ReGeo ISSN: 2177-3246

COMPARAÇÃO DO USO DE CARVÃO ATIVADO COMERCIAL E CARVÃO ATIVADO DE EUCALIPTO VISANDO A DESTOXIFICAÇÃO DO HIDROLISADO HEMICELULÓSICO DA CASCA DE CAFÉ

COMPARISON OF THE USE OF COMMERCIAL ACTIVATED CARBON AND EUCALYPTUS ACTIVATED CARBON FOR THE DETOXIFICATION OF HEMICELLULOSIC HYDROLYSATE FROM COFFEE HUSKS

COMPARACIÓN DEL USO DE CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL Y CARBÓN ACTIVADO DE EUCALIPTO PARA LA DESINTOXICACIÓN DEL HIDROLIZADO HEMICELULÓSICO DE CÁSCARAS DE CAFÉ

Data de submissão: 24/04/2026 **Data de publicação:** 24/05/2026

10.56238/revgeov17n6-145

Antônio Fernandes Rodrigues Júnior
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei
E-mail: antoniofrj001@gmail.com
Lattes: http://lattes.cnpq.br/8833443054359179

Eduardo Roberto Garcia de Moraes
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei
E-mail: dudu060900@gmail.com
Lattes: http://lattes.cnpq.br/1709076465281828

Letícia Garcia da Silveira
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei
E-mail: leticia.brasfort@aluno.ufsj.edu.br
Lattes: http://lattes.cnpq.br/1704457089960026

Alexandre Bôscaro Franca
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei - Campus Alto Paraopeba
E-mail: alexandre.boscaro@ufsj.edu.br
Lattes: http://lattes.cnpq.br/4539473355526849

Renata Carolina Zanetti Lofrano
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei - Campus Alto Paraopeba
E-mail: renataczlofrano@gmail.com
Lattes: http://lattes.cnpq.br/5561482457720983

Boutros Sarrouh
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei
E-mail: bsarrouh@ufsj.edu.br
Lattes: http://lattes.cnpq.br/7204534064025448

RESUMO
Este estudo teve como objetivo comparar a destoxificação do hidrolisado ácido, obtido a partir da casca do café, utilizando dois diferentes tipos de carvão ativado, de origem vegetal (eucalipto) e comercial padrão. A avaliação se deu pela quantidade de compostos fenólicos removidos e açúcares perdidos no processo. A destoxificação ocorreu através da neutralização do pH, adição de carvão ativado e

posteriormente, remoção do precipitado por meio de centrifugação e filtração simples. As análises estatísticas de superficie de resposta indicaram que a condição ótima de temperatura para a remoção dos fenóis totais foi de aproximadamente 53,6 °C ao utilizar carvão ativado comercial e de 70,2 °C para o carvão ativado de eucalipto. Realizando o mesmo procedimento para a relação sólido-líquido (S:L), que variou de 1 a 3,68, obtiveram-se valores ótimos de 3,66 para o carvão comercial e 3,68 para o carvão de eucalipto, ambos muito próximos entre si.

Palavras-chave: Destoxificação. Hidrolisado Hemicelulósico. Casca de Café. Carvão Ativado. Eucalipto.

ABSTRACT

This study aimed to compare the detoxification of acid hydrolysate, obtained from coffee husks, using two different types of activated carbon: vegetable-based (eucalyptus) and standard commercial carbon. The evaluation was based on the amount of phenolic compounds removed and sugars lost in the process. Detoxification occurred through pH neutralization, addition of activated carbon, and subsequent removal of the precipitate by centrifugation and simple filtration. Response surface methodology (RSM) analyses indicated that the optimal temperature for the removal of total phenols was approximately 53.6 °C when using commercial activated carbon and 70.2 °C for eucalyptus activated carbon. Performing the same procedure for the solid-to-liquid ratio (S:L), which ranged from 1 to 3.68, optimal values of 3.66 were obtained for commercial carbon and 3.68 for eucalyptus carbon, both very close to each other.

Keywords: Detoxification. Hemicellulosic Hydrolysate. Coffee Husk. Activated Charcoal. Eucalyptus.

