

Estudo potencial para recuperação de fósforo (P) em efluentes agroindustriais na Bacia do Ribeirão Paciência (Pará de Minas - MG, Brasil)

Cunha, Alessandro Matozinhos da¹
Santos, Taísa Batista dos²
Goes, Felipe Matheus Santos³
Jesus, Rodrigo da Silva de⁴
Harry, Beatriz Dias⁵
Martins, Ana Cecília de Almeida⁶
Viana, Filipe Mendes⁷
Gontijo, Urias Felipe Camargos⁸
Rossoni, Hygor Aristides Victor⁹

RESUMO

As atividades agroindustriais intensivas podem gerar efluentes ricos em nutrientes, especialmente Fósforo Total (P) e Nitrogênio Amoniacal Total (NAT), contribuindo para a degradação da qualidade da água e para processos de eutrofização quando não adequadamente manejados. Nesse contexto, a recuperação de fósforo apresenta relevância ambiental e econômica, por possibilitar a redução da carga poluidora e a valorização de um nutriente estratégico para a agricultura. Este estudo teve como objetivo analisar a distribuição espacial de P, NAT e potencial Hidrogeniônico (pH) na bacia do Ribeirão Paciência, em Pará de Minas, Minas Gerais, a fim de identificar zonas críticas e avaliar o potencial de recuperação de fósforo em áreas influenciadas por atividades agroindustriais. A metodologia envolveu o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), com bases cartográficas integradas no QGIS, dados secundários de qualidade da água obtidos entre março de 2021 e dezembro de 2023, em 38 pontos de monitoramento, e análise estatística descritiva dos parâmetros avaliados. Os resultados indicaram concentrações elevadas de P e NAT em diferentes trechos da bacia, com maior criticidade em áreas associadas à presença de empreendimentos agroindustriais e ao acúmulo de cargas poluidoras. O baixo curso apresentou condições mais favoráveis à aplicação de tecnologias de recuperação, especialmente pela convergência de nutrientes e pela localização a jusante da captação de abastecimento coletivo. Entre as alternativas tecnológicas, a precipitação de estruvita mostrou-se promissora, embora dependa da análise da disponibilidade de magnésio (Mg) no efluente para melhor avaliação de sua viabilidade.

Palavras-chave: Economia circular; Estruvita; Qualidade da água; Nutrientes.

¹ Mestrando em Manejo e Conservação de Ecossistemas Naturais e Agrários (UFV – *Campus Florestal*) – alessandro.matozinhos@ufv.br;

² Mestranda em Manejo e Conservação de Ecossistemas Naturais e Agrários (UFV – *Campus Florestal*) – taísa.batista@ufv.br;

³ Mestrando em Manejo e Conservação de Ecossistemas Naturais e Agrários (UFV – *Campus Florestal*) – felipe.goes@ufv.br;

⁴ Graduando em Tecnologia em Gestão Ambiental (UFV – *Campus Florestal*) – rodrigo.s.jesus@ufv.br;

⁵ Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária (UFV – *Campus Florestal*) – elizabeth.harry@ufv.br;

⁶ Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária (UFV – *Campus Florestal*) – ana.cecilia.martins@ufv.br;

⁷ Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária (UFV – *Campus Florestal*) – filipe.m.viana@ufv.br;

⁸ Técnico integrado em Alimentos (UFV – *Campus Florestal*) – urias.gontijo@ufv.br;

⁹ Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG); Orientador e membro permanente do Mestrado Acadêmico em Manejo e Conservação de Ecossistemas Naturais e Agrários da UFV – *Campus Florestal* – rosconi@ufv.br.

INTRODUÇÃO

As atividades agroindustriais intensivas estão associadas à geração de efluentes com elevadas concentrações de matéria orgânica, nitrogênio (N) e fósforo (P), especialmente quando os resíduos não são adequadamente manejados (Antes; Bortoli e Kunz, 2022). Embora essenciais à produção agrícola, esses nutrientes, em excesso nos corpos hídricos, contribuem para eutrofização, redução da qualidade da água e degradação dos ecossistemas aquáticos (Zeng *et al.*, 2021; López-Sánchez *et al.*, 2022; Sajjad *et al.*, 2023).

