

LODOS DE ETA: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA SOBRE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA PARA BIOPRODUTOS E SUSTENTABILIDADE

 <https://doi.org/10.56238/arev7n3-260>

Data de submissão: 25/02/2025

Data de publicação: 25/03/2025

Anderson Aldelyan Ramalho de Sousa

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba

Joelda Dantas

Doutora

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba

Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba

Autor correspondente: joelda.dantas@cear.ufpb.br

Lucas Vinicius Borges Pereira

Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba

Kelly Cristiane Gomes da Silva

Doutora

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba

Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba

RESUMO

Neste trabalho foram abordados os desafios envolvidos na gestão dos resíduos de estações de tratamento de água (ETA's), com foco na produção significativa de lodo. Foi investigado sobre a conversão destas lamas em bioproductos por pirólise, destacando os benefícios ambientais e econômicos, explorando o seu potencial como matéria-prima para energia renovável, eliminando resíduos e mitigando as emissões de gases de efeito estufa. Por meio de uma revisão bibliométrica realizada, a qual foi regida pelas leis de Lotka, Bradford e Zipf, e utilizando-se as bases de dados Web of Science e Scopus, identificou-se a frequência de palavras-chave, os autores, os artigos e os periódicos mais relevantes na área. Também foi realizada uma análise sistemática para o aprofundamento das descobertas em torno do tema. Neste âmbito das pesquisas difundidas, os resultados geográficos indicam a liderança do Brasil em publicações, seguido da China. Dentre as palavras-chave mais recorrentes em torno do tema constam *biomass, pyrolysis, biochar, charcoal, biofuels, life cycle e waste water treatment e thermochemical conversion*. O periódico que mais apresenta publicações nesta área foi o Journal of Cleaner Production, com fator de impacto 9.8. Assim, este estudo oferece uma compreensão geral da investigação sobre a utilização de lodos de ETA, destacando a sua importância ambiental e energética. O tema envolvendo a conversão de lodos de ETA em bioproductos por pirólise se enquadra com diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e princípios de ESG (Ambiental, Social e Governança), a saber, relaciona-se principalmente com o ODS 6, que busca garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água, e o ODS 7, que promove o uso de energia limpa e acessível. Além disso, apoia o ODS 11 ao contribuir para cidades e comunidades sustentáveis, e o ODS 12, ao promover padrões de consumo e produção sustentáveis. Do ponto de vista ESG, o estudo aborda questões ambientais, ao estimular a redução de resíduos e emissões, e sociais, ao promover a melhoria da saúde pública e a qualidade de vida por meio da gestão adequada de resíduos. Também se alinha aos princípios de governança, ao fomentar a

implementação de práticas de gestão sustentável e transparência nas operações ambientais, promovendo um desenvolvimento mais responsável e sustentável.

Palavras-chave: Processos termoquímicos. Pirólise. Lodos. Estação de Tratamento de Água (ETA). Bioproductos.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o rápido desenvolvimento econômico dos países resultou na produção e acúmulo significativo de resíduos perigosos, como lodos. Estes resíduos, provenientes de tratamentos médicos hospitalares, fabricação industrial e outras atividades, representam sérios riscos tanto para o meio ambiente quanto para a saúde humana e animal, devido às suas características prejudiciais. Diferentemente dos resíduos comuns, os resíduos perigosos não podem ser tratados da mesma forma, devido às suas propriedades corrosivas, tóxicas, reativas e infecciosas. Assim, o tratamento adequado de resíduos perigosos constitui um desafio considerável, e o seu manuseio inadequado pode ter consequências graves, despertando a urgência por tratamentos avançados como o método de pirólise.

Particularmente, as estações de tratamento de água potável estão enfrentando desafios emergentes que afetam a qualidade da água bruta (De Marines *et al.*, 2025). Tanto é que, um dos desafios ambientais contemporâneos mais importantes do mundo é a poluição e a degradação dos *habitats* aquáticos. Muitas toxinas chegam aos córregos aquáticos como resultado da atividade humana e natural, o que representa um sério risco tanto para o meio ambiente quanto para a saúde humana. Como consequência, abordar os desafios da poluição da água e seu monitoramento, é crítico em termos de formulação de medidas de gestão e proteção, e se tornou uma das principais prioridades para o desenvolvimento sustentável (Kushwaha *et al.*, 2025).

Entre outros fatores, isto decorre da forte influência do avanço da industrialização nas sociedades mundiais, que cada vez mais provoca o lançamento de poluentes nos aquíferos, ocasionando uma grande variabilidade na água, logo, impondo a necessidade de tratamentos com maior quantidade de produtos químicos. Alcançar o acesso universal à água limpa, conforme determinado pelo ODS 6 – Água Limpa e Saneamento, é crucial para apoiar a saúde humana e a sustentabilidade ambiental.

Os resíduos sólidos das estações de tratamento de água, ou simplesmente lodos, são provenientes das ETA's convencionais, englobando os processos de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação (Aquino *et al.*, 2023). Este subproduto conhecido como lodo, compreende substâncias orgânicas e inorgânicas. Tradicionalmente, o descarte desse tipo de lodo apresenta riscos ambientais, incluindo escoamento de nutrientes e contaminação por metais pesados (Almeida *et al.*, 2024).

Ademais, a água remanescente da sedimentação de lodo em tanques de sedimentação em ETA's de água potável contém quantidades significativas de matéria orgânica dissolvida e precursores de subprodutos de desinfecção, levantando preocupações crescentes sobre a segurança da água finalizada após a reciclagem. Há presença marcante de aromaticidade e complexos contendo

heteroátomos de nitrogênio e enxofre, que são precursores-chave dos subprodutos usados no processo de desinfecção da água (Wang *et al.*, 2025), este fato indica que o lodo sedimentado também contém estes poluentes.

O uso de coagulantes de alumínio durante o tratamento de água potável é crucial para a remoção aprimorada de partículas e outras impurezas da água bruta. No entanto, esse processo de coagulação-sedimentação gera uma quantidade considerável de lodo de tratamento de água potável rico em alumínio como um resíduo urbano típico que requer tratamento e descarte adequados. Este lodo normalmente é destinado a aterros sanitários, desperdiçando terras urbanas valiosas com potenciais riscos ambientais (Li, P. *et al.*, 2025). Lodos de águas residuais também são grandes reservatórios e fontes de emissão de genes de resistência a antibióticos em cidades. Há presença de bactérias hospedeiras de resistência antimicrobiana, o que propicia riscos biológicos e ecológicos (Li, Y. *et al.*, 2025).

Existem vários desafios para gerenciar o lodo gerado. A variabilidade dos resíduos, as opções de uso benéfico, a necessidade de alterar o tipo de tratamento, ou os produtos utilizados, para atender às exigências de um uso específico, a necessidade de desidratação diferenciada para reduzir os custos de transporte ou para atender às exigências de disposição final, entre outros aspectos, tornam a tomada de decisão complexa e envolvem vários processos inter-relacionados. Dado aos vários aspectos envolvidos, a decisão sobre a disposição do lodo não pode ser baseada apenas em um critério ou outro (Urban, Nakada e Isaac, 2023). Somado a isto, a geração de lodo em ETA's ocorre de forma constante e em volumes significativos. Esse cenário, aliado ao elevado índice de crescimento populacional nas grandes cidades, demanda a adoção de tecnologias adequadas que garantam o descarte seguro desse tipo resíduo, visando prevenir ou reduzir os impactos ambientais associados.

As discussões sobre a gestão de lodos no Brasil salientam a necessidade de integração entre os Planos Municipais e a Política Nacional de Resíduos Sólidos para assegurar a disposição ambientalmente adequada desses resíduos. Contudo, análise de 24 Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB) e de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) revelou falhas significativas, como a ausência de dados sobre a geração e caracterização do lodo e da água de lavagem de filtros, além da inexistência de propostas para o uso benéfico desses resíduos. A falta de transparência e indicadores no Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS), amplamente utilizados em relatórios públicos, contribui para a carência de cobranças por uma gestão eficiente, o que acentua os desafios ambientais e operacionais (Silva, Achon e Isaac, 2019).