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo comparar la desintoxicación del hidrolizado ácido, obtenido de la cáscara de café, utilizando dos tipos diferentes de carbón activado: de origen vegetal (eucalipto) y carbón comercial estándar. La evaluación se basó en la cantidad de compuestos fenólicos eliminados y azúcares perdidos durante el proceso. La desintoxicación se realizó mediante la neutralización del pH, la adición de carbón activado y la posterior eliminación del precipitado por centrifugación y filtración simple. Los análisis de la metodología de superficie de respuesta (MSR) indicaron que la temperatura óptima para la eliminación de fenoles totales fue de aproximadamente 53,6 °C con carbón activado comercial y de 70,2 °C con carbón activado de eucalipto. Al realizar el mismo procedimiento para la relación sólido-líquido (S:L), que varió de 1 a 3,68, se obtuvieron valores óptimos de 3,66 para el carbón comercial y de 3,68 para el carbón de eucalipto, ambos muy cercanos entre sí.

Palabras clave: Desintoxicación. Hidrolizado Hemicelulósico. Cáscara de Café. Carbón Activado. Eucalipto.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de biomassas vegetais, como a casca de café, como fonte de matéria-prima para a produção biotecnológica de novos produtos vem despertando grande interesse devido à abundância e ao caráter renovável do material. Além disso, vem sendo um dosprodutos primários com maior valor agregado no mundo, proporcionando milhões de empregos. E sendo fundamental na economia e política de diversospaíses no mundo (Embrapa,2024). A produção mundial de café para 2023-2024 é de 171,4 milhões de sacas de 60kg. Como parte desse volume, a safra dos cafés da espécie de *Coffea arabica* (café arábica) foi calculada em 97,3 milhões de sacas (56,7%), e, de *Coffea canephora* (robusta+conilon) 74,1 milhões de sacas (43,3%). Estima-se que da produção total, a casca de café gerada é em torno de 50% em peso do total de café produzido (Embrapa, 2024). O Brasil é um país fortemente agrícola e produz anualmente, uma grande quantidade de biomassa vegetal, e em relação ao café, o país é líder mundial nasua produção. Portanto, esta biomassa lignocelulósicaé uma fonte de energia renovável da terra, podendo ser utilizada para se obter produtos de alto valor agregado comercialmente (Freitas, 2023).

A casca de café é um material lignocelulósico, e o hidrolisado hemicelulósico é composto principalmente de três componentes orgânicos: celulose, hemicelulose e lignina. A caracterização química do hidrolisado hemicelulósico da casca de café apresentou concentrações de 38,05% de compostos extrativos, 24% de celulose, 19% de hemicelulose, 13,68% de lignina (Freitas, 2023). No entanto, é importante considerar que a casca de café, embora seja umavaliosa biomassa, contém compostos fenólicos que afetam a integridade da membrana celular (Wang et al., 2017). Esses compostos podem ser tóxicos e prejudiciais aos processos biotecnológicos envolvendo a casca de café. Portanto, é de grande importância abordar a destoxificação dos mesmos. Para o aproveitamento da biomassa vegetal da casca de café, é importante procedimentos de hidrólise eficazes. E um dos procedimentos empregados para o fracionamento de sua biomassa vegetal, é a hidrólise ácida, que solubiliza seus açúcares constituintes (Embrapa, 2024). No entanto, esse processo também resulta na liberação de compostos tóxicos derivados de furano, ácidos orgânicos e principalmente compostos fenólicos, causando preocupações sobre a toxicidade do hidrolisado. Sendo que os compostos fenólicos causam a perda da integridade da membrana biológicaafetando a solubilidade de barreiras seletivas e matrizes enzimáticas, sendo que a toxicidade é dependente não apenas de suas concentrações no meio, mas da interação. Além disso, os compostos fenólicos são encontrados em resíduoslignocelulósicos, incluindo a casca de café, e são caracterizados por sua elevada toxicidade (Barbosa e al., 2014). Eles englobam inúmeros tipos de compostos aromáticos com distintos tamanhos de cadeias, ramificações e grupos funcionais, sendo majoritariamente derivados da fragmentação da lignina, que afetam a integridade da membrana celular(Wang et al., 2017). Portanto, conforme estudo realizado por Polakovic (1992), constatou-se que os compostos fenólicos, apesar de agirem como

antioxidantes, atuam como inibidores do processo de fermentação alcoólica, atuando sobre a enzima invertase da levedura. Portanto, têm ação inibidora à fermentação, e por isso são considerados tóxicos aos microrganismos. Para contornar esse desafio, a adsorção por carvão ativado surge como uma solução promissora. A adsorção é o processo de transferência de um ou mais constituintes (adsorvatos) de uma fase fluida para a superfície de uma fase sólida (adsorvente). Nesse processo, as moléculas presentes na fase fluida são atraídas para a zona interfacial devido à existência de forças atrativas não compensadas na superfície do adsorvente (Ruthven, 1984, citado por Mezzari, 2002).

