

# Pirólise de passivo de aterro de resíduos industriais para geração de carvão

*Pyrolysis of landfill liability of industrial waste for charcoal generation*

Fabício Weiss<sup>1</sup> , Ênio Leandro Machado<sup>1\*</sup> , Adriane de Assis Lawisch Rodriguez<sup>1</sup> , Diosnel Antonio Rodriguez Lopez<sup>1</sup> , Aline Strothmann<sup>1</sup> 

## RESUMO

Neste estudo foi avaliada a capacidade de produção de carvão por meio de resíduos classe II A aterrados em uma fundação de proteção ambiental na região central do estado do Rio Grande do Sul. As amostras foram compostas (em proporção massa/massa) de 40% plástico, 25% papel/papelão, 25% espumas e borrachas sintéticas e 10% tecido de algodão e tripas de celulose. Empregou-se técnica de pirólise de baixa temperatura (350°C) com uma rampa de aquecimento de 2,70°C min<sup>-1</sup> e tempo de residência de 30 minutos. Os experimentos foram feitos com e sem catalisador, sendo 25% de catalisador constituído de argila vermelha. Nas amostras brutas e pirolisadas foram avaliados o poder calorífico inferior (PCI), o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico útil (PCU). Nas mesmas amostras também se caracterizaram carbono orgânico, teor de cinzas, cloretos, bem como alumínio, antimônio, bário, cádmio, cálcio, chumbo, cobalto, cobre, cromo total, ferro, magnésio, manganês, níquel, potássio, prata, sódio e zinco. As amostras pirolisadas com catalisador apresentaram valores de PCU de 5.473 kcal kg<sup>-1</sup>, tendo característica interessante para geração de energia, porém a presença de metais pesados, especialmente Ni e Cr, merece atenção quanto ao uso como combustível. A potencialidade para formulação de adubos também é crítica, sendo discutida na presente pesquisa.

**Palavras-chave:** aterro; passivo ambiental; pirólise; pirólise catalítica; carvão.

## ABSTRACT

In this study, the capacity to produce coal from Class IIA residues landed in an Environmental Protection Foundation in the central region of the state of Rio Grande do Sul was evaluated. The samples were composed (in mass/mass ratio) of 40% plastic, 25% paper/cardboard, 25% foam and synthetic rubbers, and 10% cotton fabric and cellulose casings. Low temperature (350°C) pyrolysis technique was used with a heating ramp of 2.70°C min<sup>-1</sup> and a residence time of 30 minutes. The experiments were done with and without catalyst, with 25% catalyst, consisting of red clay. In the pre-crude and pyrolysates, the Lower Calorific Power (LCP), the Higher Calorific Power (HCP), and the Useful Calorific Power (UCP) were obtained. The samples also characterized organic carbon, ash content, chlorides, as well as aluminum, antimony, barium, cadmium, calcium, lead, cobalt, copper, total chromium, iron, magnesium, manganese, nickel, potassium, silver, sodium, and zinc. Pyrolyzed samples with catalyst showed PCU values of 5.473 kcal kg<sup>-1</sup>, having an interesting characteristic for energy generation. However, the presence of heavy metals, especially Ni and Cr, deserves attention regarding their use as fuel. The potential for fertilizer information is also critical, being discussed in this research.

**Keywords:** landfill; environmental liability; pyrolysis; catalytic pyrolysis; charcoal.

## INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento dos processos termoquímicos nas últimas décadas, surgiram tendências de que aterros sanitários e aripes sejam formas temporárias de armazenamento de resíduos, com referência importante para recuperação da área e do passivo ambiental, agregando potencial de retirada do valor energético contido nos resíduos e produtos como potenciais aplicações para catálise, meios de controle para contenção de lixiviação de metais e nutrientes em solos (KALYANI; PANDEY, 2014; ABDEL-SHAFFY; MANSOUR, 2018).

Assim sendo, a opção entre incineração, gaseificação, pirólise e pirólise catalítica passou a ser uma potencial de processamento desses resíduos, os quais englobam uma grande gama de componentes, desde recicláveis até resíduos contaminados com hidrocarbonetos e metais pesados (BALIA, 2018). Além disso, os processos térmicos de tratamento podem ser aliados da legislação aplicada no Brasil, que, por sinal, está toda fundamentada na Lei Federal nº 12.305, de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a qual deixa claro que o gerador de resíduos é responsável pela gestão desde a sua geração até a destinação ambientalmente adequada, sendo corresponsável por

<sup>1</sup>Universidade de Santa Cruz do Sul – Santa Cruz (RS), Brasil.

\*Autor correspondente: enio@unisc.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Universidade de Santa Cruz do Sul/Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Recebido: 02/10/2020 – Aceito: 26/08/2021 – Reg. Abes: 20200348

quaisquer danos causados ao meio ambiente, e deve-se primar pela não geração de resíduos, buscando alternativas para a correta destinação, e somente a fração inservível deverá ser encaminhada para aterro sanitário (BRASIL, 2010).

Recentemente foi lançada a Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019 (BRASIL, 2019), que disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos por processos térmicos, incluindo a pirólise. Hoje em dia, grande parte dos resíduos é destinada a aterros, mesmo os de origem industrial, nem sempre projetados e operados de forma adequada, passando a ser um passivo ambiental com alto risco de poluição de recursos naturais (JANAS; ZAWADZKA, 2018).

Nesse sentido, a busca por tecnologias viáveis técnica e economicamente para a recuperação dessas áreas deve ser explorada pelas empresas e pelos governos (KIM; JEONG, 2017; BALIA, 2018), no entanto a questão técnica envolvendo a recuperação de aterros com resíduos por meio do uso da pirólise catalítica é pouco discutida no meio acadêmico, berço das proposições de novas alternativas para o setor produtivo industrial.

A pirólise consiste na degradação térmica de um resíduo em um ambiente com baixo ou nenhum teor de oxigênio em temperaturas entre 500 e 850°C (CHIRICO, 2013; CZAJCZYŃSKA *et al.*, 2017). O processo tem obtido destaque no gerenciamento de resíduos, pois ele é capaz de reduzir em até 90% o volume desses resíduos, além de possibilitar o fornecimento de matérias-primas para indústrias de diversos segmentos (TÓRRES, 2014; KASARA *et al.*, 2020). Por outro lado, a questão econômica tem pressionado cada vez mais a balança para a recuperação desses aterros, pois são estoques de resíduos com alto valor energético e econômico, tanto para sistemas de tratamento térmico, na geração de energia e combustíveis, como na recuperação de metais (BAMDAD *et al.*, 2018). Mas os custos não estão ligados somente ao processo tecnológico de recuperação em si; envolvem toda a questão de volume de resíduos e a logística de transporte até grandes incineradores e autofornos de cimento (KIM; JEONG, 2017).

