

DO PASSIVO URBANO À RESILIÊNCIA AGRÍCOLA: RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO DE LODO DE ESGOTO TROPICAL VIA CARBONIZAÇÃO HIDROTÉRMICA

Junior Diego Becker¹, Marcelo Borges Rocha²

^{1,2}Programa de Pós-Graduação em Energia e Sociedade (PPGES), Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET), Rio de Janeiro, Brasil.
junior.becker@aluno.cefet-rj.br

Resumo: O Brasil importa ~85% dos fertilizantes fosfatados enquanto descarta fósforo no lodo urbano. Este estudo diagnostica barreiras termodinâmicas, estequiométricas e sanitárias em lodo tropical (UASB) e aponta a carbonização hidrotérmica (CHT), aliada à extração ácida e correção com cálcio, como rota tecnicamente coerente para converter esse passivo em biofertilizante seguro, reduzindo a incerteza de decisão e promovendo a resiliência agroambiental.

Palavras-chave: lodo de esgoto; fósforo; carbonização hidrotérmica; saneamento circular; resiliência agroambiental.

INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um nutriente insubstituível para a produção de alimentos; sem ele, não há fertilidade agrícola em escala (Cordell et al., 2009). Mais de 70% das reservas mundiais economicamente exploráveis de rocha fosfatada estão concentradas no Marrocos e no Saara Ocidental (USGS, 2025). O Brasil, como potência agroexportadora, importa aproximadamente 85% dos seus fertilizantes fosfatados, expondo a soberania agroalimentar nacional a choques geopolíticos, volatilidade de preços e vulnerabilidades logísticas que se intensificam com as mudanças climáticas (ANDA, 2025; Brasil, 2023).

Ao mesmo tempo, as cidades brasileiras desperdiçam esse mesmo elemento estratégico diariamente. Estima-se que o país gere cerca de 2,5 milhões de toneladas de lodo de esgoto por ano, das quais aproximadamente 78% são destinadas a aterros sanitários. Essa prática linear gera emissões contínuas de metano (CH₄) e perde permanentemente o fósforo contido (Brasil, 2023; SEEG, 2024). O teor de P no lodo, tipicamente 1–4% em base seca, é comparável ao de rochas fosfatadas de baixo grau exploradas comercialmente, o que o configura como uma autêntica mina urbana potencial (Egle et al., 2016; Zhu et al., 2023).

No entanto, converter o lodo tropical em fertilizante recuperado não é trivial. As ETES brasileiras que operam com reatores UASB, tecnologia dominante no saneamento nacional, produzem um lodo com características distintas do verificado em plantas europeias: maior umidade residual após o

desaguamento mecânico, composição elementar específica e elevadas cargas patogênicas. A literatura atual, predominantemente baseada em contextos temperados, raramente captura essas singularidades de forma integrada (Chrispim et al., 2019). A Figura 1 sintetiza esse paradoxo brasileiro e o caminho circular proposto.



Figura 1. Paradoxo linear do fósforo no Brasil e a proposta de solução circular via CHT.

O presente trabalho contribui de forma interdisciplinar ao articular termodinâmica aplicada, geoquímica, microbiologia ambiental, política de saneamento e economia circular. Nesse contexto, o objetivo principal deste estudo é aplicar um *framework* prospectivo de diagnóstico por barreiras para avaliar o lodo de uma grande ETE tropical como minério urbano de fósforo. Ao identificar rotas tecnologicamente compatíveis (e incompatíveis) com o *feedstock* antes da validação experimental em escala piloto, a pesquisa reduz incertezas de investimento e dialoga diretamente com o desafio da resiliência agroambiental do Brasil contemporâneo.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo utilizou lodo anaeróbico desidratado da Estação de Tratamento de Esgoto Serraria (ETE Serraria), localizada em Porto Alegre/RS (30°01'S, 51°13'W). A unidade atende a ~400.000 habitantes equivalentes, trata 92.900 m³/dia em reatores UASB e produz ~511,6 t/mês de torta desidratada via centrífugas decantadoras. Uma amostra composta representativa foi coletada em janeiro de 2026, conforme a norma ISO 5667-13, e armazenada a 4 °C.

