TRATAMENTO TÉRMICO DE LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA: EMISSÕES GASOSAS, IMPACTOS AMBIENTAIS E USOS BENÉFICOS – UMA REVISÃO SISTEMÁTICA.

Mirella Bianca Gama de Almeida [1]
Graduada em Engenharia Ambiental pelo Instituto de Ciência e Tecnologia da UNESP/SJC (2025). Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia de Bauru (UNESP).
Ana Caroline da Silva [2]
Graduanda em Engenharia Ambiental - Instituto de Ciência e Tecnologia da UNESP/SJC.
Mariah Demarchi Nardone [3]
Graduanda em Engenharia Ambiental - Instituto de Ciência e Tecnologia da UNESP/SJC.
Fabiana Alves Fiore [4]
Graduada em Engenharia Civil (UFMG - 2001); Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG - 2004); Doutora em Saneamento e Meio Ambiente (FEC/UNICAMP - 2013); Professora e Pesquisadora do Instituto de Ciência e Tecnologia da UNESP/SJC e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia de Bauru (UNESP).

Endereço [1]**:** Av. Doutor Altino Bondesan, 500 - Distrito de Eugênio de Melo - São José dos Campos - SP - 12247-016 - Brasil - +55 (11) 95215-3775 - e-mail: mirella.bianca@unesp.br.

RESUMO

Os lodos de estação de tratamento de água (LETAs) apresentam elevado teor de umidade, tornando sua destinação um desafio ambiental e operacional. Dessa forma, o tratamento térmico destaca-se como uma alternativa para reduzir o volume e viabilizar os usos benéficos, embora os impactos ambientais associados ao processo permaneçam pouco investigados. Para esclarecer essa lacuna, realizou-se uma revisão sistemática nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus* e *Springer*, resultando em um conjunto final de dez artigos. Os resultados permitiram identificar três níveis de aplicação térmica: secagem em sentido estrito (75-120ºC), pirólise (400-700ºC) e calcinação (acima de 700ºC); associados a alterações físicas, químicas, mineralógicas e biológicas no material, influenciando suas aplicações posteriores, com aumento expressivo da área superficial e formação de fases reativas que favorecem aplicações como adsorventes, materiais cimentícios, geopolímeros e catalisadores. Quanto às emissões atmosféricas, identificaram-se principalmente CO, CO_2 e material particulado, ainda que de forma limitada e majoritariamente em escala laboratorial. O tratamento térmico de LETAs é uma rota promissora de valorização no contexto da economia circular, mas sua consolidação depende de estudos em escala real, ainda ausentes na literatura, e de maior padronização dos processos e do monitoramento das emissões, alinhando-se aos ODS 6 e 13.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo de ETA; Tratamento térmico; Usos benéficos.

1. INTRODUÇÃO

No que tange aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Nações Unidas, 2015), a universalização do acesso à água potável figura entre os principais compromissos da agenda global de saneamento, sendo um recurso essencial para a manutenção da vida e para o desenvolvimento das atividades humanas. O processo de potabilização da água gera um subproduto denominado lodo de estação de tratamento de água (LETA), resultante, principalmente, das etapas de sedimentação e filtração do processo de tratamento de água (Wagner *et al.*, 2019) e das etapas de coagulação e floculação (Nair e Ahammed, 2015).

A composição dos LETAs é heterogênea e reflete a interação entre diferentes fatores, como a qualidade da água bruta e o tipo de coagulante empregado no tratamento, podendo ser à base de ferro ou alumínio (Messa *et al*., 2025), e os demais insumos utilizados no desaguamento do material, tais como polímeros. A gestão desses resíduos é um desafio mundial, principalmente devido ao seu alto teor de umidade, fator preponderante no descarte *in natura* em corpos d'água, podendo ser prejudicial aos ecossistemas aquáticos e aos solos (Bernegossi

et al., 2022), o que reforça a necessidade de pesquisas que subsidiem alternativas sustentáveis de tratamento e usos benéficos desse material.

Entre as técnicas de tratamento disponíveis, o tratamento térmico destaca-se como uma alternativa eficaz para a redução da umidade e do volume do resíduo, podendo atingir reduções acima de 70%. Além disso, o processo promove a inativação de microrganismos patogênicos, contribuindo para a segurança do material tratado (Silva *et al*., 2025). Além disso, estudos apontam que o lodo seco ou ativado termicamente pode ser empregado em aplicações geotécnicas ou químicas, ampliando seu valor agregado e contribuindo para práticas alinhadas à economia circular (Fiore *et al*., 2022).

Apesar das vantagens associadas ao tratamento térmico, o aquecimento do LETA pode promover a volatilização de compostos e a emissão de gases e de material particulado para a atmosfera. A degradação térmica da fração orgânica do lodo é capaz de liberar compostos orgânicos voláteis, subprodutos da decomposição de polímeros e gases associados a processos de oxidação, com potenciais riscos tanto ambientais quanto ocupacionais (Li, 2018). Ainda assim, a escassez de estudos quantitativos e qualitativos sobre essas emissões limita a definição de condições seguras de temperatura de operação e dificulta a avaliação dos impactos atmosféricos do processo.

Apesar do potencial de valorização do LETA após o tratamento térmico, a literatura ainda apresenta lacunas relacionadas à padronização dos processos, à variabilidade de composição do resíduo e, principalmente, à avaliação ambiental das emissões gasosas geradas durante o tratamento térmico. Essa limitação dificulta a consolidação de protocolos operacionais e a ampliação segura dessas tecnologias em escala aplicada. Diante desse cenário, o presente estudo realizou uma revisão sistemática da literatura sobre o tratamento térmico de LETAs, com ênfase nas transformações do material, nos impactos ambientais associados e nos usos benéficos decorrentes.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é sistematizar, por meio de revisão sistemática da literatura, reunir e sistematizar as evidências científicas disponíveis sobre o tratamento térmico de LETAs, articulando as condições operacionais dos processos aos seus efeitos ambientais e às possibilidades de uso benéfico do resíduo.

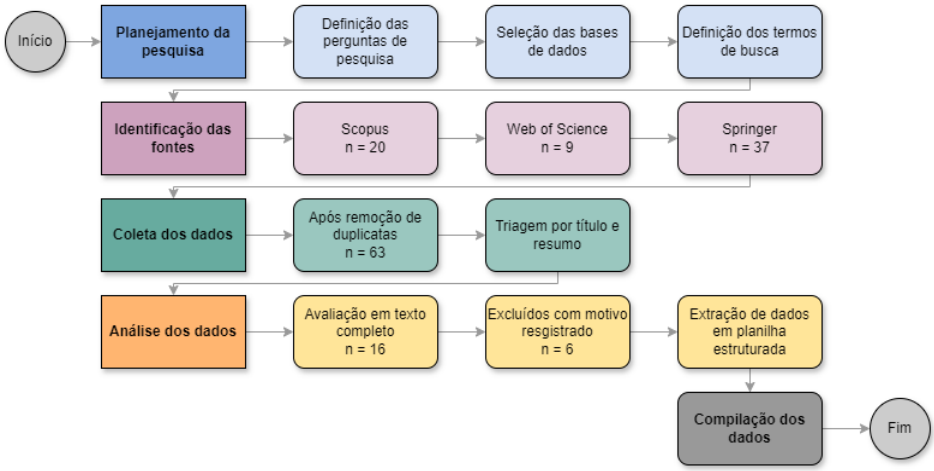
2.1 Objetivos específicos

a) Delimitar as faixas de temperatura que caracterizam o processo;
b) Identificar as alterações físico-químicas promovidas no material pelo tratamento térmico;
c) Analisar os impactos ambientais associados, com ênfase nas emissões gasosas;
d) Reunir os principais usos benéficos do resíduo após o tratamento térmico.