A pirólise catalítica reduziu drasticamente a temperatura de processo em relação à pirólise convencional, cerca de 450°C para o tratamento de resíduos não renováveis e renováveis. O uso de catalisadores, de maneira especial aqueles de baixo custo, como zeólitas, argila e material bimetálico (Fe-Ni, Mo-Ni e  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), também proporcionou maior seletividade no que se refere aos produtos de pirólise desejados, tornando-se uma opção possível para gerenciamento de resíduos e para potencializar processos de recuperação de energia (FADILLAH *et al.*, 2021).

Logo, a construção de usinas de pirólise, por exemplo, torna-se uma alternativa na recuperação de aterros, sobretudo pela capacidade de produção de combustíveis capazes de produzir energia elétrica, por meio de uma gama de plásticos e papéis, entre outros resíduos existentes em aterros, cabendo somente estudos mais aprofundados de caracterização do passivo no que tange a sua composição gravimétrica, argila, cinzas e umidade (BURLAKOV *et al.*, 2019).

Também deve ser considerado que a obtenção do carvão pela pirólise estabelece a potencial criação de cenários de vários mecanismos para a economia circular: reduzir o efeito estufa, melhorar a qualidade dos solos, purificar a água, imobilizar substâncias tóxicas no solo, controlar o excesso de nutrientes, tanto no solo como em jardins filtrantes, ser suporte de purificadores de ar, água e como suporte para nutrientes, visando aperfeiçoar a produção de metano em processos de anaerobiose (SALETNIK *et al.*, 2019; MARTÍNEZ, 2021; DE SOUZA; PACCA, 2021).

Dessa forma, esta pesquisa propôs investigar o método de tratamento com pirólise e pirólise/argila vermelha (proposta como pirólise catalítica) para passivos de unidade de aterro classe II A em uma central de gestão de resíduos de consórcio de empresas localizada no sul do Brasil. Analiticamente foram caracterizados os valores de concentração de cloretos e metais pesados, bem como poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico útil (PCU), associando a eficiência de formação das frações de carvão e de consideração a potenciais aplicações do produto do tratamento térmico.

## METODOLOGIA

### Caracterização do local de estudo

As amostras para o processo de pirólise deste estudo foram constituídas de frações de resíduos classe II A, conforme classificação da Norma Brasileira (NBR) 10.004 (ABNT, 2004), provenientes de célula desativada de aterro localizada em uma área pertencente a uma fundação de proteção ambiental no sul do Brasil. Essa unidade apresenta 15 anos de tempo de aterramento, 6.300 m<sup>3</sup> de resíduos oriundos de empresas dos setores fumageiro, alimentício, metal-mecânico e de materiais plásticos e poliméricos.

### Coleta e preparação das amostras para o método de pirólise

As amostras para os ensaios de pirólise foram coletadas ao longo da célula de aterro classe II A no local anteriormente descrito, tendo características de amostragem estratificada uniformes com o cuidado de representatividade quanto à distribuição e profundidade dos pontos de coleta (FILIZOLA *et al.*, 2006). De dez pontos uniformemente distribuídos na superfície da célula, foram retiradas alíquotas de 5 kg de resíduos, considerando todos os tipos na mistura heterogênea, incluindo: plásticos, papel, papelão, rejeito, espumas e borrachas sintéticas, tecidos de algodão e tripas de celulose.

Após mistura das frações das amostras coletadas, foram retiradas alíquotas de cada um dos tipos de material da mistura heterogênea em alíquotas de 40% plástico, 25% papel/papelão, 25% espumas e borrachas sintéticas e 10% tecido de algodão e tripas de celulose (% m/m). Essas proporções foram informadas pela direção da fundação como a representatividade do passivo ali disposto, tendo como base os controles operacionais das células do aterro.

Essas alíquotas constituíram uma amostra individual de cada tipo de resíduo, com prévia trituração (moinho tipo Willey, marca De Leo) para fração de 5 mm, com secagem nas condições de 60°C por sete dias, até obtenção de peso constante.

### Caracterizações analíticas

Foram determinados os valores de PCS, PCI e PCU das amostras de resíduo bruto, carvão com e sem catalisador, aplicando-se calorímetro adiabático da marca Parr Instrument, pressurizada a 40 atmosferas com oxigênio puro, considerando a triplicata de cada amostra. Os procedimentos de análise e cálculo seguiram o manual do calorímetro 1341 Plain Jacket Bomb, bem como Gonçalves *et al.* (2009).

Após a realização da determinação dos poderes caloríficos, lavou-se a bomba calorimétrica com 100 mL de água deionizada, visando ao uso desse conteúdo para análise de cloretos e metais. Esse processo foi feito em

triplicata. A preparação da amostra ocorreu com a filtragem da água de lavagem da bomba calorimétrica, com posterior filtração da fração sobrenadante, por meio de filtros para seringa de 0,22  $\mu\text{m}$  da marca Filtrilo. O filtrado foi acondicionado em placa de Petri e posto em forno para evaporação a 65°C por sete dias até massa constante. O valor final foi decorrente da diferença de massa antes/depois da evaporação. Com esse lixiviado filtrado, foram feitas as análises de cloretos e metais: alumínio, antimônio, bário, cádmio, cálcio, chumbo, cobalto, cobre, cromo total, ferro, magnésio, manganês, níquel, potássio, prata, sódio e zinco. Todas as análises foram realizadas conforme a metodologia *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017).