O fósforo também possui relevância estratégica, pois é obtido majoritariamente de fontes minerais finitas, como a rocha fosfática. No Brasil, a dependência de fertilizantes fosfatados importados expõe a cadeia agrícola a riscos econômicos, energéticos e geopolíticos (Bortoli; Prá; Kunz, 2022). Esse cenário reforça a necessidade de alternativas para recuperação e reutilização do fósforo, especialmente no contexto da economia circular aplicada ao agronegócio (López-Sánchez *et al.*, 2022).

A bacia do Ribeirão Paciência, localizada em Pará de Minas, Minas Gerais, insere-se nesse contexto por apresentar expressiva atividade agroindustrial e pecuária, com destaque para suinocultura, avicultura e bovinocultura. Segundo o Censo Agropecuário, o município possuía 113 empreendimentos de manejo de suínos, 391 granjas avícolas e 643 unidades produtivas de pecuária bovina (IBGE, 2017).

Diante disso, o presente estudo analisa a distribuição espacial de Fósforo Total (P), Nitrogênio Amoniacal Total (NAT) e Potencial Hidrogeniônico (pH) na bacia do Ribeirão Paciência, com o objetivo de identificar zonas críticas e avaliar o potencial de recuperação de fósforo em áreas influenciadas por atividades agroindustriais. Busca-se, assim, contribuir para estratégias regionais de gestão ambiental, redução da carga poluidora e valorização do fósforo na economia circular.

MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo e das fontes agroindustriais

A área de estudo compreende o perímetro urbano e periurbano da bacia do Ribeirão Paciência. A caracterização foi realizada por meio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), com uso do QGIS, versão 3.40.6-Bratislava (QGIS *Development Team*, 2024). As bases cartográficas foram obtidas na plataforma IDE-Sisema (Minas Gerais, 2026), contemplando uso e ocupação do solo, rede hidrográfica, limites administrativos e empreendimentos licenciados.

Os empreendimentos foram classificados quanto ao potencial poluidor conforme a Deliberação Normativa COPAM nº 217/2017 (Minas Gerais, 2017), com identificação das atividades

com maior potencial de geração de Fósforo Total (P), Nitrogênio Amoniacal Total (NAT) e alterações de Potencial Hidrogeniônico (pH), especialmente aquelas associadas ao processamento de proteína animal e à produção de alimentos.

2.2 Dados de qualidade da água e tratamento estatístico

Os dados de qualidade da água foram obtidos pelo Termo de Cooperação Técnica nº 01/2024, firmado entre a Universidade Federal de Viçosa e a Prefeitura de Pará de Minas. As análises laboratoriais foram realizadas por laboratório terceirizado vinculado ao SENAI, acreditado pela Cgcre conforme a ABNT NBR ISO/IEC 17025 (CRL 0195).

O período analisado compreendeu março de 2021 a dezembro de 2023, totalizando 34 meses, com amostragens em 38 pontos, sendo 23 no curso principal e 15 em afluentes. As análises seguiram o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017), considerando, entre outros parâmetros, P, NAT e pH.

Os dados foram tratados por estatística descritiva (Von Sperling, Verbyla e Oliveira, 2020), com cálculo de média, mediana, mínimos, máximos e quartis, visando caracterizar a variabilidade espacial e identificar pontos críticos de concentração. Os resultados foram comparados à DN Conjunta COPAM-CERH/MG nº 8/2022 (Minas Gerais, 2022). Na ausência de dados de vazão e de carga poluidora de lançamento dos empreendimentos, adotou-se como parâmetro comparativo o enquadramento do corpo receptor conforme a DN COPAM nº 31/1998 (Minas Gerais, 1998).

2.3 Avaliação do potencial de recuperação de fósforo

O potencial de recuperação de fósforo foi avaliado pela integração, em SIG, das fontes de nutrientes, das concentrações de P e das características dos efluentes, inferidas a partir das atividades identificadas. Foram consideradas prioritárias as áreas com concentrações a montante acima dos limites legais e predominância de fontes pontuais agroindustriais de médio a alto potencial poluidor, conforme a DN COPAM nº 217/2017 (Minas Gerais, 2017).