3. METODOLOGIA

A revisão bibliográfica foi realizada utilizando-se o Método de Pesquisa em Arquivo - MPA (Searcy e Mentzer, 2003), no intuito de examinar os artigos que contemplam o tratamento térmico dos LETAs, mais especificamente as temperaturas utilizadas nos processos; as questões relacionadas às propriedades do material; os impactos ambientais associados ao processo; e as aplicações e as vantagens do resíduo após esse tratamento. A seleção dos artigos foi realizada conforme as etapas a seguir, contempladas com maiores detalhes no fluxograma da Figura 01.

Figura 01: Etapas para seleção dos artigos para composição da revisão sistemática.



Fonte: Autoria própria (2026).

As perguntas de pesquisa foram estabelecidas com o objetivo de identificar as tipologias, as características e os processos aplicados para o tratamento térmico de LETAs e para o entendimento dos potenciais impactos ambientais dele decorrentes. Sendo assim, o estudo se propôs a responder às questões:

1. Qual(is) a(s) faixa(s) de temperatura utilizada(s) para o tratamento térmico do LETA?
2. Quais alterações físico-químicas ocorrem no LETA após o tratamento térmico?
3. Quais impactos ambientais estão associados ao tratamento térmico do LETA?;
4. Quais aplicações e vantagens do LETA após o tratamento térmico?

A busca bibliográfica foi conduzida em três bases: *Web of Science* (WoS), *Scopus* e *Springer*. A definição dessas plataformas considerou sua multidisciplinaridade, bem como a diversidade de periódicos indexados, de modo a minimizar o risco de viés de seleção decorrente da utilização de uma única fonte. Os termos de busca foram estruturados em três grupos temáticos inter-relacionados, correspondentes aos conceitos centrais da pesquisa: (i) LETAs; (ii) processos de tratamento térmico; e (iii) impactos ambientais associados, incluindo emissões atmosféricas. Os termos foram combinados por meio de operadores booleanos (AND e OR), com variações terminológicas em língua inglesa para assegurar a abrangência.

A estratégia de busca foi adaptada às especificidades técnicas de cada plataforma, preservando-se, em todas elas, a equivalência conceitual dos termos empregados. Nas bases *Web of Science* e *Scopus*, foram aplicados operadores de exclusão, NOT e AND NOT, respectivamente, para delimitar o escopo temático dos resultados e aprimorar a precisão da busca, excluindo estudos centrados em lodo de esgoto (*sewage sludge*) ou águas residuárias (*wastewater*). Adicionalmente, nestas duas bases, a busca foi restrita a artigos de acesso aberto.

Na base Springer, a aplicação de operadores de exclusão foi suprimida. Diferentemente das demais plataformas, a Springer realiza a varredura dos termos em todo o conteúdo do documento, de modo que o uso do operador NOT resultaria na exclusão indevida de artigos relevantes que apenas mencionam os termos excluídos em contextos secundários. Para compensar essa limitação, foram aplicados filtros disponíveis na interface da plataforma referentes ao tipo de documento (*Article*) e à área temática (*Environment; Environment general; Environmental impact*), garantindo coerência temática com os critérios adotados nas demais bases. Cabe destacar que a adaptação da sintaxe de busca às particularidades de cada plataforma é reconhecida no estudo de Bramer *et al.* (2018).

Para a sistematização dos dados, os 10 artigos selecionados foram submetidos à leitura integral e tiveram suas informações organizadas em uma planilha estruturada. Os dados foram divididos em dois blocos: o primeiro reuniu os metadados bibliográficos (autores, ano, periódico, DOI, base de origem, palavras-chave e resumo), enquanto o segundo contemplou as variáveis temáticas extraídas dos artigos, abrangendo as quatro perguntas de pesquisa e variáveis descritivas complementares, como tipo de lodo, país, condições experimentais, equipamentos e escala do estudo. Essa estrutura permitiu a comparação sistemática entre os estudos.

Para a compilação dos dados (geração das imagens da seção 3 deste artigo), utilizou-se o *software* R (versão 4.4.2). Para o suporte do estudo, como melhor estruturação de planilhas, eventuais correções em scripts e correções gramaticais do texto, utilizou-se a ferramenta de inteligência artificial Claude (versão *Opus* 4.7).

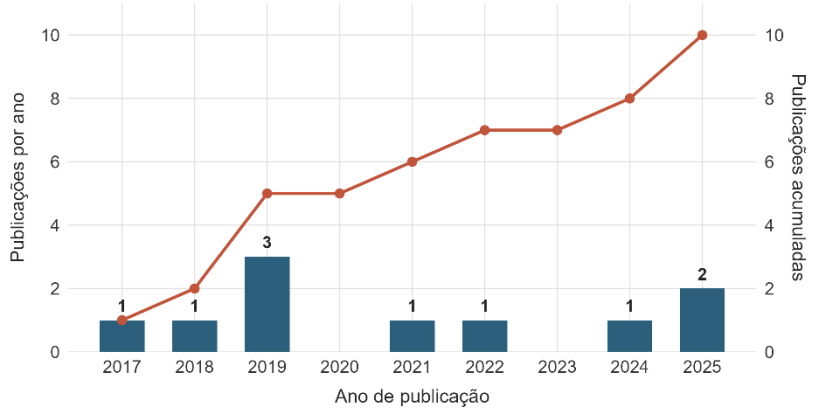
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análises bibliométricas

O conjunto de artigos analisados final, utilizando o MPA, resultou em dez artigos publicados entre 2017 e 2025, incluindo os critérios de inclusão estabelecidos na metodologia do presente estudo. O número de artigos selecionados reflete a delimitação metodológica aplicada, que excluiu publicações dedicadas a lodos de estações de tratamento de esgotos. A distribuição dos trabalhos por base de dados demonstrou que a *Web of Science* respondeu por 60% das publicações selecionadas, seguida por *Scopus* (30%) e *Springer* (10%).

