



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9° CONRESOL

9° Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



OBTENÇÃO DE BIOCHAR A PARTIR DE LODO BIOLÓGICO COMO INSUMO PARA CONDICIONAMENTO E MELHORAMENTO DE SOLOS

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.9.26.V-003>

Emmanuel Sarnacki Bernardi(*), Ana Flávia Locatelli Godoi, Juliana Schultz, Betina Kleinschmidt Leal

* Universidade Federal do Paraná, emmanuelbernardi@ufpr.br.

RESUMO

A geração de resíduos sólidos industriais representa um dos principais desafios ambientais contemporâneos, destacando-se o lodo biológico pelo elevado volume gerado, complexidade composicional e potencial poluidor, mas também por conter matéria orgânica e nutrientes passíveis de valorização. Este trabalho avaliou a viabilidade do aproveitamento desse resíduo por meio da produção de *biochar* via pirólise lenta (450, 550 e 600 °C), utilizando amostras de uma indústria automotiva. Mediante caracterização físico-química, espectroscópica e análise de contaminantes, buscou-se verificar a adequação dos *biochars* como condicionadores de solo, conforme a Instrução Normativa SDA nº 7/2016. Os resultados demonstraram que a pirólise produziu *biochars* com alta estabilidade química (razão H/C entre 0,48 e 0,95) e potencial de fornecimento de nitrogênio (razão C/N entre 8,56 e 10,19). Contudo, a lavagem ácida com H₂SO₄ (solução 1:10 v/v, relação 1:5 m/v), aplicada como pré e pós-tratamento, não foi suficiente para reduzir os teores de cromo (23,52–63,30 mg/kg) e chumbo (139,03–180,49 mg/kg) aos limites normativos. Conclui-se que, embora o *biochar* apresente atributos agrônômicos e ambientais favoráveis, sua aplicação direta como condicionador de solo é inviável, sendo necessárias estratégias de remediação mais eficazes.

PALAVRAS-CHAVE: *biochar*, lodo biológico, pirólise, resíduos industriais, condicionador de solos.

ABSTRACT

The generation of industrial solid waste is one of the main contemporary environmental challenges, with biological sludge standing out due to the high volume generated, compositional complexity, and polluting potential, but also because it contains organic matter and nutrients that can be recovered. This study aimed to evaluate the feasibility of utilizing this waste through the production of biochar via slow pyrolysis (450, 550, and 600 °C), using samples from an automotive industry. Through physicochemical, spectroscopic characterization and contaminant analysis, the research sought to verify the suitability of the produced biochars as soil conditioners according to Normative Instruction SDA No. 7/2016. The results demonstrated that pyrolysis produced biochars with high chemical stability (H/C ratio between 0.48 and 0.95) and potential nitrogen supply (C/N ratio between 8.56 and 10.19). However, acid washing with H₂SO₄ (solution 1:10 v/v, solid-to-liquid ratio 1:5 m/v), applied as pre- and post-treatment, was insufficient to reduce chromium (23.52–63.30 mg/kg) and lead (139.03–180.49 mg/kg) levels to the regulatory limits. It is concluded that, although the biochar presents favorable agronomic and environmental attributes, its direct application as a soil conditioner is unfeasible, requiring more effective remediation strategies or alternative uses, such as incorporation into cementitious matrices or industrial composites.

KEY WORDS: *biochar*; biological sludge; pyrolysis; industrial waste; soil conditioner.

INTRODUÇÃO

A geração de resíduos sólidos industriais constitui um dos principais desafios ambientais contemporâneos, impulsionada pela intensificação das atividades produtivas e pelo aumento da demanda por bens de consumo. A gestão inadequada desses resíduos pode resultar em impactos ambientais significativos e riscos à saúde pública (ABES, 2020).

Nesse contexto, o gerenciamento de resíduos torna-se elemento essencial, contemplando ações de redução na fonte, reutilização e reciclagem, em conformidade com exigências legais e ambientais. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, estabelece diretrizes que priorizam a não geração, o reaproveitamento e a disposição final ambientalmente adequada, incentivando a adoção de práticas industriais mais sustentáveis (PACOBELLO et al., 2022).