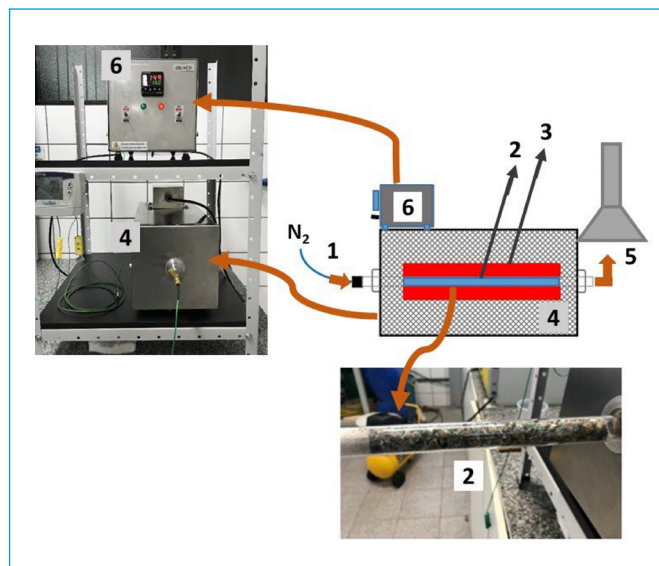
Já a análise de carbono orgânico foi executada nas amostras bruta e pirolisadas, levando-se em conta a metodologia contida no *Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos* (BRASIL, 2017).

### Ensaio de pirólise não catalítica e catalítica

Os ensaios foram feitos em pirolisador com reator do tipo leito fixo, marca Sanchis, com as seguintes especificações: zona de aquecimento com resistência de 1.800 W, 220 V, 26,89 Ohms, 8,18 A e 2,59  $\text{W cm}^{-1}$ , envolvendo todo o tubo de quartzo de 3 cm de diâmetro por 25 cm de comprimento, no qual a amostra foi acondicionada para o tratamento de pirólise. Na Figura 1 podem ser observados os detalhes do pirolisador.

Os ensaios de pirólise foram feitos com temperatura máxima de 350°C, tendo taxas de aquecimento de 2,75°C por minuto, sendo 120 minutos o tempo necessário para atingir o patamar de 350°C, permanecendo por mais 30 minutos nessa temperatura, totalizando então 150 minutos. O arrefecimento até a temperatura ambiente (25°C) foi de forma natural, com o tubo de quartzo fora do forno.

Na Figura 2 pode ser visualizado o gráfico da rampa de aquecimento utilizada nos ensaios a 350°C. Valores aproximados para rampa de aquecimento foram utilizados pelos autores Enders *et al.* (2012) e Ahmad (2014), os quais indicam



**Figura 1** - Componentes do forno pirolisador: (1) fonte de purga ( $\text{N}_2$ ); (2) tubo de quartzo, (3) resistência elétrica para aquecimento; (4) preenchimento com material refratário; (5) sistema de exaustão; (6) central de controle de temperatura.

que o ideal é que a taxa de aquecimento seja menor que 10°C por minuto e o tempo de residência gire em torno de 15 a 20 minutos para favorecer a obtenção de carvão. No entanto, a fim de garantir que toda a amostra fosse pirolisada, foram escolhidos 30 minutos como tempo de residência.

Nos experimentos com pirólise catalítica, a única diferença foi o acréscimo de 25% m/m do catalisador constituído de argila vermelha, com teor de matéria orgânica de 2,5%, sendo o material coletado no Vale do Rio Pardo, RS, Brasil.

Para execução da pirólise, a amostra foi pesada em balança de precisão OHAUS PX5, sendo então carregado o tubo de quartzo com 10 g de amostra, e esta foi posteriormente inserida no forno. O resíduo bruto foi acondicionado de forma a ficar totalmente na zona de aquecimento do forno, para que todo o material recebesse a mesma intensidade de calor. Para garantir um ambiente inerte, foi mantida durante todos os ensaios vazão de 250 mL por minuto de  $\text{N}_2$ .

Para os ensaios de pirólise com catalisador, foi acrescido 25% m/m de argila vermelha fina, obedecendo-se às mesmas proporções da pirólise sem catalisador, gerando, assim, uma amostra com 12,5 g.

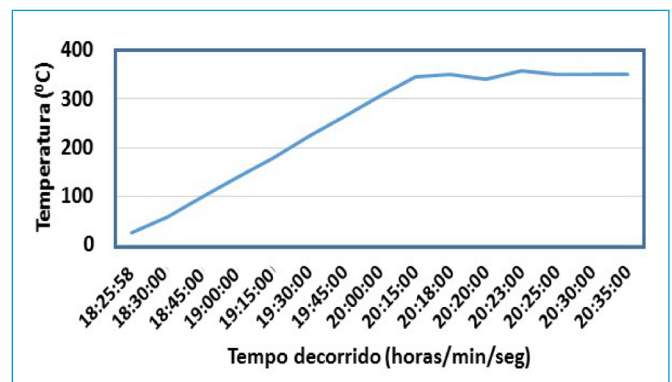
Todas as frações foram analisadas em triplicata. Após o processo de pirólise e resfriamento do tubo de quartzo, o carvão foi pesado, e o rendimento das frações do carvão, obtido pela diferença de massa das frações de resíduo bruto e do peso resultante de carvão.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização do local de estudo

Atualmente na fundação de proteção ambiental (FPA) em foco existem duas células de aterro, com resíduos provenientes de indústrias da região central do Rio Grande do Sul, totalizando cerca de 3.390  $\text{m}^3$  de resíduos perigosos (classe I) e 6.300  $\text{m}^3$  de resíduos não perigosos recicláveis (classe II A), conforme classificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10.004/2004. Ambas se encontram desativadas, aguardando a remoção dos resíduos ali depositados. Essa retirada do passivo tem como objetivo a minimização de riscos com impactos ambientais negativos, assim como a recuperação da área com o uso de tecnologia economicamente viável para a geração de energia/combustíveis por meio dos resíduos Classe II A.

Na FPA há uma usina de compostagem com área útil total de 10.250  $\text{m}^2$  e volume mensal licenciado de 2.950 toneladas de produção de fertilizante orgânico



**Figura 2** - Rampa de aquecimento dos ensaios de pirólise a 350°C.

classe A, com registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa). O material para compostagem é proveniente em sua grande maioria de pó de tabaco. Como a FPA já realiza a compostagem do pó de tabaco, e o resíduo pirolisado foi caracterizado como classe II A, buscou-se analisar preferencialmente os resultados do carvão, tendo em vista a possibilidade de servir como um agregado ao composto orgânico já produzido, melhorando as suas características de adsorbabilidade e promovendo a sua valorização comercial para aplicação no solo. Como se trata de um resíduo industrial de fração antropogênica, isso passa a ser crítico. Assim sendo, as caracterizações dos produtos de pirólise tiveram comparativos com o International Biochar Initiative (IBI), o British Biochar Foundation (BQM) e o European Biochar Foundation (EBC).