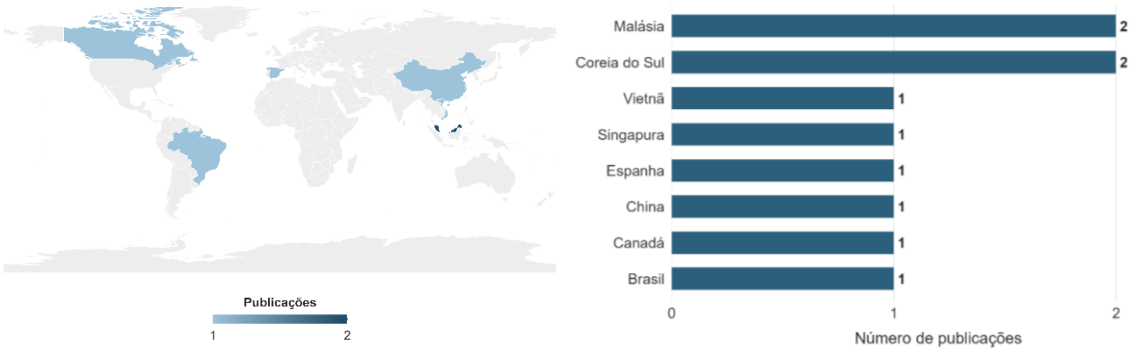
A Figura 02 demonstra a distribuição temporal das publicações, com ausência de publicações nos anos de 2020 e 2023. Considerando-se o acúmulo de estudos, percebe-se uma produção contínua, ainda que discreta, ao longo da janela analisada, com o maior número de publicações nos anos de 2019 e 2025. Quanto à origem geográfica (Figura 03), são representados 8 países, com maior concentração na Ásia (Malásia, Coreia do Sul, Vietnã, Cingapura e China). A análise das palavras-chave declaradas pelos autores (Figura 04) revela os eixos estruturantes do campo.

Figura 02: Distribuição temporal das publicações.



Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 03: Distribuição geográfica das publicações.



Fonte: Autoria própria (2026).

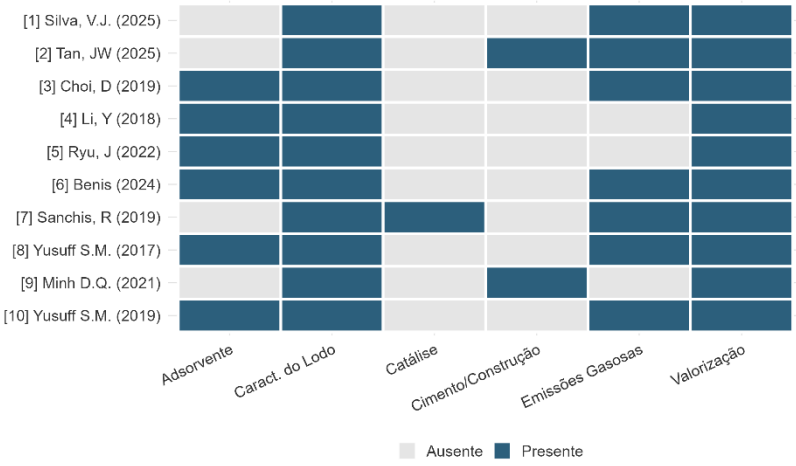
Figura 04: Matriz de co-ocorrência das palavras-chave.



Fonte: Autoria própria (2026).

O termo guarda-chuva "*drinking water sludge*" (que reúne as variações declaradas pelos autores - *drinking water treatment sludge, drinking water treatment residuals, drinking water treatment plant sludge, alum sludge, aluminium-based sludge, PAC sludge, water supply plant sludge, waste sludge, thermally treated sludge* e *sludge)*, aparece em nove dos dez artigos selecionados, confirmando a centralidade do LETA como objeto material da literatura analisada. Em seguida, "*adsorption*" aparece em seis artigos e "*thermal treatment*" e "*carbon dioxide*" em três cada. O par mais forte é "*drinking water sludge* × *adsorption*", com cinco co-ocorrências. Para completar a análise das palavras-chave, classificou-se cada artigo segundo seis eixos definidos a partir da leitura integral dos textos, os quais estão expostos na Figura 05.

Figura 05: Cobertura temática da base de estudos selecionados.



Fonte: Autoria própria (2026).

Os eixos de Caracterização do Lodo e de Valorização são recorrentes em todos os trabalhos, demonstrando que não há discussões de usos benéficos e economia circular sem ancoragem nas características físico-químicas do material. Emissões Gasosas é um eixo heterogêneo, sendo evidente tanto em estudos centrados no monitoramento direto de poluentes (Silva *et al.*, 2025) quanto em trabalhos que empregam CO_2 como gás reativo de pirólise (Choi *et al.*, 2019), em análises de custo e de CO_2 incorporado (Tan et al., 2025) ou em estudos catalíticos de oxidação de compostos orgânicos voláteis - COVs (Sanchis *et al.,* 2019).

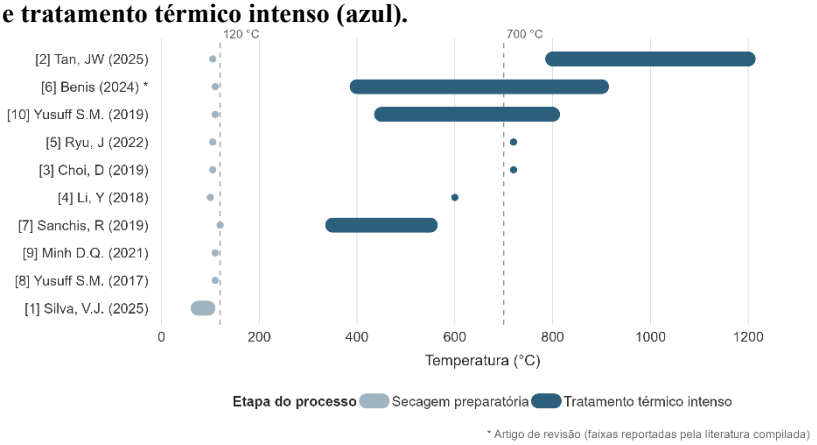
Quanto aos tipos de LETAs, determinados pelos coagulantes utilizados nas ETAs, cinco artigos trabalham com LETAs de base alumínica (Choi *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2018; Ryu *et al.*, 2022; Yusuff *et al.*, 2017; Yusuff *et al.*, 2019), dois com LETAs sem especificação do coagulante (Silva *et al.*, 2025; Minh *et al.*, 2021), um com lodo ferroso (Sanchis *et al.*, 2019), um com mistura de LETA alumínico e resíduo de carbeto de cálcio

(Tan *et al*., 2025) e um artigo de revisão que abrange residuais de base de alumínio, de ferro e de cal (Benis, 2024).

4.2 Definição operacional de tratamento térmico de LETAs

É revelado pelo conjunto de artigos selecionados que o termo "tratamento térmico de LETAs" não demonstra um único tipo de processo, mas sim diferentes níveis de aplicação térmica, definidos por diferentes faixas de temperatura, como observado na Figura 06.