Os dados do SNIS apresentam limitações ao oferecer uma visão generalista e superficial sobre o sistema de abastecimento de água no cenário brasileiro. Falta uma análise holística do ciclo de vida

do abastecimento e indicadores específicos para o gerenciamento de resíduos, como o lodo gerado em ETA's. A ausência de dados detalhados compromete a avaliação do desempenho municipal e a implementação de metas para melhorias. Além disso, a quantificação dos resíduos gerados, essencial para decisões sobre desaguamento e destinação final, não é uma prática comum na maioria das ETA's brasileiras, ademais, poucas avaliam suas características, indicando um desafio significativo para a gestão integrada de resíduos (Achon, Barroso e Cordeiro, 2013; Silva, Achon e Isaac, 2022). Por exemplo, um estudo envolvendo 82 ETA's no Estado de São Paulo, concluiu que 56% destas não medem e/ou estimam a quantidade de lodo gerado (Silva, 2021).

A quantidade de resíduo produzido nas ETA's é variável, dependendo do tipo de processo de tratamento utilizado. Estima-se que a produção de lodos de ETA's nos municípios operados pela Sabesp, por exemplo, no Estado de São Paulo, seja de aproximadamente 90 toneladas por dia, em base seca. Há variações significativas na quantidade de lodo gerado em uma ETA ao longo do ano. A produção de lodo é maior durante o período chuvoso (de novembro a março), quando há uma piora na qualidade da água dos mananciais, o que requer maior uso de produtos químicos, especificamente coagulantes, para tratá-la (Iwaki, 2018).

Estudos a nível de Brasil reportam que a aplicação de lodo pode ser viabilizada em matriz de cerâmica, áreas degradadas, matriz de concreto e construção civil. Porém, o número de trabalhos científicos difundidos é baixo diante de todos os desafios do setor para possibilitar a destinação ambientalmente adequada e minimizar os impactos ambientais associados (Silva, Achon e Isaac, 2019).

A geração de lodos em ETA's no Nordeste do Brasil é uma questão ambiental relevante. Durante o processo de tratamento, lodos são gerados como subproduto da remoção de impurezas da água. Esse resíduo é composto, principalmente, por partículas suspensas, coagulantes, matéria orgânica e inorgânica. No Estado de Pernambuco, por exemplo, um levantamento indicou que das 246 ETA's operacionais, 75% descartam seus resíduos diretamente em corpos hídricos e 22% no solo, ambos sem tratamento adequado. Apenas 3% realizam processos de deságue, mas a massa sólida resultante continua sendo descartada sem controle adequado no solo (Sobrinho *et al.*, 2019, p. 247).

Mas esta não é uma realidade apenas do Nordeste brasileiro. Por exemplo, um estudo que considerou três ETA's situadas em municípios com boa estrutura no Mato Grosso do Sul, de diferentes portes, constituindo-se de empresas públicas, privadas ou mistas, cuja tecnologia de tratamento seja convencional de ciclo completo e sendo existente ou não o tratamento do resíduo, reportou a carência de informações detalhadas compromete o uso adequado dos dados produzidos pelas ETAs, dificultando o cumprimento da Lei 12.305/2010, que prioriza redução, reuso e reciclagem de resíduos.

Duas ETA's estimam o volume de lodo gerado e uma sequer possui essa informação, refletindo uma gestão precária e distante de práticas ecoeficientes. O estudo destaca a importância da troca de informações com instituições de pesquisa e a viabilidade de empregar múltiplas alternativas para destinação. Deve-se abolir a ideia de que o resíduo de ETA é proveniente de materiais retirados dos mananciais e que, por isso, devem ser devolvidos ao manancial, é crucial para avançar na gestão sustentável desse resíduo.

A disposição inadequada dos lodos pode causar problemas como o assoreamento de corpos hídricos, alteração na qualidade da água, contaminação do solo e impacto na biodiversidade aquática. Por isso, torna-se imprescindível buscar alternativas sustentáveis para a gestão desses resíduos.

No Estado da Paraíba, a Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (Cagepa) desempenha um papel essencial na gestão dos recursos hídricos, operando diversas ETA's e estando presente em 224 localidades (200 cidades sede de municípios e 24 distritos e povoados). A população urbana atendida com serviço de água é de 2.789.463. Entre elas, destaca-se a ETA do Sistema Gramame, que abastece a região metropolitana de João Pessoa. Além disso, a Cagepa também opera outra unidade importante, a ETA de Campina Grande, que desempenha um papel crucial no fornecimento de água para a segunda maior cidade do Estado e municípios vizinhos (Cagepa, 2025). Essas ETA's são fundamentais para garantir o abastecimento de água tratada, mas também enfrentam desafios relacionados à gestão dos resíduos gerados durante o processo de tratamento, como o lodo. A busca por soluções sustentáveis para a disposição final desses resíduos é uma prioridade para a Cagepa, alinhando-se às metas de sustentabilidade e proteção ambiental.

Pesquisas indicam que o lodo de ETA pode ser reaproveitado de forma sustentável. Na Paraíba, por exemplo, estudos sugerem que o lodo pode ser utilizado na produção de substratos para mudas de plantas nativas da Caatinga, promovendo a recuperação de áreas degradadas (Souza, 2019). Outra iniciativa praticada na PB desde o ano de 2019, trata de uma tecnologia focada em atender questões da sustentabilidade, unindo desenvolvimento às práticas de redução de danos ao meio ambiente, a partir de esforços na promoção de método avançado para tratamento de lodos por pirólise, oportunizando a sanitização completa e convertendo-os em biochar, bió-óleo e biogás. Com o apoio de empresas, órgãos públicos e concessionárias geradoras de lodos, este cenário pode contribuir para que o Estado deixe de aterrinar matérias-primas ricas, minorando a sobrecarga em aterros, e para fomentar a utilização de bioproductos de forma útil e segura na agricultura, paisagismo e jardinagem dos próprios municípios, além de encontrar aplicação na indústria química e setores energéticos (G1, 2024; ASN, 2025).

No Rio Grande do Norte, iniciativas relacionadas à gestão de lodos gerados em ETA's têm buscado soluções sustentáveis frente aos desafios do abastecimento hídrico crescente, intensificado pelo aumento da demanda populacional. A necessidade de atender aos padrões específicos de qualidade da água tratada, aliada à degradação dos mananciais, tem resultado no aumento do uso de produtos químicos nos processos de potabilização, acarretando uma maior geração de lodos que precisam ser tratados adequadamente para destinação final. De acordo ABNT, esse resíduo pode ser reaproveitado, apresentando potencial para uso na construção civil, recuperação de áreas degradadas e no cultivo de plantas. Este cenário reflete a urgência de iniciativas que promovam o manejo sustentável desses resíduos no Estado. Práticas já desenvolvidas no Brasil e no mundo são apresentadas como referência para fomentar a aplicação do lodo de ETA's no Rio Grande do Norte (Cunha *et al.*, 2023).

Neste contexto, a gestão sustentável dos lodos de ETA no Nordeste, é um desafio ambiental importante. No entanto, iniciativas voltadas ao aproveitamento do potencial desse resíduo como insumo para agricultura, recuperação de áreas degradadas ou produção de energia, são caminhos promissores para mitigar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade.

O reaproveitamento de lodos é um caminho inevitável em tempos de maior compromisso das empresas com práticas sustentáveis, já disseminadas em países desenvolvidos como os europeus. Não pode-se ignorar a importância do saneamento, com acesso a água limpa e rede de esgoto, e a reutilização dos resíduos, gerando energia ou insumos para indústrias, pois assim consegue-se resolver vários problemas de forma eficiente. Desta maneira, iniciativas de empresas por todo o Brasil exploram o reaproveitamento como matéria-prima na produção de fertilizantes, adubos e compostos orgânicos para a agricultura, ou tijolos, telhas e cerâmicas, o que pode abrir novas frentes de negócios. Além da geração de energia e gás combustível. Tais aplicações contribuem para a recuperação de solos e a economia circular (Folha de Pernambuco, 2023).