### Caracterização das amostras para os processos de pirólise

A principal referência internacional para o controle da composição dos materiais pirolisados envolve os padrões estabelecidos pelo IBI, pelo BQM e pelo EBC. Nesse caso, são controlados especialmente metais pesados, hidrocarbonetos aromáticos, bifenilas policloradas (PCBs), furanos e dioxinas.

No entanto, no presente trabalho, foram considerados aqueles parâmetros com maior potencial de impacto ambiental em função dos passivos de resíduos gerados no consórcio industrial que gerencia a área de aterro estudada. Na Tabela 1, podem ser observados os dados de caracterização da mistura

controlada dos resíduos para serem pirolisados. Os parâmetros de comparação estão associados com o anexo G da norma NBR 10.004/2004 para verificação do enquadramento do resíduo como classe I, classe II A ou classe II B.

Com exceção do alumínio, os resíduos a serem pirolisados se constituem como classe II A, segundo a NBR 10.004/2004. Isso considera a formulação que foi preparada em laboratório com as proporções citadas na metodologia para garantir uniformidade nos ensaios de pirólise, no entanto a maior referência de limites tolerados para substâncias tóxicas deverá seguir as normas do IBI, do BQM, e do EBC. Por exemplo, nos casos das normas anteriormente citadas, o níquel aparece com maior possibilidade de romper os valores em  $\text{mg.kg}^{-1}$  quando transformado em carvão. Isso porque o IBI estabelece faixa de 47-420  $\text{mg.kg}^{-1}$ , e o BQM e o EBC valores entre 10 e 50  $\text{mg.kg}^{-1}$  para os tipos *biochar high grade, premium e basic*, respectivamente. Somente no padrão *standard*, cujo valor tolerável é 600  $\text{mg.kg}^{-1}$ , talvez os limites não fossem ultrapassados.

Outro parâmetro importante de controle é o de cloretos. Segundo a Diretriz Técnica 01/2018 da Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler (Fepam), do estado do Rio Grande do Sul, o limite de cloretos (como HCl) não deve ultrapassar 1,8  $\text{kg.h}^{-1}$  de material a ser submetido a tratamento térmico. Logo, considerou-se importante o material a ser tratado ser analisado pós-combustão completa para esse íon também. No caso do material estudado, não poderiam ser pirolisados valores acima de 228,1  $\text{kg.h}^{-1}$ , considerando que ocorrerá concentração de cloretos no processo de pirólise.

### Ensaio de pirólise e pirólise catalítica com resíduos de aterro classe II A

Os ensaios de pirólise foram feitos com taxas de aquecimento prevendo a produção prioritária de carvão, bem como em um comparativo no qual a aplicação de argila avermelhada pudesse tornar mais efetivo o processo de pirólise. Na Tabela 2 podem ser observadas as diferentes condições de ensaio avaliadas.

A variação no rendimento do carvão sem a presença de catalisador entre o menor e o maior rendimento foi de 8,4%. Os rendimentos encontrados de carbonizado à temperatura de 350°C se aproximaram dos resultados obtidos por Chaib (2019), que trabalhou com resíduos verdes (galhos, folhas e ervas) de um horto à temperatura de 300°C e 30 minutos de patamar, obtendo rendimentos que variaram entre 70,4 e 73,2%.

Já a variação no rendimento do carvão com a presença de catalisador entre o menor e o maior rendimento foi de 1,27%. Comparando-se a variação com os ensaios sem o uso de catalisador, verifica-se que a presença de catalisador fez com que os rendimentos ficassem mais uniformes e a variação entre eles fosse menor.

O teor de cloretos foi de 7,86  $\text{g.kg}^{-1}$ , conforme Tabela 2. Segundo a Diretriz Técnica 01/2018 da Fepam, são permitidos até 1,8  $\text{kg.h}^{-1}$  de limites de emissão de cloretos, expressos como ácido clorídrico (HCl) para tratamento térmico de resíduos.

Com base no teor de cloretos contido no resíduo bruto analisado, afirma-se que poderiam ser tratados termicamente até 229  $\text{kg.h}^{-1}$  na unidade de pirólise quando esta estivesse em operação.

Os teores de cloretos do biochar resultante do processo de pirólise não catalítica e catalítica foram de 2,465 e 2,175  $\text{g.kg}^{-1}$ , respectivamente. Percebe-se que houve redução considerável no teor de cloretos da amostra bruta para o carbonizado produzido. A redução no teor de cloretos pode ser explicada, pois, conforme referência de Ushima e Franca (2018), os componentes de biomassa aquecidos até 400°C, tanto em regime de pirólise como de gaseificação, já perdem

**Tabela 1** - Dados de caracterização dos parâmetros inorgânicos do material submetido aos estudos de pirólise.

Parâmetro	Amostra bruta com digestão em calorímetro adiabático*	Amostra em branco com digestão em calorímetro adiabático*	Amostra bruta	Limite NBR 10.004 Anexo G
Metais	$\text{mg.L}^{-1}$	$\text{mg.L}^{-1}$	$\text{mg.kg}^{-1}$	$\text{mg.L}^{-1}$
Alumínio	0,51	0,04	90,3	0,2
Antimônio	< 0,005	< 0,005	-	-
Bário	< 0,5	< 0,5	-	0,7
Cádmio	< 0,001	< 0,001	-	0,005
Cálcio	2,00	0,08	369,15	-
Chumbo	0,003	0,003	-	0,01
Cobalto	< 0,001	< 0,001	-	-
Cobre	0,03	< 0,02	1,922	2
Cromo total	< 0,050	< 0,050	-	0,05
Ferro	0,14	< 0,02	23	0,3
Magnésio	0,128	< 0,020	20,76	-
Manganês	< 0,02	< 0,02	-	0,1
Níquel	0,78	0,58	38,4	-
Potássio	0,6	0,8	-	-
Prata	0,012	< 0,001	2,114	0,05
Sódio	2	0,6	269,17	200
Zinco	0,30	< 0,02	53,83	5
Cloretos	54,54	13,63	7,869	-

\*Mesmas condições da determinação de poder calorífico útil; NBR: Norma Brasileira. Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

de 20 a 50% do cloro. Além disso, os autores identificaram em estudos para a madeira a liberação de uma quantidade significativa de cloro na fase gasosa a baixas temperaturas (500°C), mas em sua maioria na forma de CH<sub>3</sub>Cl (cloreto de metila) e, em menor proporção, em outras formas não identificadas nos ensaios, provavelmente HCl ou alcatrões clorados.