Figura 06: Faixas de temperaturas aplicadas pelos estudos, diferenciando a etapa preparatória de secagem (cinza) e tratamento térmico intenso (azul).



Fonte: Autoria própria (2026).

Pelo observado, pode-se definir três níveis de aplicação térmica. Em sentido inicial, a secagem refere-se à redução de umidade e consequentemente de volume, tipicamente entre 75ºC e 120 ºC. Silva *et al*. (2025) aplicam micro-ondas a 800 W por 20 min e a taxa de evaporação é constatada em 74% ao final dos 20 min de secagem (200 g de lodo desaguado, 800 W, 100% de potência), sem promover transformações químicas relevantes. Os estudos de Yusuff *et al.* (2017) e Minh *et al*. (2021) empregam estufa a 110 ºC por 24h, com o mesmo objetivo. Em sentido intermediário, é utilizado o termo pirólise em temperaturas moderadas, na faixa de 400 ºC a 700 ºC, na qual a persa de massa de LETA de base alumínica é denominada por Choi *et al*. (2019) como a desidratação progressiva do $Al(OH)_3$ e pela volatização da fração orgânica. Além do estudo citado, Li *et al*. (2018), Ryu *et al*. (2022) e Sanchis *et al*. (2019) operam nessa faixa, este último expondo LETA ferroso a 350 °C e 550 °C para estabilização dos óxidos.

O termo calcinação é considerado em altas temperaturas (> 700ºC), ultrapassando o patamar de desidratação e promovendo transformações cristaloquímicas. Tan *et al*. (2025) trabalham entre 800 ºC e 1200 ºC, induzindo a formação de fases amorfas reativas por co-calcinação. Quanto aos equipamentos de aplicação de calor, os seguintes tomam destaque: estufa elétrica por convecção, comumente utilizada para as etapas preparatórias de secagem térmica; tratamento por micro-ondas, utilizado inteiramente no estudo de Silva *et al.* 2025 e parcialmente por Minh *et al*. (2021); e fornos tubulares e mufla para pirólise e calcinação. A escolha das tecnologias e temperaturas atuam conjuntamente no tipo de transformação estrutural observada, implicando tanto no perfil de emissões quanto nas possíveis aplicações do material.

4.3 Alterações na estrutura dos LETAs após tratamento térmico

As alterações estruturais ocasionadas pelos processos de secagem e tratamento térmicos ocorrem em escalas física, química, mineralógica e biológica. No que diz respeito ao plano físico, a redução da umidade é acompanhada por alterações na porosidade e na área superficial. No estudo de Benis *et al*. (2024) o comportamento é sistematizado em LETA de alumínio, onde a área superficial pode crescer em até doze vezes na transição da secagem para calcinação, associada à degradação da matéria orgânica entre 200 °C e 600 °C. Em estudos compilados pela mesma revisão, a área superficial aumenta de 8,8 m^2/g para 93,6 m^2/g a 500 °C e 122,7 m^2/g a 700 °C. Acima dessa temperatura a área superficial decresce devido à recristalização das fases amorfas, atingindo valores de 69,0 m^2/g a 900 °C. Dessa forma, foi definido pelo autor a faixa ótima entre 400-600 ºC para aplicações em adsorção.

Quanto ao plano químico, a desidratação do hidróxido de alumínio em LETAs de bases alumínicas atinge taxa de conversão próxima a 260 ºC, sendo a volatização da fração orgânica predominante identificada acima de 310 ºC, causando enriquecimento da matriz de Al_2O_3, de acordo com Choi *et al.* (2019). Um outro fenômeno identificado foi a transformação de fases cristalinas em função da temperatura, descrito por Benis (2024): o Al_2O_3 amorfo começa a cristalizar a partir de 500 °C, a boemita (AlOOH) forma-se por volta de 600 °C e desaparece a 700 °C, convertendo-se nos polimorfos θ-, γ- e δ-alumina, enquanto a α-Al_2O_3 surge a 900 °C, acompanhada de queda da área superficial. Nesse conjunto, a fase γ-Al_2O_3, predominante no material tratado a 550 °C, apresenta capacidade adsortiva de fosfato superior à da boemita.

Esse fator apresentado anteriormente demonstra o motivo de as calcinações favorecerem as aplicações cimentícias, conforme descrito por Tan *et al*. (2025). O último fenômeno identificado foi o enriquecimento relativo em metais e a redução de matéria orgânica, como demonstrado por Choi *et al*. (2019), onde a fração de massa residual após 720 ºC ultrapassa 60%, expondo sítios ativos antes inexistentes pela fração orgânica. Com relação a LETAs de base ferrosa, Sanchis *et al*. (2019) descrevem o lodo como um sólido do tipo argila formado majoritariamente por montmorilonita, com óxidos de ferro e substâncias húmicas (além de nontronita 5A, quartzo e calcita em menor proporção), pontuando que o tratamento térmico a 350-550 °C estabiliza os óxidos e reduz a área superficial de 66 m²/g, no lodo apenas seco a 120 °C, para 65 m²/g a 350 °C e 43 m²/g a 550 °C, com aumento do diâmetro médio de poros de 7,1 para 9,5 nm.

No plano mineralógico, Tan *et al*. (2025) demonstram que a temperatura ótima para geração de fases reativas na co-calcinação de LETA com resíduo de carboneto de cálcio (CCR) é entre 1000-1100 ºC. O resultado da pesquisa demonstra que o LETA calcinado isoladamente tende a formar uma fase inerte, enquanto a co-calcinação captura o alumínio em fases amorfas reativas. Substituindo-se 10% de cimento *Portland* pela mistura LETA-CCR calcinada demonstrou aumento na resistência à compressão.

Por último, no plano biológico, o estudo de Silva *et al*. (2025) demonstra que a secagem por micro-ondas inativa microrganismos potencialmente patogênicos tanto pelo efeito térmico, com o rompimento das células, quanto pelo efeito não térmico, com desestabilização da membrana celular. Na mesma pesquisa foi identificada a redução de ecotoxicidade após aplicação de calor: ensaios com *Daphnia magna* mostraram aumento da diluição efetiva (ED50) de 15,0% (lodo úmido) para mais de 100% (lodo seco), e ensaios com *Aliivibrio fischeri* evoluíram de 71,1% para mais de 80%, atribuída à degradação térmica de compostos orgânicos tóxicos sem volatilização para a atmosfera.