Em nível global, frente a urbanização contínua e o crescimento populacional, o gerenciamento de lodo se torna um desafio latente enfrentado pela indústria de tratamento de água e pelos governos municipais. É essencial explorar soluções inovadoras para minimizar o problema do lodo com recuperação e reutilização eficientes de recursos (Li, P. *et al.*, 2025). Por exemplo, em estação de tratamento de águas residuais municipais, o tratamento térmico do lodo pode ser uma maneira eficiente de aumentar a secura final do bolo de lodo e impulsionar o desempenho da digestão anaeróbica. Por outro, esses tratamentos geram compostos refratários que, uma vez retornados às tubulações, podem afetar a conformidade da qualidade das descargas de efluentes, principalmente no que diz respeito ao nitrogênio orgânico (Faixo *et al.*, 2025). Isto reflete a real e urgente necessidade

por tratamentos mais eficazes e eficientes, além de uma robusta e sustentável gestão desse tipo de resíduo contaminante.

Um dos modelos de negócios de economia circular é baseado na recuperação de subprodutos. Neste modelo, o objetivo é transformar resíduos ou subprodutos de um processo em matéria-prima para outro ou um processo alternativo. Esta abordagem tem o duplo benefício de reduzir a quantidade de resíduos produzidos e reduzir significativamente o custo de obtenção de recursos naturais (Goz w Praktyce, 2024a; Goz w Praktyce, 2024b). Adotar práticas sustentáveis vai ao encontro da necessidade vital de preservação do meio ambiente e dos recursos naturais. Nesse contexto, a inserção de novas técnicas capazes de transformar o processo produtivo, como a pirólise para gerar bioproductos como o biochar, se destacam como forte aliada para viabilizar essa transformação (Valença *et al.*, 2023).

Neste estudo, concentrou-se em investigar o aproveitamento de lodos de ETA's mediante o processo de pirólise para utilização na produção de bioproductos de valor agregado como biochar, bio-óleo e biogás, dependendo da sua composição. Neste sentido, a pirólise surge como uma tecnologia viável alinhada com práticas sustentáveis de gerenciamento de resíduos e princípios de economia circular. No Brasil, o tratamento da água é realizado através do processo convencional de ciclo completo, envolvendo as fases de captação, coagulação, floculação, decantação, filtração e cloração, sendo que o lodo é gerado dessas etapas do processo de tratamento (Oliveira e Rondon, 2016).

Os bioproductos produzidos a partir do lodo de ETA pode ser uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis tradicionais. O lodo, que é um resíduo gerado durante o processo de tratamento de água e contém uma mistura de materiais orgânicos e inorgânicos, pode ser convertido por pirólise em bioproductos, oferecendo várias vantagens ambientais e econômicas. A produção de bioproductos ajuda a reduzir a quantidade de resíduos que precisam ser descartados em aterros sanitários, o que pode reduzir a emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes, além disso, podem atuar como fonte renovável de energia contribuindo para substituir os combustíveis fósseis e reduzir a dependência desses recursos. Essa abordagem se alinha com a iniciativa de “emissões zero”, que responde a políticas para reduzir emissões e pegadas de carbono.

A matéria orgânica alimentada ao reator pirolítico, pode ser convertida em diversos subprodutos [gases (H₂, CH₄, CO); combustíveis líquidos (HC, álcoois, bio-óleo); resíduos sólidos (escória, char)], permitindo recuperação de energia com balanço energético sempre positivo (Leme, Fernandes e Lopes, 2017).

O estudo bibliométrico desenvolvido neste trabalho, levou em consideração o levantamento de técnicas estatísticas para analisar e compreender a produção global das pesquisas no campo da produção de biochar, bio-óleo e biogás por meio da pirólise de lodo de ETA's, com base em

publicações recuperadas. A perspectiva foi destacar a pirólise como um processo avançado de sanitização que induz a conversão de passivos ambientais em bioproductos, contribuindo com uma abordagem sustentável para gerenciar resíduos e produzir recursos valiosos.

2 METODOLOGIA

2.1 MÉTODO DE REVISÃO

Foi empregado uma abordagem de pesquisa de revisão pelo método de bibliometria e análise sistemática, integrando ferramentas como VOSviewer, RStudio e Bibliometrix para identificar as premissas que permeiam o processo de pirólise do lodo oriundo de estação de tratamento de água (lodo de ETA), promovendo uma gestão de informações sobre autores, instituições e palavras-chave, apresentando as descobertas e avaliação da temática por métodos quantitativos e estatísticos.

Para tanto, na bibliometria foi tomado como base a lei de Lotka para abordagem da produtividade científica dos pesquisadores; a lei de Bradford, para englobar a relevância dos periódicos na área do referido tema em estudo; e a lei de Zipf, para verificar a frequência de palavras-chave mais utilizadas nos textos dos documentos analisados.

Na análise sistemática foram exploradas as prováveis lacunas da utilização de lodo do tratamento de água como matéria-prima alternativa para o processo de pirólise, promovendo uma compreensão holística sobre o tema considerado, e destacando a importância do mecanismo de pirólise como uma solução avançada para a sua sanitização e conversão em bioproductos sustentáveis, possibilitando a extração de conclusões relevantes sobre as aplicações atuais dadas para esse tipo de sólido contaminante, por meio de classificação, categorização e análise das vertentes do tema.

2.2 COLETA DE DADOS

O processo de coleta de dados foi realizado por meio das bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, para identificação de artigos com relevância científica e que abordam o tema pirólise do lodo de ETA.

A busca nas bases de dados foi efetuada com a construção de dois eixos de pesquisa, a saber, (I) Pirólise e (II) Estação de tratamento de água. Foram delimitadas palavras-chave para cada eixo, sendo, processo termoquímico, pirólise e bioproductos para o primeiro eixo; lodo, estação de tratamento de água e Brasil para o segundo eixo. A associação das palavras-chaves estabelecidas nos eixos I e II da pesquisa, em conjunto com os indicadores booleanos *AND* e *OR*, gerou a *string* de busca em inglês "thermochemical process" AND "pyrolysis" AND "sludge" OR "water treatment station" AND "bioproducts" AND "Brazil".

2.3 ANÁLISE DE DADOS

Os dados obtidos anteriormente foram trabalhados no *software* RStudio e na ferramenta Bibliometrix que utiliza a linguagem R, possibilitando desta maneira a obtenção de cálculos e gráficos estatísticos, consequentemente, originando uma rede de acoplamento com medida de similaridade determinada entre as informações, induzindo assim uma compreensão mais precisa e estatisticamente confiável da temática.

Foram identificados 44 artigos na base *Web of Science* e 109 na *Scopus*, totalizando 153 artigos. Por meio da utilização do RStudio não houve constatação da presença de artigos duplicados.

Para a categorização dos dados encontrados, foram delimitados critérios de análise dos documentos utilizando o Bibliometrix. Assim, para o total dos 153 artigos, foram considerados filtros cujos critérios consideraram reter apenas artigos científicos e de revisão, publicados entre os anos de 2021 e 2024, difundidos em inglês e espanhol.

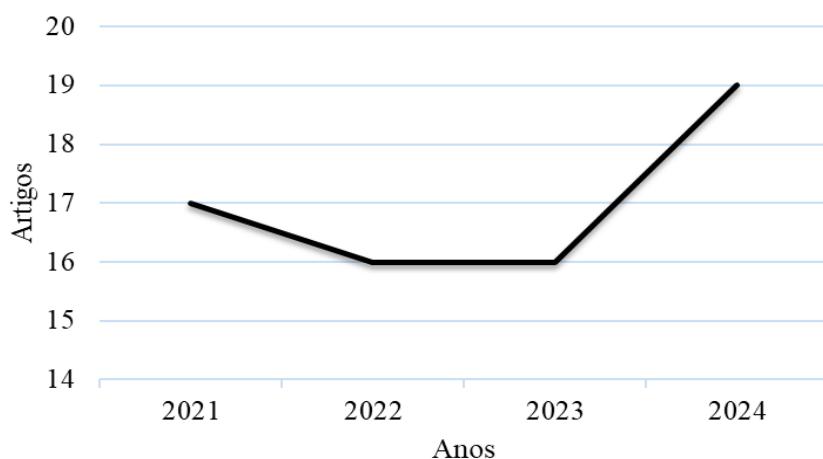
O processo de filtração resultou em 68 publicações alinhadas ao tema pirólise do lodo de ETA e suas vertentes, os quais foram analisados quanto a produção científica por ano, a produção científica por país, a relevância dos periódicos, autores mais citados, a ocorrência das palavras-chave e dos autores que trabalham em conjunto sobre o tema.

