



CARACTERIZAÇÃO DE CINZAS PROVENIENTES DE CALDEIRA INDUSTRIAL E APLICAÇÃO NA ADSORÇÃO DE ESTIRENO

Helena M. Souza¹; Milena V. Schneider²; Janice da Silva³

^{1,2,3} Curso de engenharia química – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)
helenametz@edu.unisinos.br

Palavras-Chave: adsorção, resíduo, biomassa.

Introdução

O desenvolvimento da economia global tem impulsionado o aumento da demanda por energia. Em razão de fatores como o esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, a necessidade de garantir a segurança energética e os impactos das mudanças climáticas, a busca por fontes de energia renováveis e sustentáveis tornou-se uma prioridade (GANI *et al.*, 2023). Nesse contexto, destacam-se as caldeiras movidas a biomassa como uma alternativa promissora para a geração de energia.

De acordo com Namakka *et al.* (2026), a combustão de resíduos agroflorestais baseia-se no princípio da neutralidade de carbono, uma vez que as emissões de CO₂ provenientes da combustão são, em condições ideais, compensadas pela quantidade de dióxido de carbono absorvida pelas plantas durante seu ciclo de crescimento. Além disso, conforme demonstrado por Souza *et al.* (2021), o Brasil apresenta elevado potencial para ampliar a geração de bioenergia por meio do aproveitamento energético de biomassas, favorecendo a substituição gradual de combustíveis fósseis por fontes renováveis e contribuindo para uma matriz energética mais sustentável. Entretanto, a expansão do uso de caldeiras alimentadas por biomassa para fins energéticos também resulta no aumento da geração de cinzas, um resíduo sólido cuja destinação adequada representa um desafio ambiental e tecnológico. Dessa forma, torna-se necessária a busca por alternativas sustentáveis para o aproveitamento e a valorização desse resíduo.

Estima-se que a geração global de cinzas de biomassa seja de cerca de 480 milhões de toneladas anuais (MUNAWAR *et al.*, 2021). Diversos estudos vêm sendo realizados para descobrir aplicações eficazes para as cinzas de combustão de biomassa, incluindo investigações sobre refino de biogás, compostagem de sólidos e produtos cimentícios (JEPLETING *et al.*, 2025; QIU *et al.*, 2025). Entre essas alternativas, destaca-se a área de estudos para reaproveitamento de cinzas como adsorvente, visando reduzir os custos envolvendo a adsorção e valorizar o subproduto gerado.

Para a remoção de contaminantes orgânicos de águas residuais uma ampla gama de métodos é aplicada, incluindo filtração com coagulação, precipitação, ozonização, troca iônica, osmose reversa, processos de oxidação aprimorados e adsorção. Contudo, a aplicação



da maioria desses métodos é limitada pelos altos custos de capital e operacionais associados. Nesse contexto, o método de adsorção é reconhecido como simples, prático e eficiente (KOMAROVA *et al.*, 2024). Entre os contaminantes orgânicos de interesse ambiental, destaca-se o estireno, um hidrocarboneto amplamente empregado na indústria petroquímica. Sua presença em efluentes e corpos hídricos é motivo de preocupação devido à sua toxicidade crônica e ao seu potencial carcinogênico, representando riscos à saúde humana e aos organismos aquáticos (DUAN *et al.*, 2013).

Diante dessa problemática, este estudo visa caracterizar o resíduo proveniente de uma caldeira industrial e avaliar sua potencialidade como adsorvente da molécula de estireno em soluções aquosas.

Material e Métodos

As cinzas residuais analisadas foram obtidas do processo de combustão de uma caldeira industrial, no Rio Grande do Sul, operando a 900 °C e 6,7 MPa, oriundas de cavacos de eucalipto e casca de arroz (75:25). Previamente às análises, as cinzas foram secas (105 °C, 24 h) e resfriadas em dessecador. O estudo dividiu-se na caracterização do material e em ensaios de adsorção em batelada com solução aquosa de estireno.

A caracterização das cinzas englobou granulometria por peneiramento a seco (agitador Bertel, 30 min), utilizando-se a fração passante na malha de 1,18 mm para as etapas subsequentes; composição química semiquantitativa por FRX (Malvern Panalytical Epsilon 1, varredura Omnia); e morfologia por microscopia eletrônica de varredura (MEV, Hitachi TM3030).