4.4 Impactos ambientais do tratamento térmico

O estudo de Silva *et al*. (2025) demonstrou resultados referentes à emissões atmosféricas. Foram monitorados CO, CO_2, NO_2, SO_2, COVs e material particulado (PM_{10} e $PM_{2,5}$) durante a secagem por micro-ondas. As concentrações médias de CO e CO_2 foram 2,88 ppm e 22,28 ppm, respectivamente; SO_2, NO_2 e COVs ficaram abaixo dos limites de detecção; PM_{10} e $PM_{2,5}$ apresentaram médias de 5,38 µg/m³ e 3,72 µg/m³. A ausência de SO_2 e NO_2 na saída foi associada à dissolução desses óxidos no vapor d'água condensado de pH ácido; picos de CO após 14 min foram atribuídos a combustão anóxica parcial da matéria orgânica residual, indicando que o tempo ótimo de secagem deve respeitar o regime de taxa de secagem constante (aproximadamente os primeiros 10 min no equipamento ensaiado). No estudo de Choi *et al*. (2019), os efluentes gasosos da pirólise em CO_2 e N_2 demonstraram em sua caracterização que a atmosfera de CO_2 causa maior geração de CO via reação de *Boudouard* acima de 700 ºC. O autor cita a oportunidade de aproveitamento sinérgico, porém demanda uma análise de ciclo de vida aprofundada.

Quanto ao consumo energético, Tan *et al*. (2025) reportam redução de 64,2% no custo total de produção e diminuição na intensidade de CO_2 por unidade produzida quando comparada a mistura LETA-CCR calcinada com o cimento Portland, considerando o cenário regulatório de Singapura de taxação de carbono (S$ 50-80 por tonelada de CO_2 equivalente até 2030). Já no cenário brasileiro, Silva *et al*. (2025) estimam que, na comparação entre o tratamento térmico por micro-ondas e a disposição em aterros, a competitividade econômica exigiria custo energético inferior a US$ 0,042/kWh, sendo mais viável em cenários de geração solar ou aproveitamento de calor residual.

Ao comparar equipamentos, Minh *et al*. (2021) compararam a cura de geopolímeros de LETA por micro-ondas e por estufa convencional, sendo 112 W por 30 s e 110 ºC por 24h, respectivamente. Os resultados demonstram que, apesar da secagem por micro-ondas ser mais rápida e energicamente mais favorável que a estufa, as propriedades de resistência não são preservadas em todas as aplicações. A principal lacuna da base de

estudos selecionados reside na ausência de avaliações em escala real, integrando uma análise de ciclo de vida completa, com emissões, consumo energético, transporte e destinação final.

4.5 Usos benéficos após tratamento térmico

Como identificado na Figura 05, o eixo de valorização está presente em praticamente todos os artigos analisados, sugerindo que o tratamento térmico é utilizado para diferentes usos benéficos. A partir do suposto, quatro tipos de aplicação foram identificados.

O primeiro e dominante é a utilização do LETA como adsorvente, identificado em seis artigos (Benis, 2024; Choi *et al*., 2019; Li *et al*., 2018; Ryu *et al*., 2022; Yusuff *et al*., 2017; Yusuff *et al*., 2019), com duas frentes principais: contaminantes em fase aquosa e em fase gasosa. Para contaminantes aquosos, Choi *et al*. (2019) constataram afinidade do biochar pelo As(V), com cinética de pseudo-segunda ordem e isoterma de *Freundlich*. Ryu *et al*. (2022) estenderam essa abordagem à remediação de arsênio metilado (DMA) em *wetlands* artificiais, sendo o único estudo do conjunto a ultrapassar a escala laboratorial: os autores reportaram remoção de aproximadamente 30% em microcosmos e redução de cerca de 19% do arsênio total imobilizado no sedimento em experimento de campo.

Já no estudo de Li *et al*. (2018) o LETA foi aplicado à remoção de fluoreto, obtendo-se 81,15% de remoção em condições otimizadas (14,10 g/L, pH 6,12), com isoterma de *Langmuir* e cinética de pseudo-primeira ordem. Cabe destacar que o material de melhor desempenho nesse estudo foi o lodo acidificado com HCl: entre as rotas testadas, a pirólise a 600 °C reduziu ligeiramente a remoção de fluoreto e a oxidação térmica a melhorou apenas de forma discreta. É o único caso do conjunto em que o tratamento térmico foi superado por uma rota de ativação química, indicando que o aquecimento não é universalmente a melhor via de ativação do LETA e que a escolha depende do contaminante-alvo. Os autores citam que a presença de ânions coexistentes, como silicato e fosfato, reduz a eficiência em águas reais.

Para contaminantes em fase gasosa, com foco em CO_2, Yusuff *et al*. (2017) reportaram capacidade máxima de adsorção de 32,56 mg/g em coluna de leito fixo, atribuída à quimissorção promovida pelo hidróxido de alumínio. Em estudo de mesma autoria, Yusuff *et al*. (2019) atingiram capacidade de 10,028 mmol/g (aproximadamente 441,24 mg/g), com índice de adsorção acima de 96 % após dez ciclos de adsorção-dessorção, demonstrando a regenerabilidade do material, demonstrando a regenerabilidade do material.

O segundo tipo de aplicação compreende materiais cimentícios e geopoliméricos. No estudo de Tan *et al*. (2025), a substituição de 10% do cimento *Portland* pela mistura LETA-CCR calcinada resultou em redução do volume de poros maiores que 100 nm e formação de etringita e géis C-A-S-H, microestrutura responsável pelo ganho de resistência mecânica observado. Minh *et al*. (2021) seguiram outra rota: geopolimerização do LETA com cinza ativada por NaOH e silicato de sódio, sendo a proporção ótima de 40% de cinza volante, com resistência máxima alcançada após cura em estufa.

O terceiro tipo refere-se a aplicações catalíticas, abordadas exclusivamente por Sanchis *et al*. (2019). Os autores demonstraram que o LETA ferroso atua como catalisador para a oxidação total de tolueno e propano, apresentando atividade catalítica uma ordem de grandeza superior à do óxido de ferro comercial, comportamento atribuído à composição multi metálica do lodo. O material também atuou eficientemente como suporte para platina, com o catalisador Pt/LETA superando o Pt/γ-alumina comercial, indicando seu uso como suporte de menor custo para metais nobres em aplicações industriais.

Por último, o quarto grupo reúne aplicações exploratórias identificadas na revisão de Benis *et al*. (2024), como a recuperação de coagulantes por lixiviação ácida, o uso em *wetlands* construídos e a incorporação em produtos cerâmicos sem necessidade de calcinação intensa. Apesar de não estarem representadas por estudos individuais do corpus, essas rotas demonstram a amplitude do espectro de usos benéficos dos LETA. A síntese comparativa entre os tipos de LETA, as soluções térmicas empregadas e os resultados obtidos em cada estudo é apresentada na Tabela 01.

Tabela 01: Síntese comparativa entre tipo de LETAs, tratamento térmico aplicado, alterações no material, impactos ambientais e usos benéficos.