A caracterização físico-química seguiu o *Standard Methods* (APHA, 2017): umidade por gravimetria a 105 °C; sólidos voláteis (SV) por ignição a 550 °C; além de pH e condutividade elétrica em suspensão 1:5 (m/m). Nutrientes e metais foram quantificados por digestão ácida (EPA 3051A), empregando ICP-OES para macronutrientes e ICP-MS para elementos potencialmente tóxicos (EPTs); o mercúrio foi lido por CVAAS (EPA 7471B). O fracionamento do fósforo (inorgânico/orgânico) baseou-se no protocolo SMT (Ruban et al., 2001). O protocolo de Garantia e Controle de Qualidade (QA/QC) incluiu triplicatas analíticas, brancos, duplicatas e material de referência certificado (NIST SRM 2711a), obtendo recuperações de 92–108% e Desvio Padrão Relativo (RSD) <10%.

Para os indicadores microbiológicos, quantificou-se *Escherichia coli* por substrato enzimático (SMWW 9223 B) e ovos de helmintos pelo método SMWW 10750. Os resultados foram confrontados com a Resolução CONAMA nº 498/2020 para Sólidos Totais (ST) (Classe A: <0,25 ovos g⁻¹ ST e <10³ NMP *E. coli* g⁻¹ ST; Classe B: <10 ovos g⁻¹ ST e <10⁶ NMP g⁻¹ ST).

O *framework* de diagnóstico integrou três barreiras restritivas: (i) termodinâmica, com a penalidade de secagem calculada pela entalpia de vaporização da água ($\Delta H_{\text{vap}} = 2.257 \text{ kJ kg}^{-1}$, assumindo eficiência $\eta = 0,70$), expressa em GJ t⁻¹ de lodo úmido (Sarrion et al., 2022); (ii) estequiométrica, avaliando a razão molar Ca:P (via ICP-OES) frente aos limiares da hidroxiapatita (Ca:P = 1,67) e brushita (Ca:P = 1,0); e (iii) sanitária, baseada nos limites normativos supracitados.

Essas barreiras alimentaram uma matriz de seleção construída por comparação qualitativa estruturada. Avaliou-se se cada rota tecnológica candidata era: (a) intrinsecamente compatível; (b) compatível mediante etapa corretiva adicional; ou (c) estruturalmente desfavorável ao *feedstock* analisado. Fundamentada na literatura de recuperação de nutrientes, essa classificação evitou inferências baseadas em preferências tecnológicas, objetivando identificar incompatibilidades a montante de investimentos experimentais em escala piloto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização completa do lodo (Tabela 1) revela um teor de fósforo total de 3,75% em base seca, o que posiciona a ETE Serraria como uma autêntica mina urbana de alto teor, comparável a rochas fosfatadas de baixo grau (Egle et al., 2016). O predomínio da fração inorgânica (85% do P total) é um aspecto favorável, pois indica que o nutriente encontra-se majoritariamente em formas minerais passíveis de dissolução.

Tabela 1. Caracterização físico-química, elementar e microbiológica do lodo ETE Serraria, Janeiro/2026.

Parâmetro	Valor	Unidade
Físico-químicos		
Umidade	70,11 ± 0,42	% (b.u.)
Sólidos totais (ST)	29,89 ± 0,42	% (b.u.)
Sólidos voláteis (SV)	50,23 ± 1,15	% ST
pH	6,82 ± 0,07	—
Condutividade	3,41 ± 0,18	mS cm ⁻¹
Nutrientes e macroelementos		
Fósforo total (P)	3,75 ± 0,11	% ST
Fósforo inorgânico	85% P total	—
Ca:P molar	0,80 ± 0,04	mol mol ⁻¹
Ferro (Fe)	4,62 ± 0,19	% ST
Nitrogênio (NTK)	4,10 ± 0,22	% ST
Microbiológicos		
<i>E. coli</i>	2,3 × 10 ⁴	UFC g ⁻¹ ST
Ovos de helmintos	19,71 ± 2,14	ovos g ⁻¹ ST

Simultaneamente, os Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) permaneceram confortavelmente abaixo dos limites da Classe 1 estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 498/2020 (Tabela 2), eliminando a toxicidade química como barreira ao reuso.

Tabela 2. Elementos potencialmente tóxicos (EPTs). Todos conformes à CONAMA 498/2020 Classe 1. Resultados expressos em (mg kg^{-1} ST).

Elementos	Resultados do Lodo	Limite Máximo CONAMA
Arsênio (As)	4,04	41
Bário (Ba)	202,75	1.300
Cádmio (Cd)	1,11	39
Chumbo (Pb)	92,36	300
Cobre (Cu)	540,95	1.500
Cromo (Cr)	47,54	1.000
Mercúrio (Hg)	0,19	17
Molibdênio (Mo)	8,75	50
Níquel (Ni)	172,02	420
Selênio (Se)	2,56	36

Mais do que caracterizar um resíduo, esses dados evidenciam uma tensão estratégica entre a vulnerabilidade externa do agronegócio e a capacidade interna de regeneração de insumos essenciais. Em contextos de disrupção climática e geopolítica, diagnosticar esse potencial ultrapassa a curiosidade técnico-ambiental, configurando-se como uma premissa de resiliência nacional.