A análise sistemática foi realizada considerando os 10 artigos mais citados do portfólio contendo as 68 publicações. Os artigos foram lidos na íntegra e analisados buscando identificar a presença das palavras-chave e de nuances importantes que permeiam o tema. Além disso, buscando também identificar os bioproductos que são produzidos por meio do processo de pirólise do lodo de ETA, e suas aplicações.

3 ANÁLISE DOS DADOS

Inicialmente, na Figura 1 foi ilustrado um recorte de tempo dos últimos 4 anos da produção científica que aborda a pirólise do lodo de ETA. De forma geral, os dados apresentados realçam tanto a relevância como as tendências desta área de pesquisa. Considerando a linha de tempo adotada, a produção científica sobre a pirólise do lodo de ETA tem demonstrado um crescimento consistente. Essa tendência reflete o aumento do interesse por soluções sustentáveis e inovadoras para o reaproveitamento de resíduos, alinhadas às metas globais de sustentabilidade.

Figura 1. Produção Científica por ano abordando o tema pirólise do lodo de estação de tratamento de água entre os anos de 2021 – 2024.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Para o ano de 2021, foram identificados 17 artigos, fator que representa 25% do portfólio bibliográfico analisado, possivelmente motivado por avanços nas técnicas de pirólise ou por políticas ambientais incentivadoras. Para os anos de 2022 e 2023, o número de publicações permaneceu estável, com 16 artigos para cada ano. Isso sugere uma consolidação da área, com a continuidade de pesquisas relevantes, mas, sem expansão significativa.

Em 2024, o aumento para 19 publicações, representando 27,9% do portfólio total, evidencia um impulso renovado e maior maturidade das pesquisas. Este crescimento pode estar associado à implementação de novas regulamentações ambientais, avanços nas técnicas de pirólise ou por políticas ambientais incentivadoras, além de provável maior engajamento acadêmico e industrial.

Embora quando comparado com o lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) este número de publicações por ano seja significantemente menor, refletindo então uma lacuna ainda significativa na utilização do lodo de ETA como matéria-prima para pirólise, os resultados encontrados sugerem o despontar do interesse nesta solução em busca da destinação ambientalmente correta englobando o processo de pirólise, principalmente voltado a produção do biocarvão e/ou biogás, contribuindo para soluções mais sustentáveis. Ou seja, esse processo vai além da utilização desse tipo de resíduo como fertilizante agrícola ou do seu tratamento por adensamento, as quais são práticas utilizadas em ETA's no Estado de São Paulo, (Saneamento, 2021; Andooz *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2022).

Referente aos periódicos de maior relevância e considerando os anos de 2021 a 2024, foram descritas na Tabela 1 as 10 principais fontes que exploram o tema pirólise do lodo de ETA e seus respectivos fatores de impacto. O fator de impacto é uma métrica para avaliação científica, auxiliando na identificação de fontes que estão sendo amplamente lidas, citadas e utilizadas, independentemente da localização geográfica (Salomão e Santos, 2025).

Tabela 1. Relevância dos periódicos e seus respectivos fatores de impacto nos artigos que abordam o tema pirólise do lodo de ETA.

| Periódicos | Artigos | Fator de Impacto |
|--|---------|------------------|
| Journal of cleaner production | 5 | 9.8 |
| Science of the total environment | 4 | 8.2 |
| Environmental science and pollution research | 3 | 5.8 |
| Biofuels, bioproducts and biorefining | 2 | 3.2 |
| Biomass conversion and biorefinery | 2 | 3.5 |
| Bioresource technology | 2 | 9.7 |
| Chemosphere | 2 | 8.1 |
| Energies | 2 | 3.0 |
| Energy conversion and management | 2 | 9.9 |
| Journal of analytical and applied pyrolysis | 2 | 5.8 |

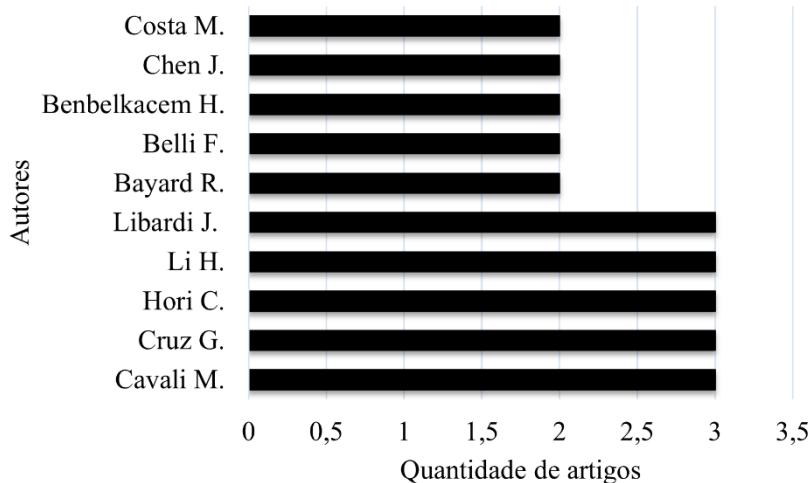
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os periódicos *Journal of Cleaner Production*, *Science of the Total Environment* e *Environmental Science and Pollution Research* apresentaram o maior número de publicações, em relação ao total, com 5, 4 e 3 artigos. Além disso, essas fontes exibiram os maiores fatores de impacto, 9.8, 8.2 e 5.8, respectivamente, tendo em vista que são reconhecidas por difundirem temas como desenvolvimento sustentável, processos técnicos, qualidade e segurança da água, impactos ambientais do tratamento de resíduos ou águas residuais.

Além disso, embora os periódicos *Bioresource Technology* e *Chemosphere* contabilizem apenas dois artigos cada, seus altos fatores de impacto, 9.7 e 8.1, respectivamente, reforçam a importância dessas fontes para a disseminação de pesquisas de alta qualidade no tema. Essa disparidade entre número de publicações e impacto destaca a diversidade de abordagens e prestígio dentro das fontes científicas relacionadas à pirólise do lodo de ETA.

A análise seguinte priorizou a identificação dos principais autores que contribuíram para a disseminação do conhecimento sobre a pirólise do lodo de ETA entre 2021 e 2024. Como apresentado na Figura 2, autores como Cavali M., Cruz G., Horii C., Li H. e Libardi J. destacaram-se por publicar o maior número de artigos, totalizando 3 cada, em um universo de 68 publicações analisadas. É importante ressaltar que os demais autores registraram produções iguais ou inferiores a 2 artigos, evidenciando um número mais limitado de contribuições individuais.

Figura 2. Principais autores por quantidade de artigos publicados entre os anos de 2021-2024.

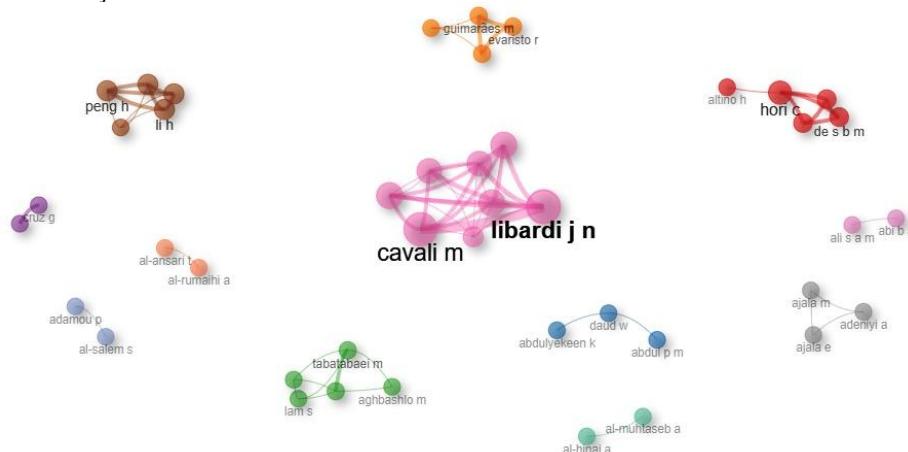


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Ao correlacionar os aspectos temáticos das publicações, observa-se que os autores Cavali M. e Li H. produzem trabalhos de destaque que exploram a aplicação da pirólise de resíduos orgânicos na geração de biogás e biocarvão, demonstrando o potencial do processo em soluções energéticas sustentáveis. Por outro lado, os autores Costa G., Chen J. e Belli F. são reconhecidos por suas pesquisas no campo dos processos termoquímicos, direcionados ao aproveitamento do lodo proveniente de estações de tratamento de água. Esses estudos enfatizam abordagens inovadoras para a gestão de resíduos e a promoção de práticas ambientalmente responsáveis.