O IBI (2015) estabelece os limites máximos de contaminantes permitidos para um biochar ser considerado aceitável. Sendo assim, podem ser observados na Tabela 3 os valores para os processos de pirólise com e sem catalisador, tendo a referência de verificação do enquadramento do tipo de biochar produzido nos ensaios avaliados (mesmo sendo o produto carvão).

Os teores de cádmio, cromo, cobalto, cobre e chumbo presentes nos carbonizados apresentaram valores abaixo dos limites estipulados pelo IBI. O níquel possui limites de 47 a 420 mg.kg<sup>-1</sup> segundo o IBI. Neste trabalho, obteve-se 319,01 mg.kg<sup>-1</sup> para o carvão produzido com a presença de catalisador, de acordo com o padrão aceitável pelo IBI. Já o carvão sem catalisador apresentou resultados de 754,21 mg.kg<sup>-1</sup>, valor acima do permitido. O teor de zinco permitido

variou de 416 a 7.400 mg.kg<sup>-1</sup>. Sendo assim, o carvão produzido sem a presença de catalisador ficou conforme o limite.

O carbonizado obtido sem a presença de catalisador exibiu maiores concentrações de alumínio, cálcio, cromo, magnésio, manganês, níquel, sódio e zinco. Já o carbonizado produzido na presença de catalisador apresentou maiores teores de bário, cádmio, chumbo, cobre, ferro, potássio e prata.

Assim, as concentrações de cobre, chumbo, zinco, cádmio e cromo foram maiores nos carbonizados do que na matéria-prima bruta. Esse fato pode ser explicado porque os metais pesados voláteis permaneceram na amostra com a temperatura de pirólise utilizada (LIU *et al.*, 2014). Além disso, percebe-se que todos os metais sofreram aumento de concentração entre a amostra bruta e os carbonizados, o que se explica pela redução de massa no carbonizado após a pirólise. Logo, as concentrações tendem a aumentar.

No Brasil, a Instrução Normativa nº 7, de 12 de abril de 2016 (BRASIL, 2016), define os limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo. Comparando-se os resultados obtidos de

**Tabela 2 - Resultado dos ensaios de pirólise sem catalisador e com catalisador\*.**

Ensaio (amostras)	Taxa de aquecimento (°C.min <sup>-1</sup> )	Temperatura máxima (°C)	Tempo de residência (min)	Rendimento do carvão (%)	Valor médio
A1	2,70	350	30	66,39	70,87 ± 4,24
A2				71,39	
A3				74,84	
A4*				66,15	66,58 ± 0,72
A5*				67,42	
A6*				66,19	

\*Amostras com catalisador.

Fonte: Elaborada pelos autores, 2022.

**Tabela 3 - Comparativos dos parâmetros de controle do IBI, do BQM e do EBC com os produtos obtidos pela pirólise.**

Parâmetro (mg.kg <sup>-1</sup> ) de matéria seca	(Pirólise) carvão	(Pirólise + argila vermelha) carvão	IBI	BQM		EBC	
				Tipo de biochar			
				High grade	Standard	Premium	Basic
As	-	-	13-100	10	100	13	13
Cd	0,7228	1,063	1,4-39	3	39	1	15
Cr	43,37	-	93-1.200	15	100	80	90
Cu	24,09	57,42	143-6.000	40	1.500	100	1.000
Hg	-	-	1-17	1	17	1	1
Ni	754,21	319,01	47-420	10	600	30	50
Pb	39,51	51,89	121-300	60	500	120	150
Zn	1.303,61	353,04	416-7.400	150	2.800	400	400
Se	-	-	2-200	5	100	-	-
Mo	-	-	-	10	75	-	-
F	-	-	-	-	-	-	-
Hidrocarbonetos aromáticos	-	-	-	20	20	4	12
PCB	-	-	-	0,5	0,5	0,2	0,2
Dioxinas e furanos (ng.kg <sup>-1</sup> )	-	-	-	20	20	20	20

PCB: bifenila policlorada.

Fonte: adaptado de Saletnik *et al.* (2019).

metais pesados, verifica-se que todos os contaminantes presentes no carvão analisado atendem aos parâmetros da normativa, com exceção do níquel, que resultou em concentrações maiores que a admitida.

Uma opção para deixar a concentração de níquel de acordo com o valor permitido pela Instrução Normativa nº 7/2016 (BRASIL, 2016), que estabelece o valor máximo de 70 mg kg<sup>-1</sup>, é realizar um *blend* entre o carvão produzido e outro material sem a presença do contaminante, de forma a baixar a concentração de níquel e, assim, poder utilizar o carvão para aplicação no solo, no entanto a recomendação seria investigar a principal contribuição dessa contaminação no resíduo a ser pirolisado, constatando como adequar a diminuição desse metal por seleção do material a ser pirolisado.

Levando-se em consideração as tendências de gerenciamento dos resíduos e a recuperação energética, é fundamental a determinação dos valores de PCU, PCI e PCS. Sendo assim, os resultados da Tabela 4 mostram os valores de poderes caloríficos determinados na amostra bruta e nos carbonizados produzidos a 350°C.

A amostra bruta do resíduo analisado, bem como os carbonizados produzidos, possui poder calorífico significativo, ou seja, seus valores de energia elevados permitem que tais materiais sejam recomendados para unidades de tratamento térmico como a pirólise, pois, conforme o Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos (Empresa de Pesquisa Energética, 2014), materiais com PCU acima de 2.000 kcal.kg<sup>-1</sup> já são tecnicamente viáveis para tratamento térmico.

O teor de cinzas para todas as matérias-primas utilizadas aumenta com a elevação da temperatura (BATISTA, 2018). Isso ocorre porque elementos como N, C, H, O e S são volatilizados durante o aquecimento, enquanto os sais inorgânicos não são volatilizados facilmente. O teor de cinzas tem relação com o teor de elementos inorgânicos presentes no carvão. Sendo assim, na Tabela 4, encontram-se os teores de cinzas da amostra bruta e do carvão/biochar produzido com e sem a presença de catalisador.

A variação entre a amostra bruta e o carvão com catalisador foi de 28,08%. Já a variação entre a amostra bruta e o carvão sem catalisador foi de 1,43%. Percebe-se que o carvão produzido com catalisador resultou em maior teor de cinzas. O teor de cinzas no biochar costuma variar entre 0,5 e 55%, dependendo do teor de cinzas da matéria-prima. Biochar produzido com cama de aviário pode conter até 45% em peso de cinzas (VERHEIJEN *et al.*, 2010).