Os ensaios de adsorção utilizaram soluções de estireno (Sigma, 99,5%) a 10 mg.L⁻¹ em água desmineralizada, preparadas por diluição de solução estoque (10.000 mg.L⁻¹ em metanol Merck P.A.) com água Milli-Q. Alíquotas de 100 mL foram expostas a concentrações de adsorvente de 3, 5, 10 e 20 g.L⁻¹. Um frasco controle, sem adição do adsorvente, monitorou perdas por volatilização. O sistema permaneceu sob agitação orbital (150 rpm, temperatura ambiente, 24 h), seguido de decantação e filtração.

Para quantificação do estireno remanescente foi realizada a extração líquido-líquido com hexano. Adicionou-se 10 mL de solução padrão de hexadecano em hexano em aproximadamente 100 g da amostra. Esta mistura foi transferida para um funil de separação e mantida em agitação orbital (270 rpm, 10 min). A fase orgânica foi separada, filtrada (filtro seringa PTFE, 0,45 µm) e analisada em cromatógrafo a gás (Varian CG3800A), com coluna ZB-WAX plus (polietilenoglicol) e detector FID.

A porcentagem de remoção (%Rem) e a capacidade de adsorção no equilíbrio (q_e , expressa em mg.g⁻¹) foram calculadas pela equação 1 e 2:

$$\%Rem = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad \text{Equação 2}$$

Em que C_e é a concentração final de estireno (mg.L^{-1}) e C_0 a concentração inicial (mg.L^{-1}). Para a análise de porcentagem de remoção do frasco controle C_0 foi utilizada a concentração inicial teórica. Para demais análises a concentração inicial utilizada foi a mensurada no frasco controle. V representa o volume da solução (L) e m a massa de cinza utilizada (g).

Os dados de equilíbrio foram ajustados aos modelos de Langmuir e Freundlich em suas formas linearizadas, conforme as Equações 3 e 4, respectivamente:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\text{máx}} \times K_L} + \frac{C_e}{q_{\text{máx}}} \quad \text{Equação 3}$$

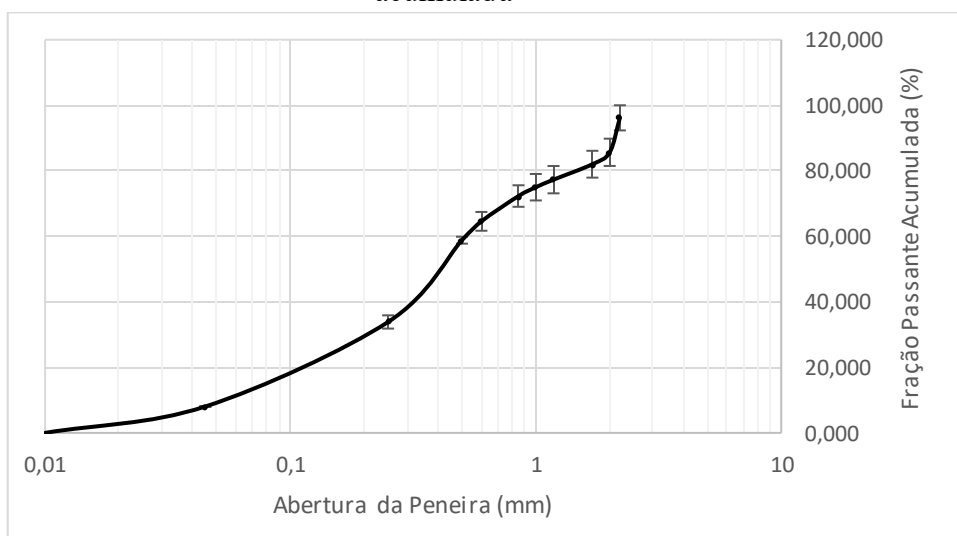
$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad \text{Equação 4}$$

Em que $q_{\text{máx}}$ (mg.g^{-1}) é a capacidade máxima de adsorção; K_L (L.mg^{-1}) é a constante de Langmuir relacionada à energia de adsorção, K_F [$\text{mg.g}^{-1} (\text{L.mg}^{-1})^{1/n}$] e n são os parâmetros de Freundlich. O ajuste foi avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2).