Na Figura 3 foi ilustrada a relação de coautoria existente entre os autores do portfólio bibliográfico analisado. A partir do Bibliometrix observa-se a presença de 12 clusters expressos pelas cores laranja, marrom, roxo, azul, rosa, verde, vermelho, cinza e ciano.

Figura 3. Correlação existente entre os autores na análise de coautoria realizada usando o Bibliometrix.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A ausência de *links* ligando os grupos indica que os autores não contribuíram em conjunto sobre a temática pirólise do lodo de ETA, fator que ressalta o tema sendo pesquisado em particular por alguns grupos de pesquisas espalhados pelo mundo. Além disso, esse aspecto pode ser confirmado ao observar que os autores Li H., Cavali M. e Cruz G. aparecem em grupos separados e já foram destacados anteriormente pelo número de contribuições sobre o tema.

Na Tabela 2 consta a análise da produção científica por país sobre o tema da pirólise do lodo de ETA no período de 2021 a 2024. Os países com maior destaque foram o Brasil, com 20 artigos e 874 citações, seguido pela China, com 12 artigos e 259 citações, e pela Índia, com 9 artigos e 362 citações. Esses números refletem a liderança dessas nações na pesquisa sobre o tema, sustentada provavelmente por fatores como condições econômicas, legislações ambientais rigorosas e avanços tecnológicos. Esses elementos estimulam a exploração de alternativas sustentáveis para o reaproveitamento do lodo, que, na ausência de tratamento adequado, geralmente é descartado em aterros sanitários ou corpos hídricos.

Tabela 2. Quantidade de publicações por países que mais concentraram estudos voltados a pirólise do lodo da estação de tratamento de água entre os anos de 2021-2024.

| Países | Artigos | Citações |
|----------------|---------|----------|
| Brasil | 20 | 874 |
| China | 12 | 259 |
| Índia | 9 | 362 |
| Estados Unidos | 5 | 67 |
| Malásia | 4 | 141 |
| Irã | 3 | 61 |
| Omã | 3 | 504 |
| Portugal | 2 | 19 |
| Vietnã | 3 | 21 |
| África do Sul | 1 | 22 |

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

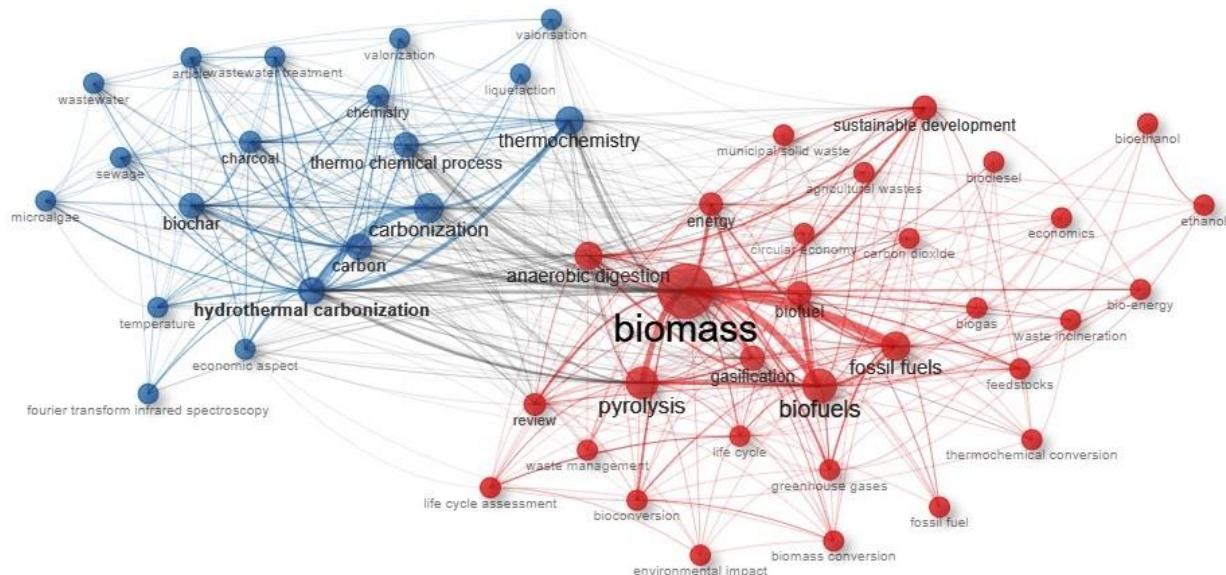
O Brasil lidera tanto em número de publicações quanto em citações, indicando uma combinação de esforços acadêmicos robustos e alta visibilidade científica. A China, por sua vez, mantém destaque em volume de artigos, provavelmente influenciada pela sua rápida industrialização e busca por soluções tecnológicas para gestão de resíduos. Já a Índia, com números expressivos de citações em relação às publicações, evidencia o impacto significativo de suas contribuições científicas, especialmente em áreas que exploram o potencial econômico e ambiental da pirólise do lodo.

Outros países também contribuíram para a literatura científica, embora com menor intensidade. Nos casos do Omã e da Malásia, por exemplo, observa-se um número reduzido de artigos publicados (3 e 4, respectivamente), mas, com expressivas 504 e 141 citações, o que pode sugerir relevância

qualitativa das suas pesquisas. Tais estudos reforçam a importância global da pirólise como uma solução estratégica para o manejo de resíduos provenientes das ETA's.

Mediante a Figura 4 foi ilustrada a análise de ocorrência das palavras-chave, expressando os termos que foram mais citados nos estudos analisados retratando a pirólise do lodo de ETA. O *cluster* representado na cor vermelha concentra os principais termos associados ao tema, como *biomass*, *pyrolysis*, *biogas* e *thermochemical conversion*, entre outros. Essa análise é corroborada pela literatura, que enfatizam a proximidade na disposição dos termos como uma característica crucial para identificar sua relevância e recorrência nas pesquisas científicas relacionadas (Peixe e Pinto, 2021).

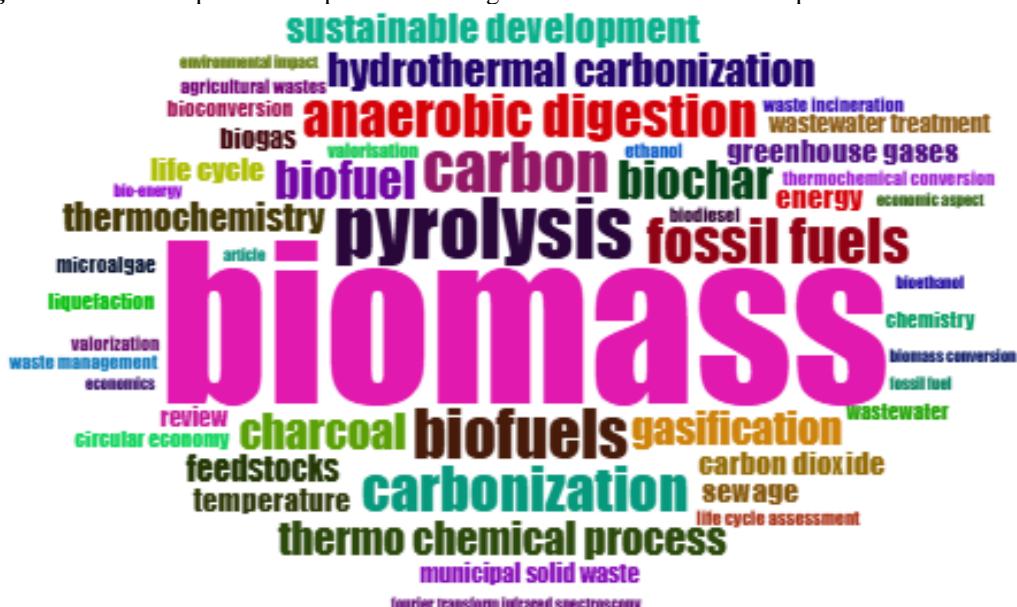
Figura 4. Análise de ocorrência das palavras-chave para identificação dos *clusters* com os termos mais citados nos estudos analisados.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Esses resultados estão alinhados com os termos observados na nuvem de palavras-chave ilustrada na Figura 5, em que o tamanho das palavras reflete proporcionalmente sua frequência de ocorrência nos textos analisados. Entre as expressões de maior destaque estão *biochar*, *biofuels*, *life cycle* e *waste water treatment*, evidenciando a ênfase dos estudos na produção sustentável de bioprodutos e na gestão de resíduos provenientes de ETA's.