A utilização de insumos químicos orgânicos, como o carvão ativado de eucalipto, se enquadra no conceito de biorrefinaria, cujo objetivo principal é otimizar o uso de recursos e minimizar os efluentes (Embrapa Agroenergia, 2011). Os benefícios que o carvão, vindo de uma fonte vegetal, possuem são: ser uma boa fonte para o sequestro de carbono (Woolf et al, 2010) além de ser excelente adsorvente para remoção de poluentes orgânicos (Chen; Chen, 2009). O carvão ativado é eficaz na remoção de compostos fenólicos tóxicos do hidrolisado hemicelulósico por meio da adsorção (Mezzari, 2002). Além disso, o processo de ativação do carvão aumenta sua porosidade, tornando-o ainda mais eficiente na remoção desses compostos. Desse modo, o carvão ativado pode ser utilizado na limpeza da água industrial e na remoção de substâncias como naftalenos, dodecil, sulfonato, benzeno, fenol e entre outros (Macedo, 2012). Dessa forma, ele se destaca como uma escolha vantajosa para a desintoxicação do hidrolisado hemicelulósico obtido a partir da casca de café. A eficácia dos procedimentos de destoxificação foi avaliada quanto à redução de compostos fenólicos e açúcares fermentescíveis por espectrofotometria empregando-se as técnicas de Folin Ciocalteau para compostos fenólicos e DNS para açúcares (Solange e Mussatto, 2004).

Essas técnicas são essenciais para monitorar o sucesso do processo de destoxificação e a qualidade do hidrolisado final. Em resumo, a casca de café, como biomassa renovável, tem um potencial significativo para a produção biotecnológica, mas a presença de compostos fenólicos tóxicos exige estratégias de destoxificação. A adsorção por carvão ativado se destaca como uma abordagem eficaz para a remoção desses compostos, tornando a casca de café uma fonte viável de energia renovável e insumos químicos de alto valor agregado. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a destoxificação do hidrolisado hemicelulósico obtido a partir da casca de café, visando à remoção de compostos fenólicos a partir da adsorção com carvão ativado comercial e carvão ativado de eucalipto, a fim de se realizar uma comparação entre os dois sob qual conseguiu ser mais eficiente na adsorção.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia da pesquisa foi dividida dentre três etapas a serem seguidas linearmente, são essas: Destoxificação do hidrolisado hemicelulósico utilizando o carvão ativado, quantificação de fenóis totais e quantificação dos açúcares redutores pela técnica DNS.

2.1 DESTOXIFICAÇÃO DO HIDROLISADO HEMICELULÓSICO UTILIZANDO CARVÃO ATIVADO

O tratamento do hidrolisado hemicelulósico foiiniciado por meio da alteração do pH ácido de 0,4 para7,0 com a adição de solução de NaOH (12 mol/L). Emseguida, o precipitado resultante será removido por centrifugação a 4000 xg por 15 min. O sobrenadante será coletado e em seguida adicionado carvão ativadocom posterior agitação em incubadora de movimento giratório a 200 rpm em temperatura e tempo a depender do ensaio. Após este tempo, o hidrolisado tratado será centrifugado a 4000 xg por 15 min, para remoção dos sedimentos, e submetido em um processode filtração simples. O sobrenadante coletado será caracterizado quanto à concentração dos açúcares redutores (pela técnica de DNS) com ao teor de fenóistotais (pela técnica de Folin-Ciocalteau). Os ensaios de tratamento do hidrolisado hemicelulósico serão realizados por meio de um planejamento fatorial com três pontos centrais (Tabela1), cujas variáveis independentes seriam: temperatura(°C), tempo de tratamento (min) e relação carvão/hidrolisado (g de carvão / L de hidrolisado). As variáveis de resposta serão: a concentração de fenóis totais e a concentração de açúcares redutores, encontrados no hidrolisado pós-tratamento.