Estudo	Tipo de LETA e materiais associados	Tratamento térmico (condições e equipamento)	Alterações físico-químicas	Impactos ambientais	Usos benéficos
Benis (2024)	Múltiplos (revisão)	Secagem preparatória abaixo de 110 °C e calcinação/pirólise entre 400 °C e 900 °C; estufas, forno mufla e reatores de pirólise.	Área superficial de 8,8 para 93,6 m^2/g (500 °C) e 122,7 m^2/g (700 °C), com queda a 69,0 m^2/g (900 °C) por recristalização; Al_2O_3 amorfo → boemita (~600 °C) → θ-/γ-/δ-alumina (700 °C) → α-Al_2O_3 (900 °C); massa residual de 44,5% para 2,34% até 900 °C.	Elevado consumo energético e uso de reagentes onerosos nas rotas de modificação; mitigação da poluição secundária pela decomposição da carga orgânica.	Faixa ótima de 400–600 °C para adsorção de fosfato, arsênio, metais, corantes e fármacos; recuperação de coagulantes por lixiviação ácida, wetlands construídos e produtos cerâmicos sem calcinação intensa.
Choi *et al.* (2019)	LETA Al (21,5% Al; 1,2% Fe por ICP-OES), pirolisado sob atmosfera reativa de CO_2, comparada a N_2.	Secagem a 105 °C por 24 h e pirólise até 720 °C, a 10 °C/min, em reator tubular de leito fixo de quartzo.	Volatilização da fração orgânica acima de 310 °C e desidratação do $Al(OH)_3$ em Al_2O_3 com taxa máxima a ~260 °C; massa residual superior a 60% após 720 °C, com exposição de sítios ativos; estrutura semelhante a colmeia após a adsorção de As(V).	Maior geração de CO em atmosfera de CO_2 pela reação de Boudouard acima de 700 °C; os autores apontam a necessidade de ACV para validar o aproveitamento sinérgico.	Biochar adsorvente de As(V), com cinética de pseudo-segunda ordem e isoterma de Freundlich; recuperação energética, sanitização e imobilização de metais.
Li *et al.* (2018)	LETA de base Al (PAC, sulfato de alumínio e $FeCl_3$; 47,56% Al_2O_3, 28,54% SiO_2 e 4,30% Fe_2O_3), modificado quimicamente com HCl.	Pirólise a 873 K (≈600 °C) por 60 min e oxidação a 873 K por 6 h; secagem final a ≈100 °C. Forno de pirólise e forno mufla.	Área superficial ampliada em 6,82 vezes e volume de poros em 7,93 vezes no lodo acidificado com HCl (HWS), com diâmetro médio de poros reduzido de 8,88 para 3,23 nm; DRX indica SiO_2, Al_2SiO_5 e silicatos de Mg e Fe, sem alteração estrutural após a adsorção.	Não avaliados.	Adsorvente de fluoreto: 81,15% de remoção em condições otimizadas (14,10 g/L; pH 6,12), com isoterma de Langmuir e cinética de pseudo-primeira ordem.
Minh *et al.* (2021)	Mistura: LETA sem especificação do coagulante + cinza volante (proporção ótima de 40%), ativados por NaOH e silicato de sódio.	Cura em estufa a 110 °C por 24 h *versus* cura em micro-ondas a 112 W por 30 s.	Dissolução das partículas esféricas de cinza volante e formação de matriz geopolimérica amorfa (banda entre 990 e 1090 cm^{-1}); redução dos picos de caulinita, quartzo e mulita, indicando reação com o ativador.	Cura por micro-ondas mais rápida e energeticamente favorável, porém com menor densidade e menor resistência mecânica.	Geopolímeros com resistência à compressão de até 20 MPa (cura em estufa) e 15 MPa (cura em micro-ondas), com proporção ótima de 40% de cinza volante.

Ryu *et al.* (2022)	LETA Al (PAC), sem aditivos.	Secagem a 105 °C por 24 h e pirólise de 30 a 720 °C, a 10 °C/min, em reator tubular de quartzo.	Conversão de hidróxidos de Al e caulinita em muscovita, ilita e quartzo acima de 600 °C; estrutura mesoporosa com 112,5–123,2 m^2/g e poros de 5,5–5,7 nm; massa residual a 600 °C de 59,2% em N_2 contra 79,7% em CO_2.	Sanitização por destruição de poluentes orgânicos e imobilização de metais e metalóides; geração de singás com potencial de aproveitamento energético. Único estudo com validação em escala de campo.	Remediação de *wetlands*: cerca de 30% de remoção de DMA em microcosmos e cerca de 19% de redução do arsênio total imobilizado no sedimento em campo.
Sanchis *et al.* (2019)	LETA Fe (coagulação com $FeCl_3$); também empregado como suporte impregnado com platina (Pt/LETA).	Secagem a 120 °C por 12 h e calcinação a 350 °C ou 550 °C; calcinação final do catalisador de Pt a 550 °C por 6 h.	Aumento do diâmetro médio de poros, de 7,1 para 9,5 nm, acompanhado de redução da área superficial, de 66 m^2/g (material seco) para 65 m^2/g (350 °C) e 43 m^2/g (550 °C); ferro estabilizado como Fe(III) e manganês em estados II, III e IV.	Desativação por sinterização apenas no material calcinado a 350 °C, durante a oxidação de propano; o calcinado a 550 °C, adotado pelos autores para o estudo completo, mantém conversão estável em três ciclos consecutivos e por pelo menos 25 h em operação contínua; benefício ambiental indireto pela oxidação total de COVs.	Catalisador para oxidação total de tolueno e propano, com atividade uma ordem de grandeza superior à do óxido de ferro comercial; suporte de baixo custo para platina, superando o Pt/γ-alumina comercial.
Silva *et al.* (2025)	LETA sem especificação do coagulante (lodo desaguado com 12% de sólidos e 88% de umidade).	Secagem por micro-ondas a 800 W por 20 min.	Taxa de evaporação de 74% ao final dos 20 min, com eficiência de 0,6 kg de água evaporada por kWh; sanitização confirmada por análises microbiológicas e parasitológicas, com inativação de patógenos por efeito térmico (rompimento celular) e não térmico (desestabilização de membrana).	CO 2,88 ppm e CO_2 22,28 ppm; SO_2, NO_2 e COVs abaixo do limite de detecção; PM_{10} 5,38 µg/m³ e $PM_{2,5}$ 3,72 µg/m³; acidificação do condensado; ED50 (*D. magna*) de 15,0% para >100% e *A. fischeri* de 71,1% para >80%; viabilidade condicionada a energía inferior a US$ 0,042/kWh.	Usos posteriores apontados na literatura (cerâmicas, tijolos, cimento, adsorvente, biocombustível e condicionador de solo), sem ensaio de aplicação no estudo.
Tan *et al.* (2025)	Mistura: LETA (coagulante não especificado pelos autores) + resíduo de carbeto de cálcio (CCR), co-calcinados; aplicados em substituição a 10% do cimento Portland.	Secagem a 105 °C por 96 h e co-calcinação a 800, 900, 1000, 1100 e 1200 °C, por 0,5 a 1,5 h. Temperatura ótima de 1000–1100 °C. Estufa e forno de laboratório.	Desidroxilação da caulinita, com conversão de fases cristalinas em fases amorfas reativas ricas em cálcio, notadamente silicato dicálcico (C_2S) e aluminato dodecacálcico ($C_{12}A_7$); na matriz cimentícia, redução do volume de poros maiores que 100 nm e formação de etringita e géis C-A-S-H.	Emissão de CO_2 pela decomposição de carbonatos e consumo elétrico, compensados pela menor intensidade de carbono da mistura final, sob o cenário de taxação de carbono de Singapura (S$ 50-80 por t CO_2 eq. até 2030).	Substituição parcial do cimento Portland, com ganho de resistência à compressão de até 10,6% e redução de custo de aproximadamente 64,2% em relação ao cimento comum.