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



Dentre os resíduos industriais com potencial de valorização, destaca-se o lodo biológico gerado em estações de tratamento de efluentes (ETEs), especialmente em indústrias de grande porte com sistemas próprios de tratamento. Esse resíduo pode ser oriundo tanto de efluentes sanitários quanto de processos produtivos, apresentando elevada complexidade composicional e variabilidade. Apesar de frequentemente destinado a aterros ou ao coprocessamento, o lodo biológico pode ser convertido em insumo útil quando submetido a processos adequados de tratamento (ANDREOLI et al., 2014).

No estado do Paraná, a indústria objeto deste estudo gera volumes expressivos de lodo biológico proveniente de tratamento secundário aeróbio, cuja gestão eficiente é fundamental para o atendimento às exigências ambientais. Entre as alternativas tecnológicas disponíveis, destaca-se a pirólise, processo termoquímico conduzido em atmosfera com ausência ou baixa concentração de oxigênio. Esse processo promove a redução de volume, a estabilização de contaminantes e a geração de subprodutos como bio-óleo, gás de síntese (*syngas*) e *biochar*, material carbonáceo com propriedades físico-químicas relevantes (SCHULTZ, 2024).

O *biochar* apresenta potencial aplicação como condicionador de solos, podendo contribuir para a melhoria da fertilidade, retenção de água e disponibilidade de nutrientes, além de favorecer a recuperação de áreas degradadas (BOSCHIERO, 2023). Nesse contexto, a avaliação de sua viabilidade deve considerar não apenas suas propriedades agrônômicas, mas também o atendimento a critérios normativos, especialmente quanto à presença de metais potencialmente tóxicos.

Dessa forma, o presente estudo busca uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente adequada para a gestão do lodo biológico industrial. Ao propor sua valorização por meio da produção de *biochar*, a pesquisa contribui para o atendimento às diretrizes da PNRS, promovendo o aproveitamento de resíduos e incentivando práticas mais sustentáveis no setor industrial.

OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo geral produzir *biochar* a partir da pirólise de lodo biológico proveniente do tratamento de efluentes industriais e sanitários de uma indústria automotiva localizada na Região Metropolitana de Curitiba, e avaliar sua viabilidade como insumo para o condicionamento e melhoramento de solos.

Como objetivos específicos, buscou-se:

- Produzir *biochars* sob diferentes condições de pirólise;
- Caracterizar o lodo in natura e os materiais obtidos por meio de análises físico-químicas;
- Avaliar a influência das condições de processo nas propriedades dos *biochars*;
- Verificar a conformidade das concentrações de metais potencialmente tóxicos com os limites estabelecidos pela Instrução Normativa SDA nº 7/2016 do MAPA.

METODOLOGIA

O estudo foi conduzido utilizando lodo biológico (secundário) coletado na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de uma indústria automotiva de grande porte. Esta ETE opera com um sistema aeróbio de lodos ativados, tratando de forma conjunta os efluentes sanitários e os efluentes industriais previamente condicionados da planta. As amostras in natura foram inicialmente caracterizadas quanto ao seu teor de umidade (metodologia adaptada da ASTM D3173:2025), submetendo-se as amostras à secagem em estufa a 105°C até a obtenção de massa constante. O teor de cinzas foi determinado por gravimetria após calcinação em forno mufla a 750°C por 2 horas, em procedimento adaptado da norma ASTM D3174:2018. A análise da concentração total de metais do lodo in natura foi realizada por um laboratório externo, empregando o método de Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES).

Para viabilizar a adequação do lodo biológico à normativa agrícola SDA nº 7/2016 quanto à presença de metais pesados, implementou-se uma etapa de extração via lavagem ácida. Inspirada na abordagem de Stylianou et al. (2007), que constatou a superioridade do ácido sulfúrico no tratamento de lodos, a metodologia empregou uma solução de



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



H₂SO₄ na concentração 1:10 (v/v) com proporção sólido-líquido de 1:5 (m/v). Para padronizar o procedimento e permitir uma comparação direta de eficiência, optou-se por aplicar este mesmo agente em dois momentos distintos: antes da conversão térmica (pré-tratamento) e após a obtenção do *biochar* (pós-tratamento). A mistura permaneceu sob agitação constante durante 1 hora para favorecer a solubilização dos metais, sendo posteriormente submetida à filtração a vácuo. O material sólido retido no filtro foi lavado sucessivas vezes com água destilada até atingir a neutralização (pH em torno de 7). O líquido lixiviado recolhido em ambas as etapas foi devidamente armazenado e analisado por ICP-OES para a quantificação exata da eficiência de extração e remoção dos contaminantes.