A transição para a economia circular no saneamento exige enxergar as estações de tratamento como autênticas biorrefinarias. O aproveitamento do lodo reduz a pressão sobre as reservas minerais finitas e diminui a emissão de gases de efeito estufa em aterros sanitários. Desse modo, a conversão desse passivo urbano em um biofertilizante seguro representa uma oportunidade ímpar para garantir a estabilidade produtiva e a soberania do agronegócio brasileiro.

Contudo, a valorização direta deste lodo é impedida por três barreiras estruturais interligadas, sintetizadas no *framework* de diagnóstico da Figura 2:

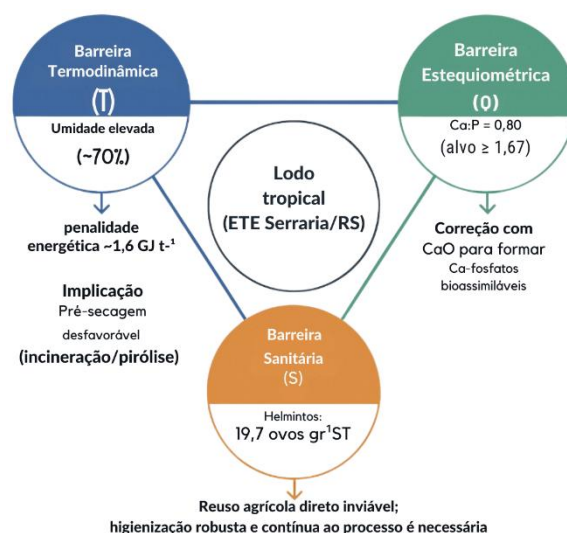


Figura 2. *Framework* de diagnóstico: as três barreiras do lodo tropical e suas implicações tecnológicas.

Barreira termodinâmica (T): A umidade de 70,11% impõe uma severa penalidade de secagem (estimada em $\sim 1,58 \text{ GJ t}^{-1}$ de lodo úmido), tornando o balanço energético de rotas dependentes de pré-secagem (como incineração e pirólise) estruturalmente desfavorável (Sarrion et al., 2022). Essa limitação é intrínseca ao lodo de reatores UASB tropicais, que retêm maior umidade residual após o desaguamento mecânico quando comparados aos lodos de plantas europeias com floculação química avançada (Chrpsim et al., 2019).

Barreira estequiométrica (Q): A razão molar Ca:P de 0,80 encontra-se aquém do limiar mínimo para a precipitação de brushita (1,0) e hidroxiapatita (1,67). A alta concentração de ferro (4,62% em ST) indica que o P inorgânico está fortemente associado a matrizes de Fe/Al, as quais possuem baixa biodisponibilidade agrônoma. A recuperação eficiente exige, portanto, a reengenharia química da especiação mineral, demandando a adição corretiva de $\sim 0,15\text{--}0,20 \text{ kg}$ de CaO por kg de lodo seco para direcionar o fósforo para fases de cálcio.

Barreira sanitária (S): A elevada carga de 19,71 ovos viáveis de helmintos g^{-1} ST excede em quase 80 vezes o limite da Classe A (e supera também a Classe B) da Resolução CONAMA nº 498/2020, inviabilizando qualquer reuso agrícola direto. Considerando o clima tropical e a alta exposição na agricultura familiar brasileira, esse gargalo é uma grave questão de saúde pública (Barros, 2023). Como os ovos resistem a amplas faixas de pH, sua inativação exige um tratamento térmico robusto.

A Figura 3 apresenta a matriz de seleção e a compatibilidade das rotas tecnológicas frente a essas três restrições.

Rota tecnológica	T	Q	S
Incineração	✗	✗	✓
Pirólise	✗	Δ Parcial	✓
Digestão anaeróbia	✓	✗	Δ Parcial
Lixiviação ácida direta	✓	✓	✗
CHT + extração + correção Ca	✓	✓	✓

Figura 3. Matriz de seleção: compatibilidade de rotas tecnológicas com as três barreiras do lodo tropical.

A carbonização hidrotérmica (CHT), integrada à extração ácida e correção estequiométrica com CaO, emerge como a rota mais coerente entre as avaliadas, por apresentar compatibilidade simultânea com as três barreiras diagnosticadas. Operando em água subcrítica (180–260 °C, pressão autógena), a CHT transforma a umidade do lodo de um passivo logístico em insumo reacional, eliminando a necessidade de pré-secagem. A relevância dessa compatibilidade técnica reside em permitir que uma limitação típica do saneamento brasileiro seja convertida em oportunidade de inovação adaptada ao território.