Yusuff *et al*. (2017)	LETA Al, sem aditivos (27,62% Al; 28,74% O; 28,17% Si; 9,48% Fe; 5,98% K, por SEM-EDX).	Secagem em estufa a 110 °C por 24 h; leito de adsorção aquecido a 100 °C por 30 min sob fluxo de hélio.	Termodessorção da água fisicamente adsorvida e conversão dos hidróxidos de Al, Fe, Si e K nos respectivos óxidos; condensação de silanol acima de 300 °C. FTIR identifica caulinita, quartzo e ocre vermelho.	Não foram avaliados.	Adsorvente de CO_2 em coluna de leito fixo: capacidade máxima de 32,56 mg/g (0,740 mmol/g), a 303 K, vazão de 60 mL/min e dosagem de 20 g. Processo exotérmico, favorecido a baixas temperaturas.
Yusuff *et al*. (2019)	LETA Al, sem aditivos.	Tratamento térmico a 100, 450 e 800 °C por 7 h em forno mufla; granulometrias de 100-150, 250-300 e 450-500 µm; dessorção a 100 °C sob N_2 a 1,0 L/min.	FTIR do material tratado a 800 °C indica sílica (bandas em 1041, 792 e 414 cm^{-1}) e caulim; DRX com valores baixos de largura a meia altura (FWHM ≤ 0,305) confirma estrutura cristalina. Área superficial e porosidade não foram medidas neste estudo.	Não foram avaliados.	Adsorvente de CO_2 em coluna de leito fixo: capacidade máxima de 10,028 mmol/g (441,24 mg/g) com 1 g de material tratado a 800 °C, 450-500 µm, CO_2 a 8000 mg/L, 90 mL/min e 25 °C, otimizada por Metodologia de Superfície de Resposta (delineamento composto central de face centrada, 49 ensaios); índice de adsorção acima de 96,8% ao longo de dez ciclos de adsorção-dessorção.

Fonte: Autoria própria (2026).

5. CONCLUSÃO

Foram analisados para o presente estudo dez artigos publicados entre 2017 e 2025 sobre o tratamento térmico de LETAs, organizados em quatro eixos analíticos correspondentes às perguntas de pesquisa estabelecidas:

1. A faixa de temperatura é separada em três níveis de aplicação: secagem (75-120 ºC), pirólise (400-700 ºC) e calcinação (acima de 700 ºC);
2. As alterações físico-químicas ocorrem em escala física, química, mineralógica e biológica;
3. Evidências limitadas sobre emissões gasosas, restritas a experimentos de bancada, com destaque para CO, CO_2 e material particulado;
4. Quatro tipos principais de usos benéficos, sendo eles adsorventes, materiais cimentícios e geopoliméricos, catalisadores e aplicações exploratórias.

Quanto ao desempenho do processo, cada faixa de temperatura entrega um benefício distinto. Até 120 ºC, há a redução de umidade e volume, e a inativação de microrganismos patogênicos, com desintoxicação do material comprovada por análises de ecotoxicologia. Entre 400 e 700 ºC, a degradação da matéria orgânica aumenta a área superficial, convergindo os estudos para a faixa de 400 a 600 ºC para uso adsortivo. Acima de 700 ºC, a recristalização reverte esse ganho, porém gera fases reativas que viabilizam usos cimentícios. Esses diferentes achados demonstram que não existe uma temperatura ótima única, e sim uma faixa ótima definida pelo objetivo/uso pretendido.

Quanto à avaliação ambiental do processo, apenas um dos dez estudos monitorou emissões atmosféricas, e o fez em escala de bancada, registrando concentrações baixas de CO e CO_2 e valores abaixo do limite de detecção para SO_2, NO_2 e COVs, com formação de CO condicionada ao prolongamento do tempo de operação. Outros dois trabalhos abordam o balanço energético, ambos de forma condicional: a viabilidade econômica frente ao aterro depende de energia abaixo de US$ 0,042/kWh, e a redução de 64,2% no custo de produção obtida na rota cimentícia está associada a um cenário regulatório específico de taxação de carbono. Os ganhos ambientais e energéticos, portanto, existem e são mensuráveis, mas foram demonstrados em condições pontuais.

Os usos benéficos apontam a adsorção como rota dominante, presente em seis dos dez estudos, e o desempenho escala com a temperatura aplicada: a capacidade de captura de CO_2 cresce mais de treze vezes entre o lodo apenas seco a 110 °C e o calcinado a 800 °C, com regeneração estável ao longo de dez ciclos. Em fase aquosa, o material atua sobre arsênio e fluoreto com eficiências entre 30% e 81%. As rotas de calcinação sustentam aplicações estruturais, com ganho de resistência à compressão em matriz cimentícia e em geopolímeros, enquanto o lodo ferroso se mostrou catalisador de oxidação de COVs mais ativo que o óxido de ferro comercial. Cabe registrar que em um dos estudos a ativação química superou a térmica, demonstrando uma alternativa à rota de ativação do uso como adsorventes.

A partir do levantamento, identificaram-se quatro lacunas. A primeira é a ausência de estudos em escala real: apenas um dos dez trabalhos ultrapassou a bancada. A segunda é a escassez de investigações sistemáticas quanto à temperatura aplicada e ao tempo de detenção, o que dificulta a definição de protocolos reprodutíveis. A terceira é o monitoramento insuficiente de emissões gasosas, restrito a um único estudo, fator que compromete a avaliação ambiental sistêmica da tecnologia e que é particularmente crítico diante da expansão do tratamento térmico como rota de gestão de resíduos (Roy *et al*., 2022). A quarta é a ausência de avaliações de ciclo de vida completas, uma vez que os estudos que tratam de desempenho ambiental se limitam a inventários parciais de CO_2 incorporado e a análises de custo, sem unidade funcional nem fronteiras de sistema definidas.

O tratamento térmico de LETAs constitui, portanto, ferramenta promissora para a valorização deste resíduo no contexto da economia circular, com benefícios demonstrados em redução de volume, sanitização, desintoxicação e geração de materiais funcionais. Sua consolidação depende de estudos aplicados em escala piloto e real, que articulem variáveis operacionais, perfil de emissões e desempenho do produto final, e de avaliações de ciclo de vida que integrem consumo energético, transporte e destinação. O avanço dessa agenda alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 (Água Potável e Saneamento) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao conectar a gestão segura de resíduos de saneamento ao monitoramento das emissões associadas aos seus usos benéficos.

