopus, utilizando os descritores: “biochar”, “lodo de esgoto”, “produção”, “aplicações” e “desafios”.

As análises envolveram a distribuição temporal das publicações, a produtividade científica por país, além da frequência e coocorrência de palavras-chave. Essa etapa permitiu identificar a evolução científica do tema, os principais países e os temas emergentes no campo do biochar de lodo de esgoto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise bibliométrica da literatura científica sobre o biochar de lodo de esgoto, construída a partir da fusão das bases de dados Web of Science (WoS) e Scopus, que inicialmente continham 122 e 79 artigos, respectivamente. Após a remoção de 31 duplicatas, resultou-se em um conjunto de dados final e robusto de 170 artigos, que serviu de base para todas as análises subsequentes.

A produção científica sobre biochar derivado de lodo de esgoto evoluiu em três fases (Figura 1). Entre 2012 e 2016, o crescimento foi discreto, marcado por estudos exploratórios em pequena escala. Esse período coincide com a expansão das agendas globais de sustentabilidade e mitigação climática, impulsionadas pelo Acordo de Paris (2015), que incentivou o desenvolvimento de alternativas de reaproveitamento de resíduos e tecnologias de baixo impacto (AL-WABEL et al., 2017; WANG; WANG, 2019).

Figura 1 – Número de publicações sobre biochar de lodo de esgoto ao longo dos anos (2012–2025).

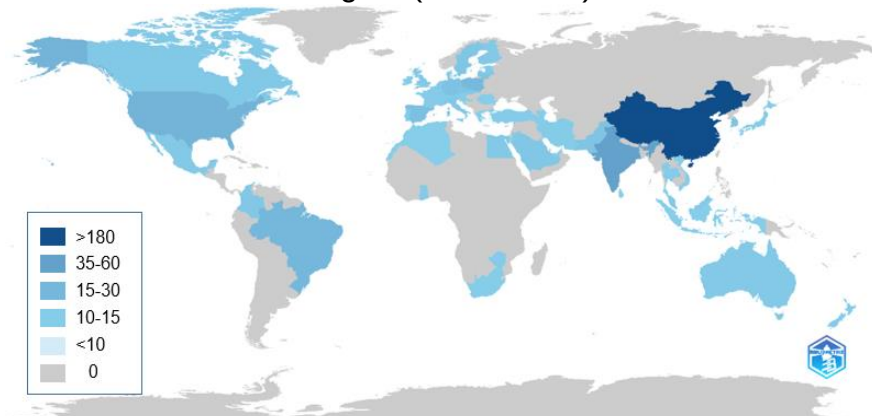


A segunda fase (2017–2020) reflete a consolidação do tema no cenário científico, com aumento das publicações e diversificação das aplicações em agricultura, remediação e gestão de resíduos (WEI et al., 2019; PARIYAR et al., 2020). Esse crescimento concentra-se em países como China, Estados Unidos e Austrália, e está associado a avanços tecnológicos, maior colaboração internacional e à importância de normas e diretrizes globais de segurança ambiental e manejo de resíduos.

A partir de 2021, observa-se uma expansão na pesquisa, essa fase acompanha a integração do tema com políticas de economia circular e neutralidade de carbono, como a *Carbon Neutrality Policy* da China e o Plano de Ação da Índia para Gestão de Resíduos. A queda parcial em 2025 deve-se ao ano ainda em andamento, não indicando retração real. No cenário geográfico (Figura 2), a China lidera a produção científica (WANG; WANG, 2019), resultado do alto volume de resíduos urbanos, políticas rigorosas e investimentos em tecnologias limpas. Além

disso, a política chinesa de valorização de resíduos para produtos agrônômicos ou energéticos incentiva a pesquisa (TANG et al., 2018). A Índia surge em segundo lugar, motivada por desafios de degradação do solo e segurança alimentar, que demandam tecnologias de baixo custo e alta aplicabilidade (PARIYAR et al., 2020). Os EUA, embora com menor número de estudos, apresentam pesquisas voltadas à inovação e integração com estratégias de mitigação de emissões de gases de efeito estufa (AL-WABEL et al., 2017).

Figura 2 – Frequência de autores por país em publicações sobre biochar de lodo de esgoto (2012–2025).