Figura 5. Nuvem de palavras do portfólio bibliográfico analisado referente a pirólise do lodo de ETA.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A análise sistemática dos 10 artigos mais citados, detalhada na Tabela 3, dentre o portfólio bibliográfico dos 68 artigos filtrados, apresenta contribuições importantes para o entendimento dos processos termoquímicos associados à pirólise do lodo de ETA, bem como para a identificação dos bioproductos resultantes e suas possíveis aplicações.

Dos artigos analisados, percebe-se que o biocarvão (ou *biochar*) é o bioproduto mais frequentemente explorado, com destaque para o processo de pirólise como a principal técnica empregada. Aproximadamente 70% dos estudos selecionados focaram na produção de biocarvão a partir do lodo de ETA ou do lodo de esgoto, demonstrando o grande potencial deste material como fonte para geração de produtos de alto valor agregado. Além disso, 20% dos artigos abordaram a obtenção de hidrocarvão (*hydrochar*) por meio da carbonização hidrotérmica, enquanto uma fração menor examinou processos híbridos, como a combinação de incineração, pirólise e carbonização hidrotérmica.

Em relação ao tipo de resíduo utilizado, observa-se que 60% dos artigos trabalharam especificamente com o lodo de ETA, enquanto os 40% restantes empregaram o lodo de esgoto ou resíduos adicionais, como casca de arroz e resíduos de colheita. Esse dado sugere uma tendência de diversificação nas matérias-primas utilizadas para melhorar a eficiência e a viabilidade econômica das tecnologias termoquímicas.

Os estudos identificaram diversas aplicações para os bioproductos derivados. O biocarvão tem sido amplamente destacado como um componente promissor para a agricultura, devido às suas

propriedades de melhoria do solo, e para a remediação ambiental. Por outro lado, o hidrocarvão apresenta aplicações potenciais como fonte de energia renovável e na produção de biocombustíveis.

Tabela 3. Conjunto de artigos mais citados utilizados na análise sistemática abordando a pirólise do lodo de ETA entre os anos de 2021-2024.

| Bioproductos | Processo termoquímico | Resíduo | Referência |
|--------------|---|--|--|
| Hidrocarvão | Liquefação Hidrotérmica | Lodo de ETA | Aktas, Liu e Eskicioglu (2024) |
| Biocarvão | Pirólise | Lodo de ETA | Medeiros, Chelme-Ayala e El-Din (2023) |
| Biocarvão | Pirólise | Lodo de ETA | Gomes <i>et al.</i> (2022) |
| Biocarvão | Pirólise | Lodo da ETA | Jiang <i>et al.</i> (2021) |
| Biocarvão | Pirólise | Lodo da ETA | Luo <i>et al.</i> (2021) |
| Biocarvão | Pirólise | Lodo de esgoto | Jellali <i>et al.</i> (2021) |
| Biocarvão | Pirólise | Lodo de esgoto | Constantinescu-Aruzandei e Oancea (2023) |
| Biocarvão | Pirólise | Lodo de esgoto | Sun <i>et al.</i> (2024) |
| Hidrocarvão | Carbonização Hidrotérmica | Lodo de esgoto Resíduos de colheita | Cavali <i>et al.</i> (2023) |
| Biocarvão | Incineração Pirólise Carbonização Hidrotérmica | Lodo de esgoto Casca de arroz | Hu <i>et al.</i> (2022) |

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Um aspecto notável é a alta representatividade de artigos recentes, como os trabalhos de Aktas, Liu e Eskicioglu (2024) e Medeiros, Chelme-Ayala e El-Din (2023), indicando que a pesquisa sobre pirólise do lodo de ETA é um campo emergente e dinâmico. A seleção de estudos com grande número de citações reforça a relevância científica dessas publicações, bem como o impacto que seus resultados têm exercido na comunidade acadêmica e no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis.

A análise estatística do portfólio também evidencia a centralidade do biocarvão e do hidrocarvão nos estudos mais citados, refletindo o interesse em aplicações práticas e a capacidade desses materiais de contribuir para uma economia circular. Esses resultados oferecem uma base sólida para futuras investigações e para a implementação de soluções inovadoras no aproveitamento do lodo de ETA.

Então, em pormenores, tem-se que os 10 artigos mais citados dentro do universo do portfólio de 68 publicações analisadas, destacam temas relevantes e aplicações práticas relacionadas à pirólise do lodo de ETA, evidenciando a importância científica desse campo de estudo.

Jiang *et al.* (2021) exploraram o potencial do lodo de ETA na produção de biocarvão. A pirólise, empregada em temperaturas entre 400 e 800 °C, mostrou ser um processo termoquímico eficiente, resultando em um material altamente poroso, com teor de carbono fixo entre 40% e 60%. Contudo, o elevado teor de minerais no lodo foi associado a altos índices de cinzas, reduzindo seu poder calorífico. Paralelamente, Luo *et al.* (2021) destacaram a versatilidade do biocarvão oriundo do lodo de ETA como combustível alternativo para geração de calor e eletricidade, e ainda como adsorvente, fertilizante e corretivo de solo.

Gomes *et al.* (2022) realizaram a pirólise do lodo de ETA em reator de leito fixo, a 700 °C por 2h, injetando gás nitrogênio à uma vazão de 220 mL/min para manter uma atmosfera com baixo teor oxigênio. O biocarvão obtido por pirólise foi empregado como material cimentício suplementar, melhorando as propriedades de calor de hidratação em compósitos de cimento quando comparado ao uso de lodo bruto. Da mesma forma, Medeiros, Chelme-Ayala e El-Din (2023) investigaram o lodo de ETA na produção por pirólise de biocarvão bruto e ativado com cloreto de zinco, evidenciando que o biocarvão ativado apresenta maior área superficial e eficiência na adsorção de poluentes devido à abundância de mesoporos (89% do volume de poros).

Além da pirólise, processos termoquímicos alternativos também foram explorados. Aktas, Liu e Eskicioglu (2024) estudaram a liquefação hidrotérmica do lodo de ETA, em reator Parr com capacidade de 1 litro, a 350 °C por 15 minutos, produzindo hidrocarvão com maior índice de umidade (7,4%), além de menor área superficial e volume de poros. Neste caso, evidencia-se a superioridade do processo de pirólise na produção de bioproduto com melhores propriedades, como àquelas encontradas no trabalho de Medeiros, Chelme-Ayala e El-Din (2023). Já Cavali *et al.* (2023) relataram a produção de hidrocarvão utilizando biomassa lignocelulósica e lodo de esgoto, constatando a sua eficiência na remoção de poluentes aquáticos e atmosféricos.

No que diz respeito ao lodo de esgoto, Constantinescu-Aruzandei e Oancea (2023) destacaram métodos para recuperação de nutrientes, como a separação termoquímica do fósforo e recuperação de nitrogênio, enxofre e fósforo por digestão anaeróbica. Sun *et al.* (2024) corroboraram a viabilidade do lodo de esgoto como matéria-prima para produção de biocarvão, observando sua capacidade de reduzir emissões de carbono em até 3,9 t CO₂ por 1 tonelada equivalente de biomassa (Lehmann *et al.* (2021)). Em contrapartida, Hu *et al.* (2022) destacaram a formação de radicais livres persistentes durante processos termoquímicos de incineração, pirólise e carbonização hidrotérmica de biocarvões

produzidos com lodo de esgoto e casca de arroz. Em relação a pirólise, evidenciando a temperatura como fator determinante na geração de contaminantes.