Tabela 1: Descrição das variáveis do planejamento experimental da destoxificação do hidrolisadohemicelulósico utilizando o carvão ativado comerciale de eucalipto.

Variáveis	**Níveis**		
	(-)	0	(+)
Temperatura (°C)	30	45	60
Tempo (min)	30	60	90
Carvão/hidrolisado hemicelulósico (S/L, %)	1	2	3

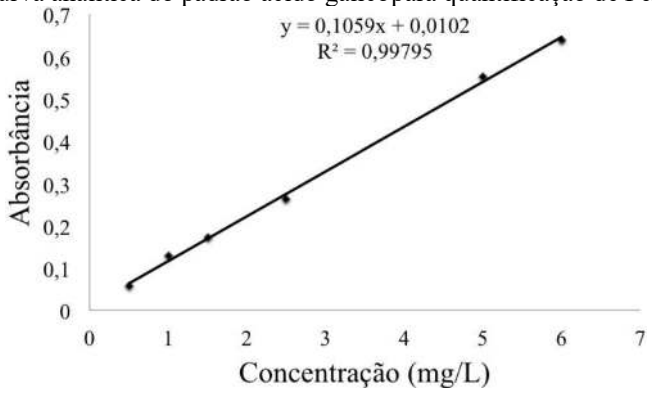
Fonte: Próprio autor

2.2 QUANTIFICAÇÃO DE FENÓLICOS TOTAIS NOS HIDROLISADOS DA LIGNINA DE CASCA DE CAFÉ

Para a determinação de fenóis totais utilizou-se ométodo de Folin-Ciocalteau (Ahn et al., 2004; Singleton et al., 1999).). Neste método colorimétrico,a reação baseia-se no princípio de que em meio alcalino, os fenóis reduzem a mistura dos ácidos fosfotúngstico e fosfomolíbdico em óxidos de tungstênio e molibdênio de coloração azul (Monteiro *et al*., 2006). A quantificação do teor dos fenóis totaisserá realizada por meio do preparo da solução de Na CO a 20% (p/v) em água destilada. Em seguida, a solução será resfriada a temperatura ambiente por 24 horas e posteriormente filtrada para

remoção do particulado depositado no fundo. O hidrolisado hemicelulósico resultante do processo de destoxificação será diluído em água destilada na proporção de 1:50 em balões volumétricos de 250 mL. Em sequência, 3,2 mL desta diluição será adicionado com 200µL de reagente Folin-Ciocalteau. Os tubos serão agitados e permanecerão em repouso por 5 minutos, em seguida serão adicionados 600µL da solução de carbonato de sódio preparada anteriormente. Os tubos de ensaio serão mantidos no escuro por 30 minutos. Após este tempo, as absorbâncias foram medidas em espectrofotômetro no comprimento de onda de 760 nm contra o branco, constituído por água destilada e Folin-Ciocalteu. As concentrações dos compostos fenólicos totais foram calculadas utilizando uma curva padrão de ácido gálico (absorbância vs concentração), previamente construída nas concentrações de 0, 50, 100, 150, 250 e 500 mg/L. O conteúdo total de fenóis foi expresso em miligramas equivalente de ácido gálico por gramas de casca de café.

Figura 1: Curva analítica do padrão ácido gálicopara quantificação de Fenóis Totais.