A conversão termoquímica do material foi conduzida em um reator de vidro borossilicato hermeticamente vedado, acoplado a um forno tubular cilíndrico (marca EDG, modelo FT-HI/40). Foram processadas amostras com massas variando entre 50 e 200 g. O processo de pirólise lenta operou com uma taxa de aquecimento constante de 5°C/min, partindo da temperatura ambiente até atingir três temperaturas finais distintas estipuladas para o estudo: 450°C, 550°C e 600°C. O tempo de residência foi fixado em 30 minutos na temperatura máxima, seguido por resfriamento natural no interior do equipamento. O arranjo experimental gerou seis amostras principais: três submetidas à lavagem ácida antes da pirólise (série B_{pré}) e três que receberam o tratamento ácido apenas após a conversão (série B_{pós}). O rendimento gravimétrico de cada amostra foi calculado rigorosamente em base seca, descontando-se a umidade do lodo para garantir uma comparação precisa da conversão real da massa sólida. A Tabela 1 sumariza a identificação e as condições operacionais empregadas no preparo das amostras de *biochar*, onde TA representa a taxa de aquecimento (°C min⁻¹) e TR o tempo de residência (min) na temperatura máxima.

Tabela 1. Identificação e condições de preparo dos *biochars*.

Fonte: Autor.

BIOCHARS	TA (°C min ⁻¹)	TR (min)	Temperatura final (°C)	Tratamento
B1 _{pré}	5	30	450	Pré lavagem ácida
B2 _{pré}	5	30	550	Pré lavagem ácida
B3 _{pré}	5	30	600	Pré lavagem ácida
B1 _{pós}	5	30	450	Pós lavagem ácida
B2 _{pós}	5	30	550	Pós lavagem ácida
B3 _{pós}	5	30	600	Pós lavagem ácida

Então, os *biochars* finais foram avaliados por meio de Análise Elementar (CHN) utilizando o equipamento Perkin Elmer 2400 Series II para determinar os teores percentuais de Carbono (C), Hidrogênio (H) e Nitrogênio (N). Esses resultados foram convertidos para as razões atômicas H/C e C/N, fundamentais para avaliar a recalcitrância (estabilidade) e o potencial de fornecimento de nutrientes do material. Por fim, as concentrações finais de metais na série B_{pós} foram calculadas a partir dos dados do lixiviado, aplicando-se uma correção matemática essencial que considera a redução de massa volátil (rendimento da pirólise). Esta correção garantiu a avaliação correta do efeito de enriquecimento ou concentração mineral que a matriz de carbono sofre durante a degradação térmica.

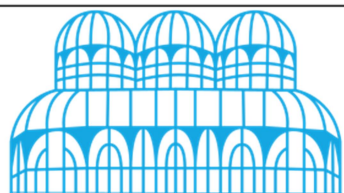
RESULTADOS

O rendimento do processo de pirólise apresentou uma tendência clara de redução associada ao aumento da temperatura. Nas amostras submetidas ao pré-tratamento ácido (série B_{pré}), o rendimento em base seca variou de 55% a 450 °C para 47% a 600 °C. Já nos *biochars* que receberam o tratamento ácido após a pirólise (série B_{pós}), os rendimentos foram sistematicamente menores, caindo de 52% (450 °C) para 40% (600 °C), o que indica uma expressiva perda de massa adicional pela remoção de componentes inorgânicos e solúveis da matriz carbonácea. A Tabela 2 apresenta os resultados dos rendimentos para cada uma das amostras.

Tabela 2. Rendimento dos *biochars*.

Fonte: Autor.