Resultados e Discussão

A distribuição granulométrica das cinzas apresentou comportamento conforme descrito na Figura 1:

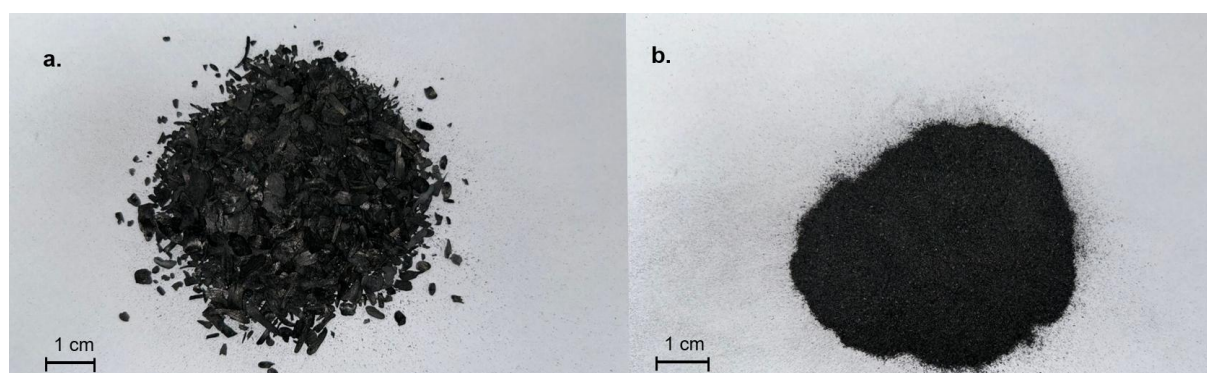
Figura 1. Distribuição granulométrica das cinzas expressa em fração passante acumulada



Fonte: Os autores (2026).

Observa-se que a cinza analisada, possui como diâmetros característicos D10:0,065mm e D50:0,39mm. Como o processo de adsorção tem forte influência no tamanho da partícula adsorvente (KIELING *et al.*, 2016), optou-se por segregar a fração mais grosseira do material. Assim, o processo de segregação resultou na retirada de $22,7 \pm 4,2\%$ do material correspondentes a fração retida nas peneiras acima de 1,18mm conforme representado na Figura 2. Para esta fração sugere-se processos de moagem para atingir granulometrias inferiores.

Figura 2. Frações adsorvente. a) fração acima de 1,18mm (descartada). b) Fração passante à 1,18mm (mantida).



Fonte: Os autores (2026).

Na Tabela 1 são apresentados os elementos identificados nas cinzas através da análise de FRX qualitativa.

Tabela 1. Análise de FRX qualitativa

	Menor quantidade (5%>x >50%)	Elementos Traços (<5%)
Cinzas	Si, Ca, K	S, P, Cl, Fe, Mn

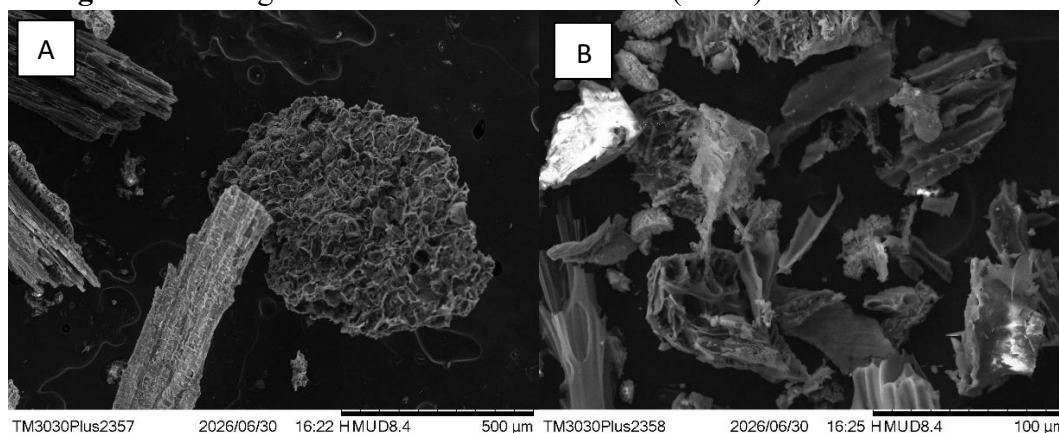
Fonte: Os autores (2026).