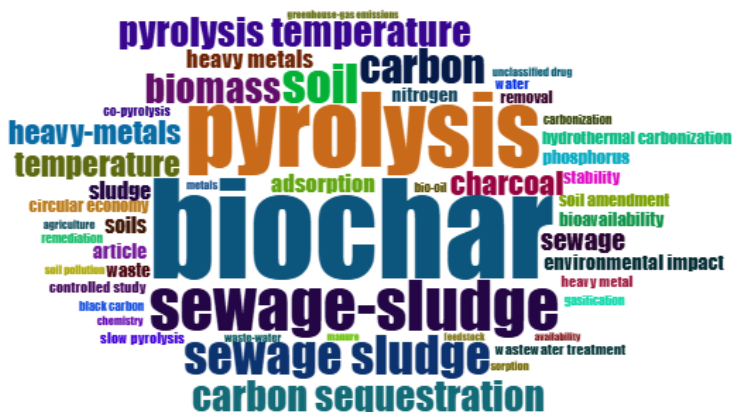


O Brasil se destaca no cenário global de pesquisas sobre aproveitamento de resíduos, devido à disponibilidade de biomassa, à relevância agrícola e à necessidade de recuperação de áreas degradadas. A aplicação agrícola de lodo de esgoto é regulamentada pela Resolução CONAMA nº 498/2020 (BRASIL, 2020), garantindo segurança ambiental e sanitária. A análise bibliométrica identificou contribuições de 39 países para pesquisas sobre biochar, refletindo interesse global alinhado aos ODS 6 e 12. A diversidade geográfica e o crescimento contínuo das publicações consolidam o biochar como uma agenda científica em expansão.

A nuvem de palavras (Figura 3) destacou biochar como palavra com maior relevância, confirmando o foco central das pesquisas, enquanto *pyrolysis* (pirólise) indica a predominância da rota termoquímica para conversão do resíduo (WANG; WANG, 2019). A terceira palavra em destaque é *sewage-sludge* (lodo de esgoto) também confirmando o foco central da pesquisa bibliométrica. A presença de *soil remediation* (remediação do solo) e *carbon sequestration* (sequestro de carbono) reflete objetivos estratégicos, recuperação de solos degradados e mitigação das mudanças climáticas por meio do aumento da estabilidade do carbono no solo (AL-WABEL et al., 2017).

Já o destaque de *heavy-metals* (metais pesados) reflete a preocupação com a mobilidade e toxicidade de elementos presentes no lodo, que podem comprometer o uso agrícola (WEI et al., 2019). Termos como sustentabilidade e impacto ambiental reforçam que as pesquisas avançam para soluções integradas que conciliem segurança ambiental e benefícios agrônômicos. A ênfase em pirólise e sequestro de carbono indica a busca por maior eficiência do processo e estratégias para retenção de carbono, enquanto a remediação de solos e metais pesados direcionam pesquisas para mitigação de contaminantes e melhoria da fertilidade. Esse mapeamento é estratégico para o desenvolvimento de biochars adaptados a diferentes condições, para a agricultura sustentável e ao enfrentamento das mudanças climáticas (PARIYAR et al., 2020).

Figura 3 – Nuvem de palavras mais citadas nos artigos (2012–2025).



4. CONCLUSÕES

A análise bibliométrica revelou crescimento expressivo das publicações sobre o tema, com destaque para aquelas originadas na China, Índia, EUA e Brasil. Os principais temas incluem pirólise, sequestro de carbono, remediação do solo e metais pesados, associados à mitigação climática e gestão sustentável de resíduos. Apesar do avanço, persistem lacunas, como estudos de longo prazo e aplicações diversificadas. Este panorama evidencia a importância de alinhar pesquisas brasileiras às tendências globais para consolidar soluções seguras e inovadoras.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-WABEL, M. I. et al. Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review. **Land Degradation & Development**, Hoboken, v.29, n.7, p.2124-2161, 2017.
- GLAB, T.; PALMOWSKA, J.; ZALESKI, T.; GONDEK, K. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. **Geoderma**, Amsterdam, v.281, p.11-20, 2016.
- KLEEMANN, N., IGANSI, A., SILVEIRA, N. et al. Simultaneous adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on biochar from sewage sludge. **Environmental Science and Pollution Research** 32, p. 8518–8528, 2025.
- PARIYAR, P. et al. Evaluation of change in biochar properties derived from different feedstock and pyrolysis temperature for environmental and agricultural application. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.713, p.136433, 2020.
- TANG, J. et al. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, Amsterdam, v.126, n.2, p.144-152, 2018.
- WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v.227, p.1002-1022, 2019.
- WEI, S. et al. Influence of pyrolysis temperature and feedstock on carbon fractions of biochar produced from pyrolysis of rice straw, pine wood, pig manure and sewage sludge. **Chemosphere**, v. 218, p. 624-631, 2019.
- ZHANG, J.; LÜ, F.; SHAO, L.; HE, P. The use of biochar-amended composting to improve the humification and degradation of sewage sludge. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v.272, p.171-179, 2019.