BIOCHARS	Temperatura final (°C)	R (%)
B1 _{pré}	450	55
B2 _{pré}	550	50



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



B3 _{pré}	600	47
B1 _{pós}	450	52
B2 _{pós}	550	41
B3 _{pós}	600	40

A análise elementar (CHN) é essencial para prever o desempenho agrônômico do *biochar*, pois os teores de carbono e nitrogênio, aliados à relação C/N, definem seu potencial de fertilidade e aporte de nutrientes. Adicionalmente, a determinação da razão H/C é fundamental para avaliar o grau de aromaticidade e atestar a estabilidade ambiental da estrutura carbonácea a longo prazo (SCHULTZ, 2024).

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise elementar e das razões H/C e C/N.

Tabela 3. Análise elementar e razões CHN.

Fonte: Autor.

Amostra	C (%)	H (%)	N (%)	H/C	C/N
B1 _{pré}	44,41	2,67	6,05	0,72	8,56
B2 _{pré}	43,54	1,87	5,06	0,48	10,06
B3 _{pré}	44,34	1,73	5,08	0,48	10,19
B1 _{pós}	36,51	2,96	5,69	0,95	7,49
B2 _{pós}	37,93	1,93	5,08	0,60	8,71
B3 _{pós}	33,88	1,68	4,04	0,60	9,78

A composição química dos *biochars* (Tabela 3) foi significativamente influenciada pela temperatura de pirólise e pelo momento de aplicação do tratamento ácido. Os teores de carbono variaram de 33,88% (B3_{pós}) a 44,41% (B1_{pré}). A série submetida à pré-lavagem ácida (B_{pré}) apresentou teores carbonáceos sistematicamente maiores (diferença de 8 a 11 pontos percentuais) que a série de pós-lavagem (B_{pós}), indicando que o tratamento ácido pós-pirólise causou a remoção de compostos carbonáceos da matriz. Os valores da série B_{pré} alinham-se aos reportados na literatura para *biochars* de lodo (AGRAFIOTI et al., 2013; TARELHO et al., 2020).

A razão atômica H/C, indicador de estabilidade, apresentou valores predominantemente inferiores a 0,7 (variando de 0,48 a 0,95). Estes resultados indicam uma estrutura altamente aromática, de elevada recalcitrância química e com potencial para sequestro de carbono a longo prazo no solo (SCHULTZ, 2024). Observou-se, ainda, uma tendência de aumento da estabilidade (redução do H/C) com a elevação da temperatura, reflexo da remoção preferencial de hidrogênio e oxigênio para a fase gasosa (TARELHO et al., 2020; VILAS-BOAS et al., 2021). Contudo, ressalta-se que esse elevado grau de condensação aromática confere um caráter predominantemente hidrofóbico aos materiais.

Quanto ao potencial nutricional, o teor de nitrogênio variou entre 4,04% e 6,05%, sofrendo redução nas maiores temperaturas térmicas devido à volatilização, comportamento corroborado por Vilas-Boas et al. (2021) e Agrafioti et al. (2013). As baixas razões C/N obtidas (7,49 a 10,19) são típicas de *biochars* de matrizes residuais urbanas ou industriais, contrastando fortemente com as altas relações observadas em biomassas lignocelulósicas (SCHULTZ, 2024). Do ponto de vista agrônômico, essa baixa relação é vantajosa, pois evita a imobilização microbiana por demanda de carbono e favorece a disponibilização de nitrogênio no sistema solo-planta (LU et al., 2015).

Avaliando os parâmetros integrados, a amostra B1_{pré} (450 °C) destaca-se como a mais equilibrada para aplicação agrônômica, reunindo os maiores teores de carbono e nitrogênio e uma razão C/N favorável (8,56). De forma geral, os *biochars* produzidos evidenciaram dupla aptidão: atuam como sumidouros estáveis de carbono e como fontes complementares de nitrogênio para a melhoria da fertilidade do solo.