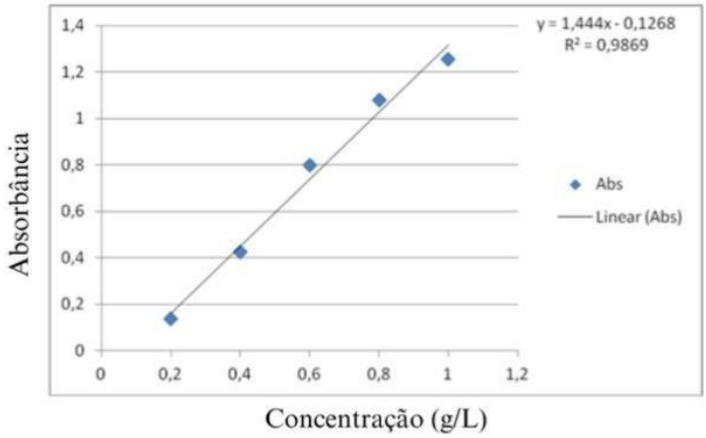
Fonte: Próprio autor

2.3 QUANTIFICAÇÃO DOS AÇÚCARES REDUTORES PELA TÉCNICADNS

Para determinação dos açúcares fermentescíveis, foi utilizado o teste de DNS (ácido dinitrosalicílico). Segundo Maldonade *et al*. (2013), este teste se baseiana reação entre o açúcar redutor e o ácido 3,5- dinitrosalicílico (cor amarelo), que é reduzido a um composto colorido avermelhado, o ácido 3-amino-5- nitrosalicílico, oxidando o monossacarídeo redutor. Oreagente DNS foi constituído de 10,6 g de ácido 3,5- dinitrosalicílico; 19,8 g de hidróxido de sódio; 300 g de tartarato duplo de sódio e potássio dissolvidos em 1400 mL de água destilada. Posteriormente, adicionou-se 7,6 ml de fenol (fundido); 8,3 g de metabissulfito de sódio, completando com água destilada para volume de 1500 mL (Adney; Baker, 1996). Para o teste de DNS, adicionou-se 1 mL das amostrasem tubos de ensaio contendo 1,5 mL do reagente DNS.Em seguida, os tubos foram aquecidos em banho- maria a 100°C (em ebulição) por 5 minutos e resfriados em banho de gelo por 5 minutos para inativação das enzimas. Após inativação, as amostras foram diluídas em água destilada na proporção de 1:100 para realização das leituras no espectrofotômetro a 540 nm (Adney; Baker, 1996; Miller, 1959). A determinação da

concentração de açúcares redutores em cada uma das amostras foirealizada através da construção da curva de calibraçãode glicose (0,1 a 1 g/L) (Adney; Baker, 1996).

Figura 2: Curva de calibração.



Fonte: Próprio autor

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização dos ensaios experimentais conformeo planejamento experimental, pôde-se obter os resultados da destoxificação do hidrolisado hemicelulósico da casca de café utilizando carvão ativado comercial e carvão ativado de eucalipto. A tabela 1 apresenta os dados obtidos, considerando as variáveis dependentes como temperatura (oC), relaçãosólido/líquido (massa de carvão ativado por volume dehidrolisado hemicelulósico utilizado) e tempo (min). As variáveis de resposta foram: a concentração final de fenóis totais (mg/L) e a concentração de açúcares totais (g/L).

Conforme os resultados obtidos na Tabela 2 do trabalho com carvão ativado comercial, os melhores ensaios foram os ensaios 6 e 14, pois obteve-se a maiorremoção de fenóis totais. No ensaio 6, foramremovidos aproximadamente 63% dos fenóis totais com perda insignificante de açúcares totais. E no ensaio 14, foram removidos aproximadamente 63,6%dos fenóis totais, novamente, com perda insignificantede açúcares totais. Por outro lado, a Tabela 3 apresentaos ensaios com o carvão ativado de eucalipto, osmelhores ensaios foram os ensaios 3 e 14, onde foramremovidos aproximadamente 56% e 58% dos fenóis totais, respectivamente, com perdas de açúcares totaisde aproximadamente 14% e 13%.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de destoxificação considerando como variáveis dependentes: temperatura, relação carvão/hidrolisado e tempo. E como variáveis de resposta, os açúcares redutores(g/L) e fenóis totais (mg/L), no uso do carvão ativadocomercial.

Ensaios	Temperatura(°C)	Relação S:L % w/v	Tempo (min)	Fenóis Totais (mg/L)	Açúcares (g/L)
Inicial				331,6	34,3
1	60	1	90	184,5	33,0
2	30	1	90	273,3	33,9
3	60	3	30	137,3	29,9
4	70,2269	2	60	208,6	33,2
5	45	2	110,454	136,8	22,4
6	60	3	90	122,7	35,0
7	45	0,318207	60	275,2	33,1
8	60	1	30	192,1	28,3
9	30	3	30	130,7	32,5
10	30	1	30	245,9	33,0
11	45	2	9,54622	208,6	28,9
12	30	3	90	133,5	32,0
13	19,7731	2	60	298,8	32,9
14	45	3,68179	60	120,8	33,0
15	45	2	60	177,9	18,8
16	45	2	60	134,5	18,1
17	45	2	60	161,9	18,8

Fonte: Autores.