O processo concentra o P no hidrocarvão sólido (>90% de retenção na fase sólida), criando a base para a extração posterior por ácido cítrico, que solubiliza seletivamente o P com mínima coextração de metais pesados (Tasca et al., 2019). A correção com CaO nessa etapa direciona a especiação para Ca-fosfatos bioassimiláveis (Zheng et al., 2020; Wang et al., 2021). Adicionalmente, por operar a temperaturas elevadas, a CHT tende a inativar patógenos termorresistentes, incluindo ovos de helmintos, de forma intrínseca ao processo, embora validação experimental específica seja necessária em escala piloto. Em contraste, rotas como incineração e pirólise exigem a superação prévia da barreira termodinâmica, o que desloca o problema energético para a etapa de secagem e reduz sua atratividade para lodos com alta umidade residual (Castro et al., 2023). Já as rotas baseadas na precipitação direta de Ca-fosfatos enfrentam limitação estequiométrica imediata no material estudado, dado o Ca:P molar abaixo dos limiares de nucleação. Assim, a vantagem da CHT não decorre de superioridade universal, mas de maior compatibilidade específica com as restrições do *feedstock* tropical.

Sob a ótica do nexos Energia e Sociedade, essa inovação aproxima o debate tecnológico das transformações contemporâneas do trabalho e do território. A CHT pode ser implantada em escala descentralizada, próxima a ETes municipais de médio porte, o que reduz substancialmente os custos logísticos de transporte de lodo úmido e mitiga dependências externas. Essa descentralização distingue a CHT de tecnologias que requerem grandes

volumes centralizados, características estruturalmente inadequadas para a heterogeneidade territorial brasileira, criando demanda local por novas competências técnicas em saneamento circular e monitoramento ambiental. Nessa perspectiva, a recuperação de fósforo deixa de ser apenas uma solução de processo e passa a integrar uma agenda de infraestrutura resiliente, qualificação técnica e reorganização territorial da gestão de resíduos.

Do ponto de vista climático e da resiliência, a recuperação de fósforo deixa de ser apenas uma otimização de processo para assumir o papel de política de mitigação. Cada tonelada de lodo desviada de aterros para a CHT representa impactos sistêmicos: a eliminação das emissões diretas de metano (CH₄) associadas à decomposição anaeróbia; a substituição parcial de fertilizantes minerais importados, os quais embutem alta pegada de energia e carbono; e o potencial de estoque de carbono recalcitrante no solo via aplicação do hidrocarvão (SEEG, 2024; Behjat et al., 2024).

É fundamental registrar que este estudo possui escopo diagnóstico e prospectivo, não consistindo em uma validação tecnológica ou agrônômica completa. Atualmente, a rota integrada de CHT, extração ácida e correção com Ca encontra-se em Nível de Maturidade Tecnológica (TRL) 3–4 para o contexto de lodo tropical. A principal contribuição da pesquisa reside, portanto, em reduzir a incerteza de decisão a montante, evidenciando quais restrições físico-químicas e sanitárias tornam determinadas rotas inadequadas ao *feedstock* antes de qualquer dispêndio financeiro em testes avançados. Como etapas subsequentes e necessárias para a consolidação da tecnologia, destacam-se a validação em escala piloto, a avaliação microbiológica pós-processo, a Análise Tecno-Econômica (TEA) e a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) comparativa.

Adicionalmente, projeções de impacto em escala nacional, embora promissoras, devem ser tratadas com cautela. A extrapolação sistêmica desses dados depende criticamente da base adotada para a estimativa de geração de resíduos (massa úmida vs. seca), dos teores regionais de Sólidos Totais (ST), da heterogeneidade de infraestrutura entre as ETes brasileiras e das eficiências reais de processo. Diante dessas variáveis, estudos multi-planta e amostragens multi-sazonais configuram-se como requisitos indispensáveis para uma validação em larga escala adequada (SNIS, 2023).

CONCLUSÃO

O lodo da ETE Serraria constitui uma mina urbana de fósforo de alto teor (3,75% de P em base seca), com Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) conformes à Classe 1 da Resolução CONAMA nº 498/2020. Sua valorização, porém, é governada por três barreiras



interligadas: a termodinâmica (umidade de 70,11% e penalidade de secagem de $\sim 1,58 \text{ GJ t}^{-1}$), que torna o balanço energético de rotas de pré-secagem desfavorável; a estequiométrica (razão molar Ca:P de 0,80), que impede a formação espontânea de Ca-fosfatos bioassimiláveis; e a sanitária (19,71 ovos viáveis de helmintos $\text{g}^{-1} \text{ ST}$), que inviabiliza qualquer reuso agrícola direto.