O teor de cinzas do biochar produzido durante a pirólise de resíduos urbanos orgânicos variou entre 20,36 e 26,59% (HAJI *et al.*, 2013). Já os teores obtidos

neste estudo variaram entre 6,04 e 32,69%. Vê-se que a presença de catalisador resultou em maior teor de cinzas, pois o catalisador pode ter retido substâncias que não foram volatilizadas durante a pirólise. O teor de cinzas da matéria-prima bruta foi de 4,61%, enquanto Gonçalves *et al.* (2009) determinaram o teor de cinzas em resíduos sólidos urbanos e obtiveram 7,79% como resultado.

Os teores de carbono orgânico e umidade das amostras de carvão produzidos foram determinados conforme metodologia prevista no *Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos* (BRASIL, 2017) e se encontram na Tabela 4. A variação de carbono entre as amostras com e sem catalisador foi de 18,21%, e a variação entre a umidade, de 0,04%. O teor de carbono orgânico é usado para definir uma das três classes de carvão, segundo o IBI (2015), em que 10% é o teor mínimo de carbono orgânico que um material analisado deve conter para ser caracterizado como biochar. Teor de carbono igual ou superior a 60% é classificado como classe I, biochar com teor entre 30 e 60% é considerado classe II, e o carvão com teor de carbono, entre 10 e 30%, se enquadra como classe III. Analisando os resultados obtidos, pode-se verificar que os carbonizados produzidos se classificam como classe II pelo padrão IBI. Logo, poderiam ser caracterizados apenas como biochar. No entanto, considerando a composição gravimétrica da célula de aterro, seria correto defini-los como carvão.

## Aplicações do carvão na central de compostagem de pó de fumo

É preciso levar em conta que o caminho mais tradicional das aplicações do biochar no solo entende o biochar como um agregado à adubação orgânica ou a fertilizantes tradicionais. Um dos exemplos que podem ser considerados é o que consta da pesquisa desenvolvida por Trazzi *et al.* (2018), que referencia os ganhos com relação à capacidade de troca de cátions, à disponibilidade controlada de macro e micronutrientes, bem como à imobilização de substâncias orgânicas tóxicas, tais como atrazina e acetocloro. A parte microbiológica também é favorecida com a criação de núcleos de desenvolvimento de fungos na rizosfera, causando efeito positivo para a disponibilidade maior de nutrientes. Nesse mesmo estudo, são referendadas aplicações de 8, 16 e 32 toneladas/hectare, trazendo ganhos com maior presença de cálcio e fósforo e aumentando o teor de carbono orgânico e o pH do solo.

No entanto a referência de uso do biochar no Brasil deve considerar parâmetros detalhados na Instrução Normativa nº 27, de 2006, do Mapa (BRASIL, 2006). Assim sendo, podem ser observados na Tabela 5 alguns dados importantes para essa comparação.

Vê-se nos resultados anteriores que os parâmetros envolvendo níquel e cromo total não estariam adequados à norma do Mapa (BRASIL, 2006). Isso pode ter ocorrido para os resíduos classe II A analisados em função de a fundação onde foi realizado o trabalho atender também ao setor de galvanoplastia — uma possível contaminação pode ter aumentado tais valores. Mesmo assim, a confirmação de resíduo como classe II A se mantém no comparativo com o anexo G da NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004).

Quando observado o fertilizante produzido pela fundação, verifica-se a necessidade de uma adequação para a formulação, pois os metais anteriormente citados como acima dos valores de concentração exigidos pelo Mapa teriam de ser ajustados. Todavia, a medida de desenvolvimento da pesquisa exige que a avaliação de origem da contaminação possa ser efetiva em diminuí-la, buscando entender suas origens. Na prática efetiva que a fundação faz para os resíduos

**Tabela 4** – Teor de cinzas, carbono orgânico, umidade, PCI, PCS e PCU associados aos materiais para os processos de pirólise.

Parâmetros	Amostra bruta	Carvão (pirólise)	Carvão (pirólise + argila vermelha)
Teor de cinzas (% m/m)	4,61	6,04	32,69 (-25%)
Carbono orgânico (% m/m)	56,65	36,74	54,95
Umidade (%)	1,41	1,28	1,24
PCI (cal/g)	6.183	4.282	5.548
PCS (cal/g)	6.312	4.411	5.677
PCU (cal/g)	6.025	4.227	5.473

PCI: poder calorífico inferior; PCS: poder calorífico superior; PCU: poder calorífico útil. Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

**Tabela 5** - Conteúdo admissível de contaminantes no biochar, com base nos padrões de qualidade existentes no comparativo com os carvões obtidos nos processos de pirólise.

Metais (mg.kg <sup>-1</sup> )	Carvão (pirólise)	Carvão (pirólise/ argila)	Fertilizante da fundação	Instrução Normativa nº 27, de 5 de junho de 2006
Alumínio	1,970	869,84	-	-
Antimônio	-	-	-	-
Bário	13,25	769,88	263,2 ppm	-
Cádmio	0,7228	1,063	não detectado	3
Cálcio	7,681,92	3,251,8	3,66%	-
Chumbo*	39,51	51,89	não detectado	150
Cobalto	-	-	não detectado	-
Cobre	24,09	57,42	8,9 ppm	-
Cromo total	43,37	-	não detectado	2
Ferro	400	408,33	0,60%	-
Magnésio	718,07	214,8	0,58%	-
Manganês	24,09	4,2535	0,12%	-
Níquel	754,21	319,01	não detectado	70
Potássio	3,072,28	3,390,04	6,82%	-
Prata	25,78	41,25	-	-
Sódio	7,756,62	2,907,27	626,4 mg.kg <sup>-1</sup>	-
Zinco	1,303,61	353,04	63,3 ppm	-
Cloretos	2,465	2,175	-	-

\*Chumbo hexavalente

Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

classe I, não há direcionamento destes ao local de amostragem, tendo então as amostras efetivamente uma contaminação não controlada.