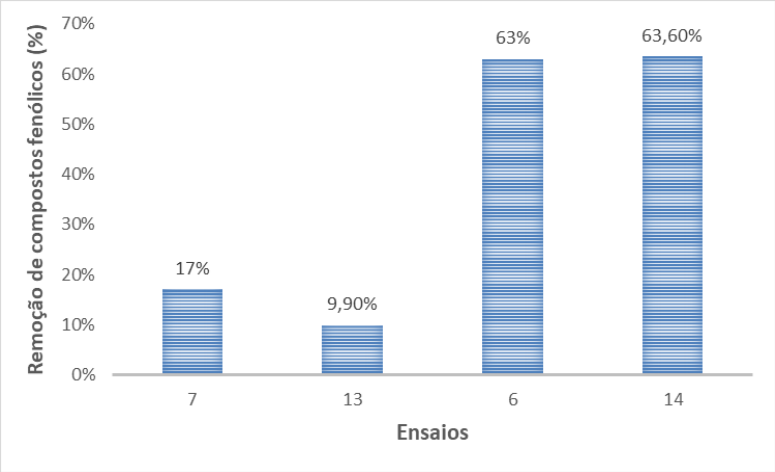
Tabela 3: Resultados dos ensaios de destoxificação considerando como variáveis dependentes: temperatura, relação carvão/hidrolisado e tempo. E como variáveis de resposta, os açúcares redutores (g/L) e fenóis totais (mg/L), no uso do carvão ativadode eucalipto.

Ensaios	Temperatura(°C)	Relação S:L % w/v	Tempo (min)	Fenóis Totais (mg/L)	Açúcares (g/L)
Inicial				331,59	34,33
1	60	1	90	228,42	30,18
2	30	1	90	236,45	24,99
3	60	3	30	184,52	29,42
4	70,2269	2	60	193,48	26,51
5	45	2	110,454	243,06	27,69
6	60	3	90	209,54	29,97
7	45	0,318207	60	239,28	30,80
8	60	1	30	205,29	24,78
9	30	3	30	235,51	24,02
10	30	1	30	276,59	23,81
11	45	2	9,54622	209,07	27,62
12	30	3	90	261,47	28,59
13	19,7731	2	60	153,82	23,32
14	45	3,68179	60	138,24	29,83
15	45	2	60	155,72	25,47
16	45	2	60	240,70	26,02
17	45	2	60	191,12	28,45

Fonte: Próprio autor

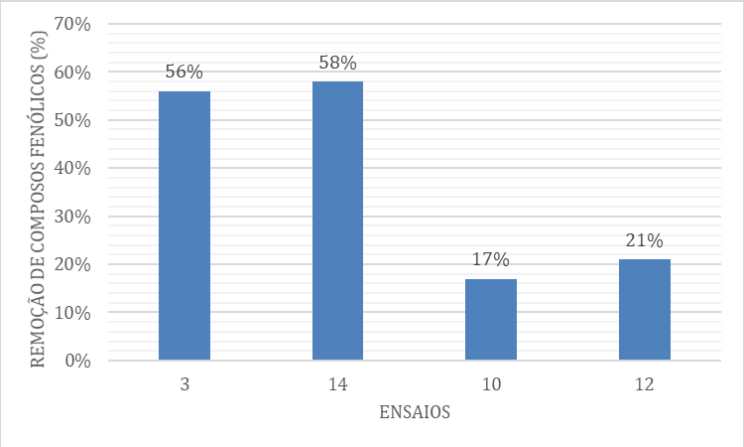
Contudo, os ensaios 7 e 13 com carvão ativado comercial e os ensaios 10 e 12 com carvão ativado deeucalipto foram os piores em relação à remoção dos fenóis. No trabalho com carvão ativado comercial, a remoção nos ensaios 7 e 13 foi de aproximadamente 17% e 9,9% dos fenóis totais, respectivamente, amboscom perda insignificante de açúcares totais. Já no trabalho com carvão ativado de eucalipto, a remoção nos ensaios 10 e 12 foi de aproximadamente 17% e 21,2% dos fenóis totais, respectivamente, com perdasde açúcares totais de aproximadamente 31% e 17%.