Observa-se que a amostra apresenta elementos como silício, cálcio e potássio, elementos comumente encontrados em cinzas de materiais lignocelulósicos, sendo o óxido de silício (SiO_2) tipicamente produzido durante o processo de combustão de casca de arroz e o óxido de cálcio proveniente da madeira utilizada na queima (FRANÇA *et al.*, 2016).

A análise de morfologia (Figura 3) revelou que as cinzas residuais são compostas por fragmentos com morfologias distintas. A partícula mais fibrosa e alongada exhibe características estruturais remanescentes da madeira de eucalipto. Enquanto a partícula com aglomerados porosos, apresenta estrutura provenientes da casca de arroz. Estes resultados corroboram ao encontrado em outros trabalhos (FERNANDES *et al.*, 2020, GRIMA

OLMEDO *et al.*, 2016, PEREIRA *et al.*, 2024). Assim, é possível caracterizar como material com superfície altamente irregular e porosa. Essa característica irregular aumenta a área superficial de contato e favorece o processo de adsorção.

Figura 3. Micrografias eletrônicas de varredura (MEV) das cinzas mistas



(A) Visão geral evidenciando partículas fibrosas e esponjosas (120x); (B) Detalhe da rugosidade e macroporosidade superficial (600x)

Fonte: Os autores (2026).

Na Tabela 2, estão descritos os resultados para os ensaios de adsorção.

Tabela 2. Resultados ensaios de adsorção

Concentração de estireno inicial (mg.L ⁻¹)	Concentração de adsorvente (g.L ⁻¹)	Remoção (%)
10	0*	52,0
10	3	91,7
10	5	95,8
10	10	97,9
10	20	98,3

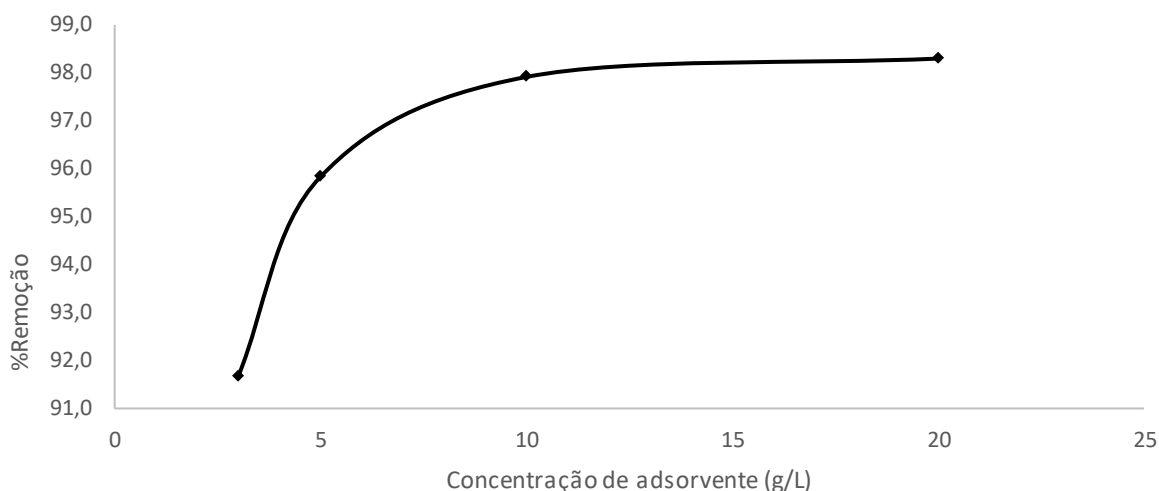
*frasco controle.

Fonte: Os autores (2026).