A adequação tecnológica foi analisada com base na literatura e nas concentrações de P, NAT e pH, no grau de dispersão das cargas e na complexidade operacional. A partir desses critérios, os trechos da bacia foram classificados quanto à aptidão para tecnologias de recuperação, distinguindo áreas mais favoráveis e trechos com maiores restrições.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização das fontes de P, NAT e pH na bacia do Ribeirão Paciência

Conforme a DN COPAM nº 031/1998 (Minas Gerais, 1998), o Ribeirão Paciência apresenta enquadramento variável ao longo de seus diferentes trechos: o Trecho 44a, Classe 1, que se estende das nascentes até a BR-262, não foi contemplado neste estudo; o Trecho 44b, Classe 2, compreende o segmento da BR-262 até a captação para abastecimento coletivo de Pará de Minas, correspondendo aos pontos 1 a 8; e o Trecho 45, Classe 3, abrange o trecho a jusante da captação até a confluência com o ribeirão dos Meireles, correspondendo aos pontos 9 a 38. Observa-se, em todo o perímetro analisado (Figura 1), uma concentração de atividades agroindustriais potencialmente impactantes no corpo hídrico, exercendo pressão sobre a qualidade da água. As concentrações de Fósforo Total (P), Nitrogênio Amoniacal Total (NAT) e o pH foram avaliadas com base nesse enquadramento.

Os resultados de Fósforo Total (P) (Figura 2) indicam degradação associada ao risco de eutrofização, relacionada a fontes difusas e pontuais de atividades agroindustriais. Concentrações elevadas de fósforo favorecem a eutrofização, reduzem o oxigênio dissolvido, comprometem a biota aquática (Von Sperling, 1996, p. 151) e podem elevar custos de tratamento para abastecimento público (Pádua, 2010, p. 300). As cargas contínuas indicam passivos ambientais associados ao uso do solo, ao lançamento de efluentes e ao escoamento superficial (Ferreira e Pádua, 2010, p. 156).

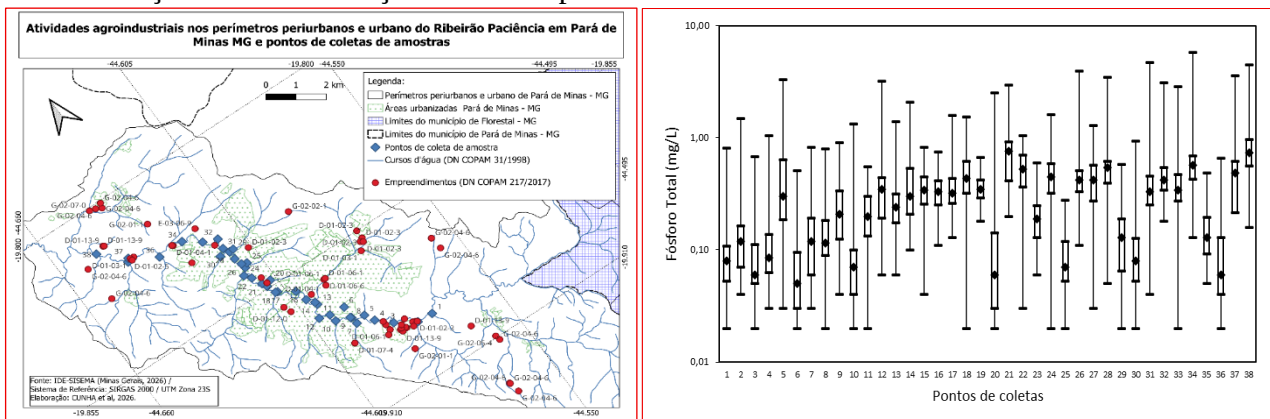
As medianas de P variaram entre 0,05 e 0,76 mg/L. Nos pontos 1 a 8, os máximos, entre 0,51 e 3,3 mg/L, excederam o limite de 0,1 mg/L para Classe 2 (Minas Gerais, 2022). Nos pontos 9 a 38, os máximos, entre 0,28 e 5,77 mg/L, ultrapassaram o limite de 0,15 mg/L para Classe 3, com mais de 70% das amostras acima desse valor. Em diversos pontos, o primeiro quartil também excedeu 0,15 mg/L, indicando poluição crônica, especialmente nos pontos 31 a 34 e 37 a 38.