A caracterização dos metais potencialmente tóxicos nos *biochars* com pós-tratamento ácido (B1_{pós} – 450°C, B2_{pós} – 550°C e B3_{pós} – 600°C) foi realizada por ICP-OES, conforme metodologia previamente descrita. Foram quantificados alumínio, chumbo, cobalto, cobre, cromo e ferro, considerando as concentrações no lodo in natura, no *biochar* após pirólise e no material final após o tratamento ácido.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9° CONRESOL

9° Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



A pirólise promoveu a concentração dos metais na matriz carbonácea, em decorrência da redução de massa do material, com rendimentos de 52%, 41% e 40% para as temperaturas de 450°C, 550°C e 600°C, respectivamente. Esse efeito eleva proporcionalmente os teores metálicos no *biochar* em relação ao material precursor e deve ser considerado na interpretação dos resultados.

De modo geral, observou-se aumento na eficiência de remoção dos metais com a elevação da temperatura de pirólise, conforme ilustrado na Figura 1. O ferro apresentou as maiores taxas de remoção, atingindo até 90% na condição de 600°C, seguido por cobre (67–68%) e cobalto (45–55%). O alumínio apresentou forte dependência da temperatura, com aumento expressivo da remoção de 5% para 58%, enquanto o cromo também demonstrou incremento significativo, variando de 14% para 74%, indicando maior mobilidade em *biochars* produzidos em temperaturas mais elevadas.

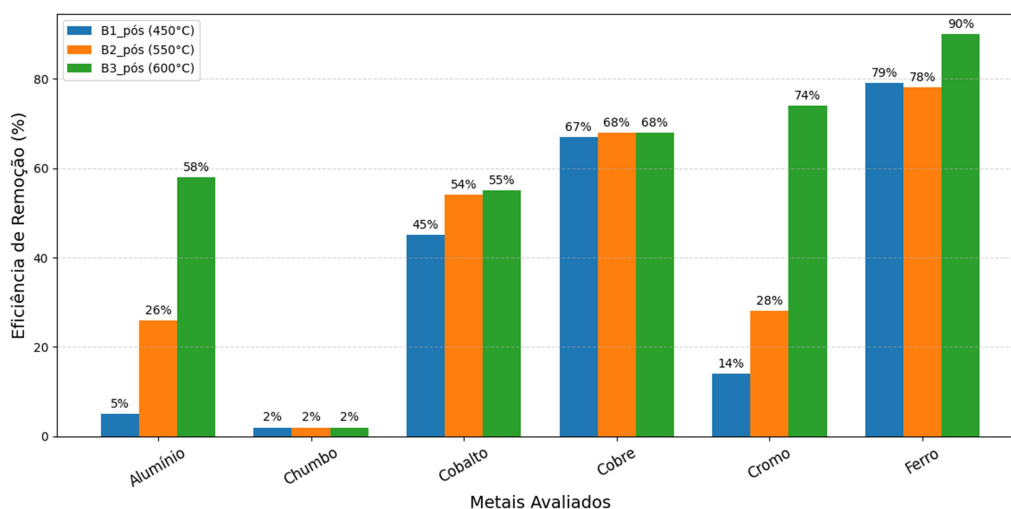
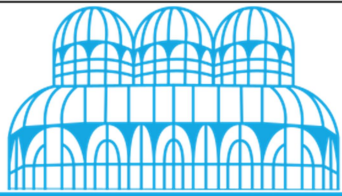


Figura 1: Eficiência de remoção de metais no pós-tratamento ácido dos *biochars*. Fonte: Autor.

Em contraste, o chumbo apresentou baixa mobilidade em todas as condições avaliadas, com eficiência de remoção próxima de 2%, sugerindo forte estabilização na matriz carbonácea ou associação a frações de baixa solubilidade, conforme observado por Lu et al. (2015) e Stylianou et al. (2007).

Apesar do aumento na eficiência de remoção para alguns elementos, a análise normativa evidenciou restrições relevantes para aplicação agrícola. Conforme apresentado na Figura 2, o chumbo atingiu concentrações finais entre 176,40 e 180,49 mg/kg nas amostras produzidas em temperaturas mais elevadas, excedendo o limite de 150 mg/kg estabelecido pela Instrução Normativa SDA nº 7/2016. Esse comportamento está associado à combinação entre baixa eficiência de remoção e efeito de concentração decorrente da pirólise.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026



Figura 2: Concentração de chumbo em B1_{pós}, B2_{pós} e B3_{pós} e limite normativo. Fonte: Autor.