Como o mecanismo adotado para os ensaios foi com baixas temperaturas, consequentemente a geração do carvão foi elevada. Na região central do estado do Rio Grande do Sul, não se vislumbra uma aplicação técnica viável como obtenção de energia pela queima de carvão da pirólise. Sendo assim, a incorporação do carvão no solo, de forma controlada e conforme os parâmetros estabelecidos pela legislação brasileira, passou a ser uma alternativa factível. No caso da fundação analisada, mais atrativo ainda, por causa da atual produção em grande escala de fertilizante orgânico. Logo, para simplificar o processo, poderia ser constituído um composto único, parte por fertilizante orgânico, parte por carvão, o qual poderia ser utilizado para melhoramento, correção e recuperação do solo e produção de mudas.

Muitas pesquisas para a continuidade do desenvolvimento da aplicação do carvão para descontaminação de solo e água exploram aspectos de microporosidade, hidrofobicidade, área superficial, adsorbabilidade de inorgânicos e orgânicos nesses meios, como observado por Singh *et al.* (2014) e Bamdad *et al.* (2018). Também na investigação de Ahmad *et al.* (2014), a recomendação do carvão obtido em baixas temperaturas, como, por exemplo, as que foram feitas neste trabalho (350°C), indica condições mais adequadas para imobilizar inorgânicos e contaminantes orgânicos polares, podendo também associar reações de precipitação. Isso pode minimizar ainda a difusão de contaminantes, como metais pesados e até mesmo alguns fitotóxicos, como o alumínio (SINGH *et al.*, 2014).

Os três elementos a serem considerados como mais impactantes para o uso do carvão produzido no processo aqui desenvolvido foram zinco, níquel e cádmio. Então, deveriam ser consideradas proporções de fertilizante orgânico produzido na fundação em proporção ao carvão com catalisador, de modo que fossem garantidos os limites dos materiais de acordo com a norma do Mapa.

O carvão com catalisador apresentou maiores valores de matéria orgânica e, por isso, deve proporcionar maior imobilização ou precipitação dos metais analisados. Sendo assim, esse ponto também é favorável para justificar a sua escolha.

## CONCLUSÃO

O passivo ambiental da área de aterro classe II estudado tem potencial para produzir 4.227 cal.g<sup>-1</sup> para o carvão do processo de pirólise sem catalisador e 5.473 cal.g<sup>-1</sup> para o carvão do processo com catalisador, sendo esses valores inferiores ao da amostra da pré-pirólise composta, 6.025 cal.g<sup>-1</sup>.

A presença do catalisador não afetou de forma significativa a produção de carbonizado, mas percebe-se que o uso de catalisador resultou em menores rendimentos de carvão. Já a variação entre as médias dos rendimentos do carvão entre as pirólises não catalítica e catalítica foi de 4,28%. Essa diferença em ensaios diferentes não é representativa entre os valores encontrados.

O carvão obtido tem maiores possibilidades de aplicações, especialmente como componente de formulação de adubos, controlando a disponibilidade de nutrientes no solo e reduzindo perdas nas áreas de plantio. Uso como suporte catalítico em reações de degradação de poluentes, em meio líquido, ar e solo, pode ser outra forma de aplicação.

Embora polêmicas, as formulações de misturas dos produtos de pirólise devem ser previstas para controlar os limites de metais tóxicos, sobretudo quanto ao níquel. É necessário investigar a origem das contaminações e poluição nos resíduos, para não limitar as aplicações do carvão, de acordo com o IBI, o BQM e o EBC.

A eficiência do uso de argila vermelha seria possível se a granulometria dos resíduos fosse menor, ou a adesão do catalisador aos resíduos teria de ser melhorada para a reação catalítica ser mais efetiva. A possibilidade de transformar resíduos com alto poder de impacto ambiental negativo em um produto com alto poder agregado, somando aos benefícios ambientais, fortalece ainda mais a pirólise para a produção de carvão. O uso como agregado em um fertilizante orgânico poderá promover melhoria nas condições de cultivo e regeneração do solo, desde que com controle analítico rigoroso.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Machado, E. L.: Conceituação, Curadoria dos Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Administração do Projeto, Recursos, Supervisão, Escrita — Primeira Redação, Escrita — Revisão e Edição. Weiss, F.: Conceituação, Curadoria dos Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Escrita — Primeira Redação, Escrita — Revisão e Edição. Rodriguez, A. L.: Conceituação, Curadoria dos Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia. Lopez, D. A. R.: Conceituação, Curadoria dos Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia. Strothmann, A.: Conceituação, Curadoria dos Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Escrita — Primeira Redação, Escrita — Revisão e Edição.