As variações de pH (Figura 3) podem indicar influência agroindustrial, associada a efluentes com carga orgânica e compostos nitrogenados, especialmente em ambientes com menor capacidade tamponante (Bortoli; Prá; Kunz, 2022). Os valores variaram entre 5,3 e 8,6, com medianas entre 6,4 e 7,3, atendendo, na maior parte do período analisado, aos limites das Classes 2 e 3 (6 a 9) (Minas Gerais, 2022). Esse comportamento relaciona-se ao sistema tampão de bicarbonatos e carbonatos (Ferreira; Pádua, 2010, p. 176). Os valores extremos de pH ocorreram no ponto 5, também crítico para Fósforo Total (P), enquanto o ponto 23 apresentou *outliers* de 4,3 e 9,5, sugerindo perturbações localizadas a montante do ponto de coleta. Ressalta-se que esse ponto se encontra em um afluente à margem esquerda do corpo hídrico principal; entretanto, não há atividade agroindustrial a montante, o que pode indicar lançamento proveniente de outro grupo de atividades não contemplado neste estudo.

As concentrações de Nitrogênio Amoniacal Total (NAT) (Figura 4) associam-se à decomposição de resíduos animais característicos de efluentes agroindustriais (Bortoli; Prá; Kunz, 2022; Antes *et al.*, 2024). Sua toxicidade depende do pH, pois, em condições alcalinas, predomina a forma não ionizada, NH_3 , mais tóxica (Bortoli; Prá; Kunz, 2022).

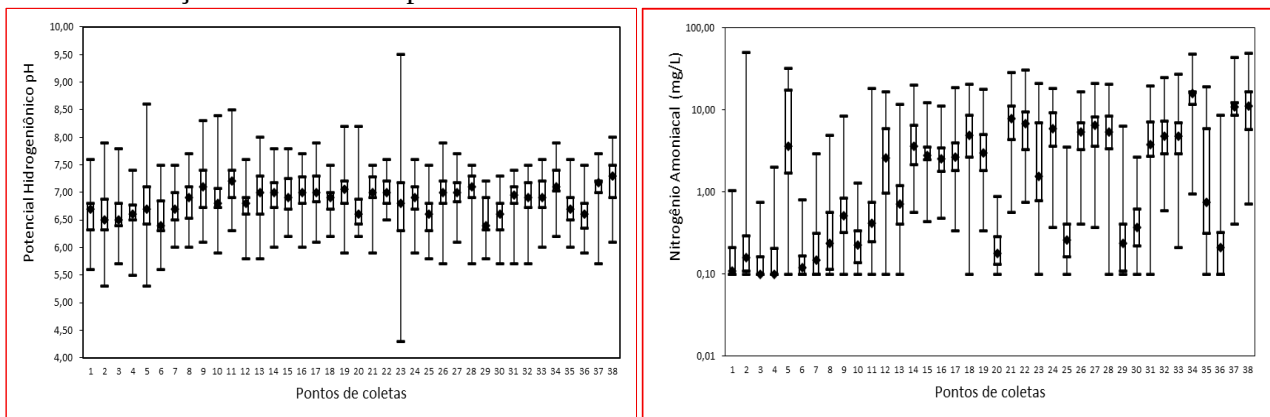
Observou-se elevada variabilidade espacial de NAT, com medianas de até 16,1 mg/L e máximas superiores a 50 mg/L. Os pontos 1 a 4 mantiveram concentrações baixas, enquanto o ponto 5, a jusante do primeiro cluster agroindustrial, apresentou mediana de 3,64 mg/L, máximo de 32,5 mg/L e outlier de 50,4 mg/L. Nos pontos 21 e 22, situados no perímetro urbano com atividades de abate, as medianas foram de 7,94 e 6,83 mg/L. Nos pontos 34, 37 e 38, atingiram 16,1, 11,06 e 11,30 mg/L, com máximas próximas a 50 mg/L, evidenciando acúmulo da carga poluidora (Bortoli; Prá; Kunz, 2022). Grande parte dos pontos excedeu os limites da DN Conjunta COPAM-CERH/MG nº 8/2022, variáveis em função do pH, uma vez que a própria norma estabelece limites de NAT condicionados a esse parâmetro.