6. AGRADECIMENTOS

O estudo foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processo: 2020/12230-4). A autora agradece também a bolsa de mestrado concedida pela FAPESP (Processo: 2025/26398-8), assim como as bolsas de iniciação científica concedidas às alunas da graduação (FAPESP – Processo: 2025/21562-4 e CNPq – Projeto: 20726/Edital 8/2025).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BENIS, K.Z. *Transforming drinking water treatment residuals into efficient adsorbents: A review of activation and modification methods. Env. Research*, v. 262, ISSN 0013-9351, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119893. Acesso em: 15/05/2026.

2. BERNEGOSSI, A.C., FREITAS, B.L.S., CASTRO, G.B., MARQUES, J.P., TRINDADE, L.F., SILVA, M.R.LL. *A systematic review of the water treatment sludge toxicity to terrestrial and aquatic biota: state of the art and management challenges. Journal of Environmental Science and Health*, Part A, v. 57, p. 282-297, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1080/10934529.2022.2060021. Acesso em: 15/05/2026.

3. BRAMER, W.M. *A systematic approach to searching: an efficient and complete method to develop literature searches. Journal of the Medical Library Association*, 106 (4), 2018. Disponível em: https://doi.org/10.5195/jmla.2018.283. Acesso em: 15/05/2026.

4. CHOI, D., OH, J., LEE, J., PARK, Y., LAM, S.S., KNOW, E.E.. *Valorization of alum sludge via a pyrolysis platform using CO2 as reactive gas medium. Environ. Int*.,v. 132, 105037, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105037. Acesso em: 17/05/2026.

5. FIORE, F.A., RODGHER, S., ITO, C.Y.K., BARDINI, V.S.S., KLINSKY, L.M.G. *Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: experimental study. Cleaner Engineering and Technology*, v. 9 (1), 100512, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100512. Acesso em: 16/05/2026.

6. LI, Y., YANG, S., JIANG, Q., FANG, J., WANG, W., WANG, Y. *The Adsorptive Removal of Fluoride from Aqueous Solution by Modified Sludge: Optimization Using Response Surface Methodology. Int. J. Environ. Res. Public Health*, v. 15(4), 826, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ijerph15040826. Acesso em: 16/05/2026.

7. MESSA, G. N., JESUS, A. M. D., FIORE, F. A. *Beneficial use of sludge from water treatment plants as a multiple resource: Potential and limitations. Resources, Conservation & Recycling Advances*, v. 25. 200247, ISSN 2667-3789, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200247. Acesso em: 20/05/2026.

8. MINH, D. Q., DAT, T.T., THANG, N.H., KIEN, K.D.T., KIEN, P.T., MINH, H.N., NHI, N.V.U. *Treating Waste Sludge from Water-Purification Plants with the Geopolymerization Method. Mat. Tech.*, v. 55(5), 2021. Disponível em: http://doi.org/10.17222/MIT.2020.070. Acesso em: 13/05/2026.

9. NAÇÕES UNIDAS. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: https://sdgs.un.org/goals. Acesso em: 23/05/2026.

10. NAIR, A.T., AHAMMED, M.M.. *The reuse of water treatment sludge as a coagulant for post-treatment of UASB reactor treating urban wastewater. J. Clean. Prod*., v. 96, p. 272-281, 2015. Disponível em: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.037. Acesso em: 13/05/2026.

11. ROY, H., ALAM, S.R., BIN-MASUD, R., PRANTIKA, T.R., PERVEZ, M.N., ISLAM, M.S., NADDEO,V. *A Review on Characteristics, Techniques, and Waste-to-Energy Aspects of Municipal Solid Waste Management: Bangladesh Perspective. Sustainability*, v. 14(16), 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su141610265. Acesso em: 21/05/2026.

12. RYU, J., HAN. Y., CHO, D., KIM, S., CHO, Y., CHON, C., AHN, J.S., NAM, I. *Practical application of PAC sludge-valorized biochars to the mitigation of methyl arsenic in wetlands. Chem. Eng. J.*, v. 450, 138148, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138148. Acesso em: 19/05/2026.

13. SANCHIS, R., DEJOZ, A., VÁSQUEZ, I., VILARRASA-GARCÍA, E., JIMÉNEZ-JIMENÉZ, J., RODRÍGUEZ-CASTELLÓN, E., NIETO, J. M. L., SOLSONA, B. *Ferric sludge derived from the process of water purification as an efficient catalyst and/or support for the removal of volatile organic compounds. Chemosphere,* v. 219, p. 286-295, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.002. Acesso em: 17/05/2026.

14. SEARCY, D., MENTZER, J.T. *A framework for conducting and evaluating research. J. Account. Literat.* v. 22, p. 130–167, 2003.

15. SILVA, V.J., SOMENSI, C.A., SALGADO-ALVES, L.M., TAGLIARI-CORRÊA, C.V., ROSSA, U.B., POYER-RADETSKI, M., CASSINI, F.A., COELHO-MACHADO, B., RADETSKI, C.M., COTELLE, S. *Use of microwaves to dry sludge from drinking water treatment plants (DWTPs): gas emission and chemical/microbiological/ecotoxicological characteristics of sludge extracts. Environ. Sci. Pollut. Researc*h, v. 32, p. 17968-17977, 2025. Disponível em: http://doi.org/10.1007/s11356-025-36714-8. Acesso em: 20/05/2026.

16. TAN, J., XU, B., YANG, M. YI, Y. *Treatment of drinking water sludge through co-calcination with calcium carbide residue. J. Water Proc. Eng.*, v. 70, 106929, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.106929. Acesso em: 18/05/2026.

17. WAGNER, L.F., WIECHETECK, G.K., SZÉLIGA, M.R. *Evaluation of a sewage treatment plant with anaerobic reactor receiving Actiflo® water treatment plant sludge. Sanitary and Environmental Engineering*, v. 24, p. 709-717, 2019. Disponível em: http://doi.org/10.1590/S1413-41522019145633. Acesso em: 14/05/2026.

18. YUSUFF, S.M., KHIM, O.K., WAN YUNUS, W.M.Z.., RASHID, J.I.A., FITRIANTO, A., AHMAD, M., IBRAHIM, N.A., AHMAD, S.M.S.S., TEOH, C,C. *Thermally Treated Alum Sludge as Novel Adsorbent of Carbon Dioxide (CO2). J. Eng. Ap. Sci.*, v. 14(2), p. 405-414, 2019. Disponível em: http://doi.org/10.36478/jeasci.2019.405.414. Acesso em: 15/05/2026.

19. YUSUFF, S.M., ONG, K.K., WAN YUNUS, W.M.Z., FITRIANTO, A., AHMAD, M., IBRAHIM, N.A., ROS, F.C., TEOH, C.C., TAWIL, S.N.M. *Adsorption of Carbon Dioxide by Reusing Drinking Water Treatment Plant Sludge. Asian J. Chem.*, v. 29(12), 2017. Disponível em: http://doi.org/10.14233/ajchem.2017.20769. Acesso em: 17/05/2026.