Jellali *et al.* (2021) exploraram a produção de biocarvão por meio do lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento de águas residuais, considerando essa uma nova alternativa frente a produção desse bioproduto por meio de resíduos lignocelulósicos. Demonstraram que as propriedades físico-químicas do biocarvão, incluindo a sua capacidade de adsorção de poluentes, dependem da natureza do lodo tratado. O biocarvão produzido com lodo digerido desaguado apresentou melhor porosidade e maior área superficial, sendo eficaz na remoção de chumbo (Pb II) e fósforo (P) de soluções aquosas.

Os resultados obtidos demonstram que, embora os 10 artigos mais citados não discorrem exclusivamente da pirólise do lodo de ETA, a produção de biocarvão é um tema recorrente em todas as publicações. A amplitude de abordagens metodológicas reflete o caráter global das questões analisadas, com contribuições significativas para a economia circular e práticas ambientalmente responsáveis. Dessa forma, a disseminação desses estudos fortalece a base científica para futuros avanços tecnológicos e aplicações práticas em áreas de alto impacto ambiental e social.

4 CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma revisão bibliométrica e análise sistemática sobre a pirólise do lodo de estação de tratamento de água (ETA), abordando aspectos-chave relacionados à produção científica, autores e periódicos de destaque, distribuição geográfica das pesquisas e análise de palavras-chave recorrentes. A abordagem bibliométrica possibilitou identificar tendências e lacunas no tema, enquanto a análise sistemática aprofundou a compreensão sobre os produtos gerados pela pirólise e suas aplicações.

A revisão bibliométrica revelou que Brasil, China e Índia lideram em número de publicações sobre a pirólise do lodo de ETA, refletindo o impacto de prováveis fatores como contextos econômicos, legislações ambientais e avanços tecnológicos. Os periódicos *Journal of Cleaner Production*, *Science of the Total Environment* e *Environmental Science and Pollution Research* foram os mais destacados, evidenciando fatores de impacto significativos de 9.8, 8.2 e 5.8, respectivamente. Esses dados reforçam a relevância dessas fontes para a disseminação do conhecimento no campo. A análise também indicou que os grupos de pesquisa operam majoritariamente de forma isolada, sem ampla interação entre os principais autores.

A correlação de palavras-chave destacou termos como *biochar*, *biofuels*, *biomass*, *pyrolysis*, *biogas* e *waste water treatment*, evidenciando as principais linhas de investigação e o potencial tecnológico dos bioproductos derivados do lodo de ETA.

No âmbito da análise sistemática, foi identificado que a produção de biocarvão é recorrente nos estudos analisados. Esse bioproduto foi amplamente destacado por seu potencial adsorvente, sendo aplicado em campos tecnológicos como na remoção de poluentes e na melhoria de propriedades de materiais cimentícios. Ademais, foi constatado o crescente interesse no aproveitamento do lodo de esgoto, ampliando as possibilidades de geração de produtos de valor agregado a partir de resíduos orgânicos.

Por fim, as conclusões deste estudo reforçam a importância da pirólise como uma solução sustentável para o reaproveitamento de lodos gerados em estações de tratamento de água (ETA) e esgoto (ETE), contribuindo para práticas de economia circular e manejo ambientalmente responsável. A ampliação e o aprofundamento dessas pesquisas podem fomentar inovações tecnológicas e fortalecer a relevância global do tema, alinhando-se aos desafios contemporâneos de sustentabilidade e eficiência no gerenciamento de resíduos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ-PB/Edital nº 17/2022; Pós-doutorado no País BLD-PDRP) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 115-122, 2013.
- AKTAS, K.; LIU, H.; ESKICIOGLU, C. Treatment of aqueous phase from hydrothermal liquefaction of municipal sludge by adsorption: comparison of biochar, hydrochar, and granular activated carbon. *Journal of Environmental Management*, v. 356, 120619, 2024.
- AL DUHAILIB, Z.; GRANHOLM, A.; ALHAZZANI, W.; OCZKOWSKI, S.; BELLEY-COTE, E.; MOLLER, M. H. Grade pearls and pitfalls—Part 1: Systematic reviews and meta-analyses. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, v. 68, n. 5, p. 584-592, 2024.
- ALMEIDA, M. B. G.; JESUS, A. M. D.; PEREIRA, A. S.; FIORE, F. A. Evaluating centrifuged water treatment plant sludge as an adsorbent for nutrients, microorganisms, and heavy metals removal from wastewater. *Journal of Cleaner Production*, v. 468, 142975, 2024.
- AQUINO, G. P.; PEREIRA, C. R. B.; MOTTA, M. F. B.; MÜLLE, M. Caracterização física de lodo de ETA pós desaguamento em bolsa geotêxtil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 10., 2023, Salvador. Anais... Salvador: IGS-Brasil/ABMS, 2023.
- ASN. Engenheira se destaca como empreendedora em projeto que transforma rejeito de esgoto em fertilizante. Por Valdívia Costa. Agência Sebrae de Notícias, Inovação & Tecnologia, 10 fev. 2025. Disponível em: <https://pb.agenciasebrae.com.br/inovacao-e-tecnologia/engenheira-se-destaca-como-empreendedora-em-projeto-que-transforma-rejeito-de-esgoto-em-fertilizante/>. Acesso em: 18 mar. 2025.
- CAGEPA. Apresentação. João Pessoa: Companhia de Água e Esgotos da Paraíba, [s.d.]. Disponível em: <https://www.cagepa.pb.gov.br/institucional/apresentacao/>. Acesso em: 18 mar. 2025.
- CAVALI, M.; LIBARDI, J. N.; SENA, J. D.; WOICIECHOWSKI, A. L.; SOCCOL, C. R.; BELL, F. P.; BAYARD, R.; BENBELKACEM, H.; CASTILHOS JÚNIOR, A. B. A review on hydrothermal carbonization of potential biomass wastes, characterization and environmental applications of hydrochar, and biorefinery perspectives of the process. *Science of the Total Environment*, v. 857, 159627, 2023.
- CONSTANTINESCU-ARUXANDEI, D.; OANCEA, F. Closing the nutrient loop—the new approaches to recovering biomass minerals during the biorefinery processes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 20, n. 3, 2096, 2023.
- CUNHA, M. C. B.; TORRES, D. M.; FERREIRA, D. M.; LOPES, R. L. Gerenciamento de lodos em estações de tratamento de água: sludge management in water treatment plants. *Revista Brasileira de Meio Ambiente & Sustentabilidade*, v. 3, n. 2, p. 64-74, 2023. Disponível em: <https://rbmaes.emnuvens.com.br/revista/article/view/298>. Acesso em: 18 mar. 2025.
- FAIXO, S.; GARRIGUES, J.-C.; HADDAD, M.; MAZEGHRANE, S.; GAVAL, G.; BENOIT-MARQUIÉ, F.; PAUL, E. Thermal treatment of sewage sludge: Impact of the sludge type and origin on the formation of recalcitrant compounds. *Water Research*, v. 271, 122868, 2025.

G1. Empreendedoras criam startup que melhora a fertilidade e recupera o solo. Sebrae Paraíba, 13 maio 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/pb/paraiba/especial-publicitario/sebrae-paraiba/neon/noticia/2024/05/13/empreendedoras-criam-startup-que-melhora-a-fertilidade-e-recupera-o-solo.ghtml>. Acesso em: 18 mar. 2025.

GOMES, S. C.; ZHOU, J. L.; ZENG, X.; LONG, G. Water treatment sludge conversion to biochar as cementitious material in cement composite. *Journal of Environmental Management*, v. 306, 114463, 2022.

GOZ W PRAKTYCE. Recovery of by-products. [S.l.], 2024b. Disponível em: <https://gozwpraktyce.pl/odzysk-produktow/>. Acesso em: 13 maio 2024.

GOZOZ W PRAKTYCE. Circular business models. [S.l.], 2024a. Disponível em: <https://gozwpraktyce.pl/modele-biznesowe/>. Acesso em: 13 maio 2024.