Figuras 1 e 2 : Perímetros Periurbanos e Urbano do Ribeirão Paciência em Pará de Minas – MG / Variação das concentrações de P nos pontos de monitoramento



Fonte: Dos autores, 2026.

Figura 3 e 4 - Variação das concentrações de pH nos pontos de monitoramento / Variação das concentrações de NAT nos pontos de monitoramento



Fonte: Dos Autores 2026.

3.2 Variação espacial das concentrações de fósforo e identificação de trechos críticos

Os pontos com maiores concentrações de Fósforo Total (P) coincidem, em sua maioria, com áreas de maior densidade de empreendimentos classificados com médio a alto potencial poluidor, Classes 3 a 6, associados à agroindústria de processamento de proteína animal (Minas Gerais, 2017). Essa distribuição indica que o potencial de recuperação de fósforo não é homogêneo na bacia, concentrando-se nas zonas com maior pressão agroindustrial.

No alto curso, pontos 1 a 8, especialmente entre os pontos 1 e 5, observa-se um cluster agroindustrial associado a valores expressivos de P. Embora esse trecho apresente menor degradação em relação aos demais, o agrupamento representa fonte relevante de aporte localizado de nutrientes. Como a captação para abastecimento coletivo ocorre a jusante do ponto 8, a redução das cargas provenientes desse cluster pode contribuir tanto para a melhoria do abastecimento quanto para a formação de uma cadeia de valor do fósforo recuperado.

No médio curso, pontos 9 a 23, correspondente ao perímetro urbano, o corpo hídrico recebe múltiplas pressões antrópicas, incluindo possíveis lançamentos clandestinos, extravasamento de esgoto bruto e efluentes, descarte irregular de resíduos sólidos, entre outros. Nesse trecho, o aumento de P e Nitrogênio Amoniacal Total (NAT) reflete a intensificação dessas pressões. Contudo, a dispersão das fontes dificulta soluções centralizadas, indicando a necessidade de estratégias individualizadas de gestão e controle.

No baixo curso, pontos 24 a 38, área de transição urbana para periurbana, observa-se o acúmulo das cargas provenientes dos trechos a montante. A região concentra alguns dos maiores valores de P e NAT, configurando zona de convergência de nutrientes. Por apresentar concentrações elevadas, disponibilidade de área física e localização a jusante do perímetro urbano, esse trecho reúne condições mais favoráveis à implantação de tecnologias de recuperação de fósforo, com menor risco ao abastecimento coletivo municipal.

3.3 Potencial de recuperação de fósforo e adequação tecnológica

As tecnologias de recuperação de fósforo a partir de efluentes (Quadro 1) inserem-se no contexto da economia circular e incluem processos químicos, físicos e biológicos, com diferenças quanto à eficiência, complexidade operacional e qualidade do produto gerado. Métodos como secagem térmica e digestão anaeróbia atuam indiretamente na concentração ou transformação do fósforo, enquanto processos químicos, como a precipitação, apresentam maior eficiência de recuperação direta (Antes; Bortoli e Kunz, 2022, p. 195).

Entre as tecnologias avaliadas, a precipitação de estruvita destaca-se por combinar elevada eficiência de recuperação de fósforo, podendo superar 90%, recuperação simultânea de nitrogênio e geração de produto de valor agregado. Em comparação, o processo *Quick Wash* demanda uso intensivo de ácidos e gera resíduos adicionais; métodos térmicos exigem maior energia; e processos biológicos apresentam maior complexidade operacional (Szögi, Vanotti e Hunt, 2015; Bolzonella *et al.*, 2018; Vilvert *et al.*, 2020; Zhen *et al.*, 2022; Aka *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024).

Para a bacia do Ribeirão Paciência, a precipitação de estruvita mostra-se promissora devido à ocorrência simultânea de fósforo e nitrogênio amoniacal em pontos críticos. O pH próximo à neutralidade exige ajustes para atingir a faixa ideal de precipitação, entre 9 e 10, além da adição de magnésio (Mg). Embora o produto final apresente pureza e facilidade de transporte em fase sólida, a viabilidade econômica depende do controle da razão molar Mg:N:P (Aka *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024). Assim, a recuperação de fósforo pode integrar gestão de efluentes, uso agrícola de nutrientes e economia circular, contribuindo para a sustentabilidade regional e para novas cadeias produtivas.