## REFERÊNCIAS

- ABDEL-SHAFY, H.I.; MANSOUR, M.S.M. Solid waste issue: sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*, v. 27, n. 4, p. 1275-1290, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>
- AHMAD, M.; RAJAPAKSHA, A.U.; LIM, J.E.; ZHANG, M.; BOLAN, N.; MOHAN, D.; VITHANAGE, M.; LEE, S.S.; OK, Y.S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere*, v. 99, p. 19-33, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23. Washington, DC.: APHA/AWWA/ WEF, 2017. <https://doi.org/10.2105/AJPH.51.6.940-a>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BALIA, R. Old municipal and industrial waste landfills: some examples of possible contribution of geophysical survey techniques for their assessment before reclamation. *Detritus*, v. 1, p. 110-115, 2018. <https://doi.org/10.26403/detritus/2018.24>
- BAMDAD, H.; HAWBOLDT, K.; MACQUARRIE, S. A review on common adsorbents for acid gases removal: focus on biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, parte 2, p. 1705-1720, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.261>
- BATISTA, E.M.C.C. *Biochar como ligante macromolecular no solo visando aumentar a capacidade de retenção de água nos solos do nordeste do Brasil*. Tese de Doutorado (Pós-Graduação em Química) - Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- BRASIL. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasil, 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm). Acesso em: 22 nov. 2019.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Instrução Normativa nº 7, de 12 de abril de 2016*. Brasil, 2016. Disponível em: [http://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21513067/doi-10.1016-05-02-instrucao-normativa-n-7-de-12-de-abril-de-2016-21512974](http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21513067/doi-10.1016-05-02-instrucao-normativa-n-7-de-12-de-abril-de-2016-21512974). Acesso em: 12 dez. 2019.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Instrução Normativa nº 27, de 5 de julho de 2006*. Dispõe sobre a importação ou comercialização, para produção, de fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes. Brasília, 2006.
- BRASIL. *Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019*. Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010. Diário Oficial da União, 2019.
- BURLAKOV, J.; KRIIPSAJU, M.; PORSHNOV, D.; JANI, Y.; OZOLS, V.; PEHME, K.M.; RUDOVICA, V.; GRINFELDE, I.; PILECKA, J.; VINCEVICA-GAILE, Z.; TURKADZE, T.; HOGGLAND, W.; KLAVINS, M. Gateway of landfilled plastic waste towards circular economy in Europe. *Separations*, v. 6, n. 2, p. 25, 2019. <https://doi.org/10.3390/separations6020025>
- CHAIB, J. G. *Produção de biochar por pirólise de resíduos verdes de um horto e avaliação do seu potencial no crescimento de lactuca sativa*. Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2019.
- CHIRICO, D.V. Incineração de resíduos urbanos. In: COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Aterro sanitário*. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/aterro-sanitario/>. Acesso em: 5 set. 2018.
- CZAJCZYŃSKA, D.; ANGUILANO, L.; GHAZAL, H.; KRZYŻYŃSKA, R.; REYNOLDS, A.J.; SPENCER, N.; JOUHARA, H. Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 3, p. 171-197, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.003>
- SOUZA, J.F.T. de; PACCA, S.A. Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 169, 105517, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105517>
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Inventário energético dos resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2014. (Série Recursos Energéticos).
- ENDERS, A.; HANLEY, K.; WHITMAN, T.; JOSEPH, S.; LEHMANN, J. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*, v. 114, p. 644-653, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022>
- FADILLAH, G.; FATIMAH, I.; SAHRONI, I.; MUSAWWA, M.M.; MAHLIA, T.M.I.; MURAZA, O. Recent progress in low-cost catalysts for pyrolysis of plastic waste to fuels. *Catalysts*, v. 11, n. 7, p. 837, 2021. <https://doi.org/10.3390/catal11070837>
- FILIZOLA, H.F.; GOMES, M.A.F.; SOUZA, M.D.de. *Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 169 p.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIS ROESSLER. *Diretriz Técnica nº 1, de 24 de outubro de 2018*. Diretriz técnica que estabelece condições e os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos a serem adotados pela Fepam para fontes fixas e dá outras providências. Rio Grande do Sul: Fepam, 2018. Disponível em: [http://www.fepam.rs.gov.br/central/diretrizes/Diret\\_Tec\\_01\\_2015.pdf](http://www.fepam.rs.gov.br/central/diretrizes/Diret_Tec_01_2015.pdf). Acesso em: 5 dez. 2019.
- GONÇALVES, J.E.; SARTORI, M.M.P.; LEÃO, L.A. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 5, p. 657-661, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000500021>
- HAIJ, A.G.; PARI, G.; NAZAR, M.; HABIBATI, H. Characterization of activated carbon produced from urban organic waste. *International Journal of Science and Engineering*, v. 5, n. 2, p. 89-94, 2013. <https://doi.org/10.12777/ijse.5.2.89-94>
- INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. IBI-STD-2.1. IBI biochar standards. IBI, 2015. v. 2.1.
- JANAS, M.; ZAWADZKA, A. Assessment of the monitoring of an industrial waste landfill. *Ecological Chemistry and Engineering S.*, v. 25, n. 4, p. 659-669, 2018. <https://doi.org/10.1515/eces-2018-0044>



- KALYANI, K.A.; PANDEY, K.K. Waste to energy status in India: a short review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 31, p. 113-120, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.020>
- KASARA, P.; SHARMA, D.K.; AHMARUZZAMAN, M. Thermal and catalytic decomposition of waste plastics and its co-processing with petroleum residue through pyrolysis process, *Journal of Cleaner Production*, v. 265, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121639>
- KIM, J.; JEONG, S. Economic and environmental cost analysis of incineration and recovery alternatives for flammable industrial waste: the case of South Korea. *Sustainability*, v. 9, n. 9, p. 1638, 2017. <https://doi.org/10.3390/su9091638>
- LIU, T.; LIU, B.; ZHANG, W. Nutrients and heavy metals in biochar produced by sewage sludge pyrolysis: its application in soil amendment. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 23, n. 1, p. 271-275, 2014. Disponível em: <http://www.pjoes.com/Nutrients-and-Heavy-Metals-in-Biochar-Produced-r-nby-Sewage-Sludge-Pyrolysis-r-nlts,89192,0,2.html>. Acesso em: 28 mai. 2022.
- MARTÍNEZ, J.D. An overview of the end-of-life tires status in some Latin American countries: proposing pyrolysis for a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 144, 111032, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111032>
- SALETNIK, B.; ZAGUŁA, G.; BAJCAR, M.; TARAPATSKYY, M.; BOBULA, G.; PUCHALSKI, C. Biochar as a multifunctional component of the environment: a review. *Applied Sciences*, v. 9, n. 6, p. 1139, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9061139>
- SINGH, B.; MACDONALD, L.M.; KOOKANA, R.S.; VAN ZWIETEN, L.; BUTLER, G.; JOSEPH, S.; WEATHERLEY, A.; KAUDAL, B.B.; REGAN, A.; CATTLE, J.; DIJKSTRA, F.; BOERSMA, M.; KIMBER, S.; KEITH, A.; ESFANBOD, M. Opportunities and constraints for biochar technology in Australian agriculture: looking beyond carbon sequestration. *Soil Research*, v. 52, n. 8, p. 739-750, 2014. <http://doi.org/10.1071/SR14112>
- TÓRRES, A.F. *Aplicação do processo de pirólise para valoração, cogeração de energia e tratamento de resíduos*. 175p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- TRAZZI, P.A.; HIGA, A.R.; DIECKOW, J.; MANGRICH, A.S.; HIGA, R.C.V. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. *Ciência Florestal*, v. 28, n. 2, p. 875-887, 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509832128>
- USHIMA, A.H.; FRANCA, G.P. Emissão de compostos clorados na combustão, gaseificação e pirólise de palha de cana-de-açúcar. *Revista IPT: Tecnologia e Inovação*, v. 2, n. 8, p. 37-47, 2018. Disponível em: <http://revista.ipt.br/index.php/revistaPT/article/view/60>. Acesso em: 28 mai. 2022.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos*. Brasília: MAPA, 2017. 240 p.
- VERHEIJEN, F.; JEFFERY, S.; BASTOS, A.; VAN DER VELDE, M.; DIAFAS, I. *Biochar application to soils: a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions*. EUR 24099 EN. Luxemburgo: European Commission, 2010. <https://doi.org/10.2788/472>