A principal contribuição deste trabalho é demonstrar que o diagnóstico quantitativo por barreiras permite priorizar rotas tecnológicas mais compatíveis com o *feedstock* antes de investimentos em escala piloto, reduzindo o risco de decisão. Entre as rotas avaliadas, a Carbonização Hidrotérmica (CHT), integrada à extração ácida e à correção com CaO, apresenta a maior coerência técnica para o lodo tropical, por responder simultaneamente às três restrições diagnosticadas.

Em uma perspectiva sistêmica, o estudo evidencia que a viabilidade de recuperar fósforo no Brasil depende menos da replicação de tecnologias consagradas em contextos temperados e mais da capacidade de mensurar e superar as restrições específicas da biomassa tropical. Ao transformar uma escolha tecnológica difusa em uma decisão racional e territorializada, a mineração urbana do lodo deixa de ser apenas uma adequação de saneamento para se consolidar como uma autêntica estratégia de resiliência agroambiental, reduzindo a dependência externa por fertilizantes e contribuindo para as metas climáticas nacionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe técnica da ETE Serraria (DMAE/Porto Alegre) pelo suporte na coleta de amostras e ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sociedade (PPGES/CEFET-RJ) pelo suporte institucional.

REFERÊNCIAS

- ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. Principais indicadores do setor de fertilizantes. São Paulo: ANDA, 2025. Disponível em: <http://anda.org.br/estatisticas/>.
- APHA – American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23. ed. Washington, DC: APHA, 2017.
- BARROS, E. S. Uso agrícola de biossólido gerado a partir de um reator UASB: análise de riscos microbiológicos para trabalhadores rurais. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.
- BEHJAT, M. et al. Environmental assessment of phosphorus recovery from dairy sludge: A

comparative LCA study. *Waste Management*, v. 187, p. 50-60, 2024.

BRASIL. Plano Nacional de Fertilizantes 2050. Brasília, DF: MAPA/MDIC, 2023.

CASTRO, J. S. et al. Life cycle assessment and techno-economic analysis for biofuel and biofertilizer recovery as by-products from microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 187, p. 113781, 2023.

CHRISPIM, M. C.; SCHOLZ, M.; NOLASCO, M. A. Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: critical review of challenges and opportunities for developing countries. *Journal of Environmental Management*, v. 248, p. 109268, 2019.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Critérios para produção e aplicação de biossólido em solos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, v. 19, p. 292–305, 2009.

EGLE, L. et al. Phosphorus recovery from municipal wastewater: an integrated comparative technological, environmental and economic assessment. *Science of the Total Environment*, v. 571, p. 522–542, 2016.

IPCC. Climate change 2023: synthesis report. Geneva: IPCC, 2023.

ISO – International Organization for Standardization. ISO 5667-13: Water quality — Sampling — Part 13: Guidance on sampling of sludges. Geneva: ISO, 2011.

RUBAN, V. et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, v. 370, p. 224–228, 2001.

SARRION, A. et al. Acid-mediated hydrothermal treatment of sewage sludge for nutrient recovery. *Bioresource Technology*, v. 342, p. 125954, 2022.

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2023. São Paulo: Observatório do Clima, 2024.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico Temático Visão Geral



Água e Esgotos 2022. Brasília: Ministério das Cidades, 2023.

TASCA, A. L. et al. Hydrothermal carbonization of sewage sludge: a critical analysis of process severity, hydrochar properties and environmental implications. *Waste Management*, v. 93, p. 1–13, 2019.

USGS - U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2025: Phosphate Rock. Reston: USGS, 2025.

WANG, Q. et al. Transformation kinetics of phosphorus and nitrogen in iron-rich sewage sludges during hydrothermal treatment. *ACS Sustainable Chemistry e Engineering*, v. 9, p. 1637–1646, 2021.

ZHENG, X. et al. Migration and transformation of phosphorus during hydrothermal carbonization of sewage sludge: focusing on the role of pH and calcium additive. *ACS Sustainable Chemistry e Engineering*, v. 8, p. 7806–7814, 2020.

ZHU, F.; ÇAKMAK, E. K.; ÇETECIOĞLU, Z. Phosphorus recovery for circular economy: application potential of feasible resources and engineering processes in Europe. *Chemical Engineering Journal*, v. 454, p. 140153, 2023.