O cromo, por sua vez, apresentou não conformidade em todas as amostras, com concentrações variando entre 23,52 e 63,30 mg/kg, conforme ilustrado na Figura 3, representando valores de 11 a 31 vezes superiores ao limite normativo de 2 mg/kg. Embora a eficiência de remoção tenha aumentado com a temperatura, os elevados teores iniciais e o efeito de concentração mantiveram os valores finais acima do permitido.

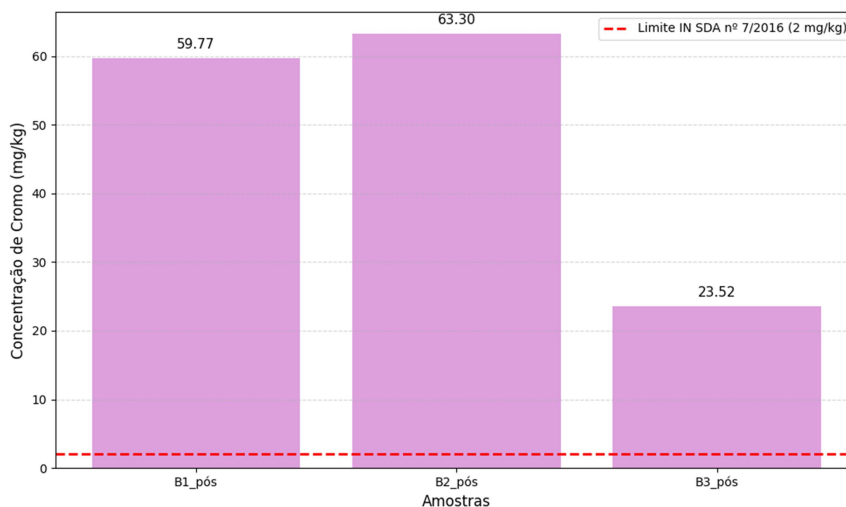


Figura 3: Concentração de cromo em B1_{pós}, B2_{pós} e B3_{pós} e limite normativo. Fonte: Autor.

A presença de cromo nos *biochars* requer atenção adicional devido à possível ocorrência da forma hexavalente (Cr^{6+}), altamente tóxica, móvel e carcinogênica, mesmo em pequenas proporções (MARONEZI et al., 2019). De forma similar, o chumbo constitui um contaminante crítico devido ao seu caráter cumulativo e elevada toxicidade, especialmente considerando vias indiretas de exposição, como a ingestão de partículas contaminadas (NAVA et al., 2011).

Dessa forma, os *biochars* avaliados não atenderam aos limites estabelecidos pela Instrução Normativa SDA nº 7/2016 para aplicação direta como condicionadores de solo, mesmo após o pós-tratamento ácido com H_2SO_4 . Os resultados indicam que o protocolo adotado não foi suficiente para promover a descontaminação adequada da matriz carbonácea.

A literatura indica que a eficiência de remoção de metais pode ser ampliada mediante otimização das condições operacionais e utilização de agentes extratores mais eficazes. Li et al. (2023), por exemplo, reportaram remoções superiores a 95% para diversos metais utilizando ácido fosfórico em condições controladas. Assim, ajustes no tipo de



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



ácido, concentração, temperatura e tempo de contato representam estratégias promissoras para viabilizar a adequação do *biochar* aos critérios normativos.

CONCLUSÕES

A produção de *biochar* a partir de lodo biológico de estação de tratamento de efluentes de uma indústria automotiva resultou em materiais com propriedades físico-químicas relevantes para aplicações ambientais. Os *biochars* obtidos nas temperaturas de 450°C, 550°C e 600°C apresentaram elevada estabilidade química, evidenciada pelas baixas razões H/C, indicando potencial de persistência no ambiente. As razões C/N observadas sugerem contribuição para a fertilidade do solo.

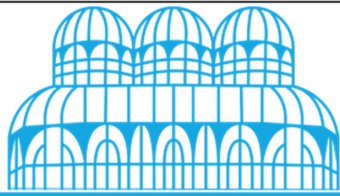
Entretanto, os teores de metais potencialmente tóxicos, especialmente cromo e chumbo, permaneceram acima dos limites estabelecidos pela Instrução Normativa SDA nº 7/2016, mesmo após o pós-tratamento ácido. Esse resultado inviabiliza a aplicação agrícola direta dos materiais nas condições avaliadas e evidencia a limitação do protocolo de descontaminação adotado.