GREGORIO-CHAVIANO, O.; LÓPEZ MESA, E. K.; LIMAYMANTA, C. H. Web of Science as a research tool and support for scientific activity: lights and shadows of their collections, products and indicators. *E-Ciencias de la Información*, v. 12, n. 1, p. 134-157, 2022.

HU, Y.; ZHANG, B.; GUO, Q.; WANG, S.; LU, S. Characterization into environmentally persistent free radicals formed in incineration fly ash and pyrolysis biochar of sewage sludge and biomass. *Journal of Cleaner Production*, v. 373, 133666, 2022.

IWAKI, G. Destinação final de lodos de ETAs e ETEs. Portal Tratamento de Água, 19 maio 2018. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-final-de-lodos-de-etas-e-etes/>. Acesso em: 11 mar. 2025.

JELLALI, S.; KHIARI, B.; USMAN, M.; HAMDI, H.; CHARABI, Y.; JEGUIRIM, M. Sludge-derived biochars: A review on the influence of synthesis conditions on pollutants removal efficiency from wastewaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 144, 111068, 2021.

JIANG, G.; XU, D.; HAO, B.; LIU, L.; WANG, S.; WU, Z. Thermochemical methods for the treatment of municipal sludge. *Journal of Cleaner Production*, v. 311, 127811, 2021.

KRYMSKAYA, A. S. The Bibliometrics of Bibliometrics as a New Area of Research. *Scientific and Technical Information Processing*, v. 50, n. 4, p. 286-291, 2023.

KUDAYBAYEVA, K.; TLEUMAGAMBETOYA, B.; BAZARGALIYEV, Y.; KOSMURATOVA, R.; ZHYLKYEKOVA, A. Global Trends in LADA Type Diabetes Research: A Bibliometric Analysis of Publications from Web of Science and Scopus, 1994–2024. *Journal of Diabetes Research*, v. 2024, n. 1, 4960075, 2024.

KUSHWAH, A.; SHANKA, R.; GOELOEL, D.; SINGHINGH, S.; CHAURASIA, P. K. Role of plants as bioindicators of water pollution and treatment of water contaminations. In: *Biotechnologies for Wastewater Treatment and Resource Recovery: Current Trends and Future Scope*. [S.l.: s.n.], 2025. cap. 14, p. 187-201.

LEHMANN, J.; COWIE, A.; MASIELLO, C. A.; KAMMANN, C.; WOOLF, D.; AMONETTE, J. E.; CAYUELA, M. L.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; WHITMAN, T. Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, v. 14, n. 12, p. 883-892, 2021.

LEME, G. R.; FERNANDES, D. M.; LOPES, C. L. Utilização da pirólise para o tratamento de resíduos no Brasil. In: *FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS*, 8., 2017, Curitiba. Anais... Curitiba: [s.n.], 2017.

LI, P.; SUN, F.; DONG, Y.; WEN, L.; LIN, L.; LI, X.-Y. Utilization of drinking water treatment sludge with coal fly ash to make permeable bricks for low impact development. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 212, 107932, 2025.

LI, Y.; TAO, C.; LI, S.; CHEN, W.; FU, D.; JAFVERT, C. T.; ZHU, T. Feasibility study of machine learning to explore relationships between antimicrobial resistance and microbial community structure in global wastewater treatment plant sludges. *Bioresource Technology*, v. 417, 131878, 2025.

LUO, H.; CHENG, F.; YU, B.; HU, L.; ZHANG, J.; QU, X.; YANG, H.; LUO, Z. Full-scale municipal sludge pyrolysis in China: Design fundamentals, environmental and economic assessments, and future perspectives. *Science of the Total Environment*, v. 795, 148832, 2021.

MARINES, F.; CORSINO, S. F.; COSENZA, A.; CAPODICI, M.; TORREGROSSA, M.; VIVIANI, G. A modified robustness index for assessing operational performance of drinking water treatment plants: A comparative study within a new regulatory framework. *Water Research*, v. 268, Part B, 122668, 2025.

MEDEIROS, D. C. C. S.; CHELME-AYALA, P.; EL-DIN, M. G. Sludge-based activated biochar for adsorption treatment of real oil sands process water: Selectivity of naphthenic acids, reusability of spent biochar, leaching potential, and acute toxicity removal. *Chemical Engineering Journal*, v. 463, 142329, 2023.

MEZQUITA, B.; AFONSO-ARIAS, C.; MARTÍNEZ-JAIMEZ, P.; BORREGO, Á. The use of bibliometrics in nursing science: Topics, data sources and contributions to research and practice. *Nursing Open*, v. 11, n. 9, e70036, 2024.

OLIVEIRA, I. Y. Q.; RONDON, O. C. Diagnóstico da gestão de lodo de estação de tratamento de água em Mato Grosso do Sul. *Interações*, Campo Grande, v. 17, n. 4, p. 687-698, 2016.

PEIXE, A. M. M.; PINTO, J. S. P. Infometria nas bases Web of Science e Scopus: governança corporativa, informação e tecnologia da informação; precificação de ações e riscos de mercado. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 5, e56110515433, 2021.

SALOMÃO, P. E. A.; SANTOS, A. T. O. Evolução e desafios na avaliação científica: da classificação de periódicos à qualidade intrínseca dos artigos. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, v. 1, n. 1, p. 1-18, 2025.

SANEAMENTO. Destinação de lodo resultante do tratamento de água é desafio para o saneamento. Saneamento Já, [s.d.]. Disponível em: <http://www.saneamentoja.com.br/melhores-praticas/destinacao-de-lodo-resultante-do-tratamento-de-agua-e-desafio-para-o-saneamento/>. Acesso em: 10 mar. 2025.

SILVA, L. R.; ACHON, C. L.; ISAAC, R. L. Lodo gerado em estações de tratamento de água: planos municipais de resíduos sólidos e pesquisas acadêmicas no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., 2019, [S.I.]. Anais... [S.I.]: ABES, 2019.

SILVA, L. R.; ACHON, C. L.; ISAAC, R. L. Análise crítica da gestão do lodo gerado em estações de tratamento de água – cenário brasileiro. In: INTERNATIONAL WORKSHOP FOR INNOVATION IN SAFE DRINKING WATER, 2022, [S.I.]. Anais... [S.I.: s.n.], 2022.

SUN, H.; CHEN, T.; JI, L.; TIAN, D.; LI, X.; SUN, C. Waste derived biochar for water purification: the roles of redox properties. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, p. 1-23, 2024.

TAN, C.; XIAO, Y.; CHEN, S.; LIU, T.; ZHOU, J.; ZHANG, S.; HU, Y.; ZHOU, J.; SHE, Z.; TIAN, B.; WU, A.; LI, C. Bibliometrics analysis and knowledge mapping of pertussis vaccine research: trends from 1994 to 2023. *Infection*, p. 1-12, 2024.

URBAN, R. C.; NAKADA, L. Y. K.; ISAAC, R. L. A system dynamics approach for large-scale water treatment plant sludge management: A case study in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 419, 138105, 2023.

VALENÇA, A. K. A.; DANTAS, J.; SILVA, K. C. G.; ALMEIDA, T. O. Análise bibliométrica da evolução da pesquisa científica sobre biochar do lodo de esgoto: revisão dos últimos 10 anos (2012-2022). In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, 25., 2023, São Paulo. Anais... São Paulo: FEA/USP, 2023.

VIEIRA, L. J. C.; SILVA, I. C. O. Scientific production about bibliometric studies in Brazil: an analysis from Brapci. *Em Questão*, v. 29, e-128160, 2023.

WAN GANG, Y.; TON GONG, Z.; JIAN GIANG, L.; PEN GENG, F.; LI UIU, W.; CHE NHEN, J.; RA OAO, X.; FEN GENG, G.; KAN GANG, C.; FAN GANG, L. Molecular-level insights into the synergistic activation of peracetic acid by ultraviolet and ferrous ions for the degradation of sedimentation sludge water in drinking water treatment plants based on Fourier transform-ion cyclotron resonance mass spectrometry. *Separation and Purification Technology*, v. 355, Part B, 129708, 2025.