No frasco controle, foi observada uma remoção aparente de 52,0%, atribuída às etapas inerentes ao procedimento experimental e analítico. Assim, para a determinação da eficiência de remoção do sistema adsorvente, utilizou-se como concentração inicial a concentração final obtida no frasco controle, de modo a corrigir a influência dessas variações nos resultados.

A Figura 4 representa a relação entre a remoção de estireno (%), calculada pela equação 2, e a concentração de adsorvente utilizada no processo.

Figura 4. Remoção de estireno nas diferentes concentrações de adsorvente



Fonte: Os autores (2026).

Observa-se que todas as concentrações de adsorvente utilizadas no estudo obtiveram um percentual de remoção superior a 90%, indicando que o adsorvente obteve alta afinidade com o estireno. Além disso, entre as concentrações de 10g.L^{-1} e 20g.L^{-1} a curva de remoção se aproxima de uma condição de saturação. Este comportamento indica que, a partir deste ponto, possivelmente a maior parte do estireno disponível já foi adsorvida, e o aumento da concentração do adsorvente não contribui significativamente para remoção adicional.

Esse resultado é consistente com dados da literatura, que relatam comportamento similar em sistemas de adsorção de compostos orgânicos utilizando materiais com alta afinidade por hidrocarbonetos aromáticos (KOMAROVA *et al.*, 2024).

Os dados experimentais de adsorção no equilíbrio foram ajustados aos modelos isotérmicos de Langmuir e Freundlich em suas formas linearizadas. Avaliando-se os coeficientes de correlação, constatou-se que o modelo de Langmuir não descreve adequadamente o sistema em estudo ($R^2 = 0,0263$), gerando parâmetros físicos inconsistentes. Em contrapartida, os dados adequaram-se de forma satisfatória ao modelo de Freundlich ($R^2 = 0,9316$). Este ajuste indica que o processo de remoção do estireno não se restringe a uma monocamada, ocorrendo preferencialmente sobre uma superfície altamente heterogênea e com sítios ativos de variadas afinidades energéticas. Esse perfil termodinâmico corrobora a complexidade estrutural e a macroporosidade das cinzas residuais mistas, evidenciadas pelas análises de morfologia.

A constante de Freundlich (K_F), obtida por meio dos valores da linearização exposta na equação 4, foi de $2,7\text{ mg.g}^{-1} (\text{L.mg}^{-1})^{1/n}$. Já a capacidade de adsorção no equilíbrio, determinada experimentalmente através da equação 2, foi de $3,20\text{ mg.g}^{-1}$. Observa-se que adsorventes diferentes, submetidos a tratamentos térmicos ou químicos complexos (DUAN *et al.*, 2013), bem como biossorventes lignocelulósicos crus (FALLAH *et al.*, 2015), apresentam



capacidades de adsorção variadas, de acordo com a natureza da biomassa e processo de ativação adotado. O valor de $3,20 \text{ mg.g}^{-1}$ obtido no presente estudo, deve-se, muito provavelmente, ao processo térmico de combustão na caldeira, que degrada ou volatiliza a maioria dos grupos funcionais de superfície que otimizariam as interações com o adsorbato orgânico (FERNANDES *et al.*, 2020). Acrescenta-se ainda que o uso das cinzas justifica-se devido ao reaproveitamento do resíduo de caldeiras industriais.

Conclusões

Os resultados obtidos evidenciam que as cinzas de caldeiras industriais, que utilizam como combustível biomassa de cavacos de eucalipto e casca de arroz, possuem potencial promissor como adsorvente na remoção de estireno em meio aquoso. Na análise de granulometria $77,3 \pm 4,2\%$ da amostra obteve granulometria inferior a $1,00 \text{ mm}$. A fração passante a $1,18 \text{ mm}$ demonstrou na composição elementar a presença de óxidos de silício e cálcio, estando de acordo com o esperado para cinzas das biomassas utilizadas. Na análise de morfologia, verificou-se a presença de material com superfície altamente irregular e porosa. Essa característica de superfície irregular aumenta a área superficial de contato e favoreceu o processo de adsorção. Os ensaios de adsorção mostraram remoção superior a 90% em todas as concentrações testadas (3 a 20 g.L^{-1}), com indícios de saturação a partir de 10 g.L^{-1} de adsorvente. No estudo de isotermas, os dados se ajustaram satisfatoriamente a isoterma de Freundlich com $R^2 = 0,9316$, indicando que o processo de remoção não se restringe a uma monocamada, e, obteve como capacidade de adsorção o valor de $3,20 \text{ mg.g}^{-1}$. Logo, os ensaios realizados neste estudo indicam a aplicabilidade do uso das cinzas como adsorvente alternativo para a adsorção de estireno em meio aquoso. Recomenda-se, em trabalhos futuros, a avaliação da variação da concentração do adsorvente e do tempo de equilíbrio, bem como a investigação da regeneração e reutilização do material, de modo a validar sua aplicação em escala industrial.