Dessa forma, embora a pirólise se apresente como uma alternativa promissora para a valorização do lodo biológico, sua aplicação depende da otimização das etapas de remoção de metais, incluindo ajustes nas condições operacionais do tratamento ácido.

Para estudos futuros, recomenda-se o desenvolvimento de estratégias mais eficientes de descontaminação e a avaliação do desempenho agrônômico dos *biochars* em condições reais, visando sua aplicação segura e em conformidade com a legislação vigente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agrafioti, E. et al. Biochar production by sewage sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 101, p. 72-78, maio 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237013000454?via%3Dihub>. Acesso em: 10 jun. 2025.
2. Andreoli, Carlos V.; Sperling, Marcos Von; Fernandes, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2014. 444 p. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 6).
3. Associação Brasileira de Engenharia Ambiental e Sanitária (ABES). **XIX SILUBESA**. Pernambuco, 2020. Disponível em: <https://abesnacional.com.br/XP/XPEasyArtigos/Site/Uploads/Evento46/TrabalhosCompletoPDF/III-051.pdf>. Acesso em: 20 maio 2025.
4. Boschiero, B. N. Biochar ou biocarvão: O que é e qual seu potencial de uso na agricultura? 2023. **Agroadvance**. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-biochar-biocarvao-uso-na-agricultura/>. Acesso em: 10 de jun. 2025.
5. Brasil. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.
6. Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Instrução Normativa SDA nº 7, de 12 de abril de 2016**. Altera os anexos IV e V da Instrução Normativa SDA nº 27, de 05 de junho de 2006. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 abr. 2016.
7. Li, C. et al. The fate of heavy metals and risk assessment of heavy metal in pyrolysis coupling with acid washing treatment for sewage sludge. **Toxics**, v. 11, n. 5, p. 447, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2305-6304/11/5/447>. Acesso em: 1 jun. 2025.
8. Lu, T. et al. Characteristic of heavy metals in biochar derived from sewage sludge. **J Mater Cycles Waste Manag**, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0366-y>. Acesso em: 1 nov. 2025.
9. Maronezi, V. et al. Mecanismos de remoção de cromo(VI) do solo pela interação entre matéria orgânica e ferro(III). **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 40, n. 2, p. 17-33, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.33958/revig.v40i2.645>. Acesso em: 30 nov. 2025.
10. Nava, I. A. et al. Disponibilidade dos metais pesados tóxicos cádmio, chumbo e cromo no solo e tecido foliar da soja adubada com diferentes fontes de NPK+ZN. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 35, n. 5, p. 884-892, set./out., 2011.
11. Pacobello, D. R. et al. Estudo das práticas de sustentabilidade em grandes empresas químicas na região metropolitana de Campinas/SP. **Gestão & Regionalidade**, São Caetano do Sul, v. 38, n. 115, p. 42-51, set./dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.13037/gr.vol38n115.7506>.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



12. Schultz, J. et al. Tannin Industry Waste-Derived Porous Carbon: An Effective Adsorbent from Black Wattle Bark for Organic Pollutant Removal. **Sustainability**, v. 16, n. 601, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/2/601>. Acesso em: 21 mai. 2025.
13. Stylianou, M. A. et al. Effect of acid treatment on the removal of heavy metals from sewage sludge. **Desalination**, Amsterdam, v. 215, p. 73–81, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.11.015>. Acesso em: 10 jun. 2025.
14. Tarelho, L. A. C. et al. Biochar from pyrolysis of biological sludge from wastewater treatment. **Energy Reports**, Amsterdam, v. 6, n. 1, p. 757-763, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.09.063>. Acesso em: 1 nov. 2025.
15. Vilas-Boas, A. C. M. et al. Biochar from slow pyrolysis of biological sludge from wastewater treatment: characteristics and effect as soil amendment. **Biofuels, Bioprod. Bioref.**, v. 15, p. 1054-1072, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bbb.2220>. Acesso em: 1 nov. 2025.