Quadro 1 - Tecnologias de recuperação de fósforo aplicáveis a efluentes agroindustriais

Tecnologia	Princípio	Eficiência de recuperação	Vantagens	Limitações	Produto gerado	Referência
Precipitação de estruvita	Precipitação química (Mg + NH ₄ + PO ₄)	Superior a ~90% (P)	Alta eficiência; recuperação simultânea de N e P; produto de alto valor e fácil mobilidade	Controle rigoroso de pH (9–10) e razão molar.	Estruvita (fertilizante de liberação lenta).	Aka <i>et al.</i> (2023); Li <i>et al.</i> (2024)
<i>Quick Wash</i> (lavagem ácida + precipitação)	Solubilização ácida + precipitação química	Até ~90% (P)	Alta eficiência; adequado para resíduos sólidos.	Uso de ácidos; geração de resíduos; custo operacional.	Fosfato precipitado	Szögi; Vanotti; Hunt (2015)
Secagem térmica	Remoção de água por aquecimento	Indireta (concentração de P)	Redução de volume; facilita transporte.	Alta demanda energética.	Sólido concentrado	Bolzonella <i>et al.</i> (2018)
Digestão anaeróbica	Degradação biológica da matéria orgânica	Baixa (P direto)	Geração de energia; tratamento de efluentes.	Necessita pós-tratamento para recuperar P.	Digestato + biogás	Vilvert <i>et al.</i> (2020); Zhen <i>et al.</i> (2022); Bolzonella <i>et al.</i> (2018)

Fonte: Dos Autores 2026.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados indicam comprometimento da qualidade da água na bacia do Ribeirão Paciência, especialmente por Fósforo Total (P) e Nitrogênio Amoniacal Total (NAT), com maior criticidade em trechos associados à concentração de atividades agroindustriais e ao acúmulo de cargas poluidoras.

A distribuição espacial dos parâmetros demonstra que o potencial de recuperação de fósforo não é homogêneo, concentrando-se em zonas específicas da bacia. O baixo curso apresenta condições mais favoráveis à aplicação de tecnologias de recuperação do que os trechos médio e alto. Isso se deve às maiores concentrações de P e NAT, à convergência de cargas e à localização estratégica a montante da captação para abastecimento coletivo, cuja qualidade de água pode ser beneficiada por essas intervenções.

Entre as alternativas avaliadas, a precipitação de estruvita mostra-se promissora, por permitir a recuperação simultânea de fósforo e nitrogênio e gerar produto sólido com potencial uso agrícola. Contudo, sua viabilidade depende também da disponibilidade de magnésio (Mg) no efluente, elemento essencial à formação da estruvita. Assim, recomenda-se que estudos futuros incluam a análise de Mg nos pontos críticos identificados, para verificar a necessidade de suplementação e estimar melhor a viabilidade do processo.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA)

Em conformidade com a Política de Integridade na Atividade Científica do CNPq (Portaria nº 2.664/2026), declaro que foram utilizadas ferramentas de Inteligência Artificial Generativa no desenvolvimento deste trabalho, especificamente o ChatGPT (OpenAI) e o DeepSeek Chat (DeepSeek), entre 2025 e 2026.

O uso dessas ferramentas ocorreu para síntese e organização de referências bibliográficas, apoio à reformulação de trechos textuais, padronização de citações e adequação às normas ABNT, além de revisão de consistência terminológica e clareza textual.

As ferramentas de IA não foram utilizadas para geração de dados brutos, resultados empíricos ou análises conclusivas da pesquisa, nem houve apresentação de conteúdo gerado por IA como se fosse de autoria exclusivamente humana sem revisão crítica.

Todo o conteúdo produzido com apoio de IA foi revisado, validado e editado pelo autor, sendo de sua responsabilidade exclusiva as decisões analíticas, interpretações, discussões e conclusões do trabalho, bem como a veracidade, originalidade e adequação do conteúdo final, inclusive quanto a eventuais imprecisões decorrentes do uso dessas ferramentas.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de mestrado, Iniciação Científica aos autores deste trabalho; Ao Centro de Vivência e Educação em Saneamento Rural da UFV – *Campus Florestal*; À Prefeitura Municipal de Pará de Minas – MG.