Agradecimentos

Agradecemos à Videolar-Innova pela doação de material e apoio, e à disciplina de Análise Química de Alimentos e Bioprodutos (Eng. Química - Unisinos) por oportunizar o desenvolvimento deste estudo.

Referências

- DUAN, E. *et al.* Adsorption of styrene on the hydrothermal-modified sepiolite. **Materials Letters**, v. 111, p.150-153, nov. 2013. DOI: 10.1016/j.matlet.2013.08.079.
- FALLAH, N. *et al.* Biosorption of styrene from synthetic wastewater by sugarcane waste (bagasse). **Advances in Environmental Technology**, v. 1, p. 31-40, 2015. Disponível em:



https://www.researchgate.net/publication/310045073_Biosorption_of_styrene_from_synthetic_wastewater_by_sugarcane_waste_bagasse. Acesso em: 3 jul. 2026

FERNANDES, B. C. C. *et al.* Impact of pyrolysis temperature on the properties of eucalyptus wood-derived biochar. **Materials**, v. 13, n. 24, p. 5841, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13245841>. Acesso em: 4 jul. 2026.

GANI, A. *et al.* Investigation of the potential biomass waste source for biocoke production in Indonesia: A review. **Energy Reports**, v. 10, p. 2417-2438, 2023. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.09.065.

GRIMA OLMEDO, C. *et al.* Activated carbon from flash pyrolysis of *Eucalyptus* residue. **Heliyon**, v. 2, n. 9, e00155, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2016.e00155>. Acesso em: 4 jul. 2026.

JEPLETING, Anceita *et al.* Potential of low-cost materials for biogas purification, a review of recent developments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 210, p. 115-152, mar. 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2024.115152>. Acesso em: 4 jul. 2026.

KIELING, Amanda Gonçalves. **Adsorção de BTEX - benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno - em cinza de casca de arroz e carvão ativado**. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

KOMAROVA, E. V. *et al.* Styrene Adsorption from Styrene Water System with Carbon Sorbents. **Chemistry and Technology of Fuels and Oils**, [S.L.], v. 60, n. 3, p. 559-566, jul. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10553-024-01713-x>. Acesso em: 4 jul. 2026.

MUNAWAR, M. A. *et al.* Challenges and opportunities in biomass ash management and its utilization in novel applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, p. 111451, out. 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111451.

NAMAKKA, M.; RAHMAN, M. R.; BAKRI, M. K. B. Waste biomass pellets for green energy production: A sustainable alternative for energy security. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 226, p. 136403, 2026. DOI: 10.1016/j.rser.2026.136403.

PEREIRA, M. A. *et al.* Evaluation of materials derived from rice husk as adsorbents of cationic and anionic dyes. **Cerâmica**, v. 70, eDXNP6972, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/DXNP6972>. Acesso em: 4 jul. 2026.

SOUZA, L. L. P. de *et al.* Theoretical and technical assessment of agroforestry residue potential for electricity generation in Brazil towards 2050. **Energy Reports**, v. 7, p.2574-2587, 2021. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.04.026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.026>. Acesso em: 4 jul. 2026.

QIU, Xinyue *et al.* Preparation of calcium-based phosphate adsorbent and mineral-rich humic acid fertilizer from biomass ash and bamboo by hydrothermal-pyrolysis: performance and mechanism. **Environmental Research**, [S.L.], v. 264, p. 120-318, jan. 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2024.120318>. Acesso em: 4 jul. 2026.