REFERÊNCIAS

- AKA, R. J. N. *et al.* Nutrient recovery through struvite precipitation from anaerobically digested poultry wastewater in an air-lift electrolytic reactor: Process modeling and cost analysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 465, 1 jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142825>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- ANTES, F. G. *et al.* Remoção e recuperação de fósforo. In: KUNZ, A. (org.). **Gestão dos resíduos da produção animal: gestão e tratamento dos dejetos na suinocultura**. v. 3. Brasília, DF: Embrapa; Concórdia, SC: Sbera, 2024. p. 81–110. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/273376/1/Volume-III-Gestao-e-tratamento-dos-dejetos-na-suinocultura-Kunz.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- ANTES, F.; BORTOLI, M.; KUNZ, A. Tratamento do digestato: remoção de fósforo. In: KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 2. ed. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2022. p. 193–208. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1108617>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- APHA - American Public Health Association; **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater** (SMEWW). American Water Works Association, Water Environmental Federation 23. ed. Washington, 2017. 1 v.
- BORTOLI, M.; PRÁ, M. C.; KUNZ, A. Tratamento do digestato: remoção de nitrogênio. In: KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 2. ed. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves. 2022. p. 131–192. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1108617>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- BOLZONELLA, D. *et al.* Nutrients recovery from anaerobic digestate of agro-waste: Techno-economic assessment of full-scale applications. **Journal of Environmental Management**, v. 216, p. 111–119, 15 jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.026>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- FERREIRA, A. C. S.; PÁDUA, V. L. Qualidade da água para consumo humano. In: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (org.). **Abastecimento de água para consumo humano**. 2. ed. rev. e atual. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. p. 151–217.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017 - Resultados definitivos**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/24/76693>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- LI, J. *et al.* Nitrogen and phosphorus recovery from livestock wastewater via magnesium ammonium phosphate precipitation: A critical review of methods, progress, and insights. **Journal of Water Process Engineering Elsevier Ltd**, , 1 nov. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106139>. Acesso em: 17 mar. 2026.

- LÓPEZ-SÁNCHEZ, A. et al. *Microalgae-based livestock wastewater treatment (MbWT) as a circular bioeconomy approach: Enhancement of biomass productivity, pollutant removal and high-value compound production*. **Journal of Environmental Management Academic Press**, 15 abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114612>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM). **Deliberação Normativa COPAM nº 31, de 18 de dezembro de 1998**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/portals/pnqa/Publicacao/Minas%20Gerais%20-Rib.Paciencia%20-%20Bacia%20do%20Rio%20Par%C3%A1%20.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM); Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais (CERH-MG). **Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG nº 8, de 21 de novembro de 2022**. Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=56521>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- MINAS GERAIS. Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Sisema). **Infraestrutura de Dados Espaciais – IDE-Sisema**. Disponível em: <https://visualizador.idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- PÁDUA, V. L. Soluções alternativas desprovidas de rede. In: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (org.). **Abastecimento de água para consumo humano**. 2. ed. rev. e atual. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. p. 299–324.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System. Version 3.40.6-Bratislava**. Open-Source Geospatial Foundation, 2024. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- SAJJAD, M. et al. *Methods for the removal and recovery of nitrogen and phosphorus nutrients from animal waste: A critical review*. **Acta Ecologica Sinica Ecological Society of China**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2023.05.003>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- SZÖGI, A. A.; VANOTTI, M. B.; HUNT, P. G. *Phosphorus recovery from pig manure solids prior to land application*. **Journal of Environmental Management**, v. 157, p. 1–7, 1 jul. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.010>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- VILVERT, A. J. et al. *Minimization of energy demand in slaughterhouses: Estimated production of biogas generated from the effluent*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, 1 mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109613>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 243 p.
- ZENG, W. et al. *Recovery of nitrogen and phosphorus fertilizer from pig farm biogas slurry and incinerated chicken manure fly ash*. **Science of the Total Environment**, v. 782, 15 ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146856>. Acesso em: 17 mar. 2026.
- ZHEN, X. et al. *The sustainable utilization of anaerobic digestion effluents treating in suspended filler algae assisted systems*. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 53, 1 out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102354>. Acesso em: 17 mar. 2026.