Figura 3: Percentual de remoção de compostos fenólicos do hidrolisado hemicelulósico nos ensaios 7 e 13, com menor remoção, e nos ensaios 6 e 14, com maior remoção para o carvão ativado comercial.



Fonte: Próprio autor

Figura 4: Percentual de remoção de compostos fenólicos do hidrolisado hemicelulósico nos ensaios3 e 14, com maior remoção, e nos ensaios 10 e 12, com menor remoção para o carvão ativado de eucalipto.



Fonte: Próprio autor

Conforme Mussato (2001), o método de remoção de compostos fenólicos com concentração de carvão ativado na amostra de hidrolisado hemicelulósico de 40g/g (Treatment 3), se obteve uma remoção de cerca de 27%, sendo menor do que os ensaios 6 e 14 no trabalho com carvão ativado comercial, e também do que os ensaios 3 e 14 no trabalho com carvão ativado de eucalipto. Isso evidencia que o método escolhido na adsorção dos compostos fenólicos por meio do carvão ativado, seja comercial ou de eucalipto, apresenta maior eficiência em comparação com o método de Mussato.

De acordo com uma pesquisa feita por Chaud (2010), o hidrolisado hemicelulósico quando submetido a uma etapa de filtração a vácuo e aos mesmos procedimentos realizados nestes projetos, resultou numa remoção de 79,88% dos compostos fenólicos. É maior que os melhores ensaios das pesquisas realizadas. Porém, os presentes trabalhos foram realizados com uma filtração simples seguida de centrifugação para extrair o carvão ativado com os compostos fenólicos. Mas na pesquisa de Chaud (2010) o método de filtração é diferente. Em uma outra pesquisa, PARAJÓ et al. (1996) utilizando a combinação entre neutralização e carvão ativo, observou que há uma relação entre os

fatores tempo de contato e concentração de carvão (p/v), pois para hidrolisados de eucalipto tratados com 0,25; 1; e 5% de carvão, obtiveram 40, 60 e 75% como porcentagens máximas de remoção de produtos derivados da lignina (PDL) em 90, 40 e 25 min. Portanto, com base nestes dados, analisamos que para uma relação de 1% de carvão ativado, a remoção de 60% está próxima da encontrada em ambos os relatórios, a qual a relação S:L de carvão ativado e a porcentagem de remoção são próximas para estes valores. Marton (2002), ao avaliar a destoxificação do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana, também obtido por hidrólise ácida, alterando o pH combinada e adsorvido em carvão vegetal ativado (1%p/v) com agitação de 100 rpm, 60ºC em 30 minutos, constatou que este procedimento reduziu a concentração de compostos fenólicos e de açúcares. Nestas condições, foi obtida a redução de 76% de fenóis, porém, perda de 22% de açúcares. Portanto, a perda de fenóis foi relativamente maior que o presente trabalho, mas com porcentagem de perda de açúcares totais considerável, diferentemente do ocorrido na presente pesquisa, que teve perdas de açúcares insignificantes.

Para uma última comparação, Silva (2007), avaliou a utilização de polímero vegetal para a destoxificação do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana, vindo da moagem artesanal durante preparo de caldo de cana, teve uma remoção de 75,47% de compostos fenólicos totais e perda mínima de xilose (aproximadamente 7%), valores muito semelhantes ao encontrado no presente trabalho. Apesar de que em trabalhos mais recentes, envolvendo os polímeros na destoxificação do hidrolisado hemicelulósico, constatou-se uma remoção acima de 80% dos compostos fenólicos, sem perda significativa de açúcares, mas, envolvendo uma fonte de biomassa diferente da presente nesta atual pesquisa com casca de café.

Os melhores ensaios com o carvão ativado comercial (6 e 14), ocorreram utilizando respectivamente, 60°C e 45°C, 3 e 3,68179 de relação sólido-líquido e um tempo de 90 e 60 minutos. Assim sendo, nota-se que para temperaturas mais altas, relações sólido-líquido mais altas, e maior tempo, obteve-se uma remoção maior de compostos fenólicos. Visto que nos piores ensaios, 7 e 13, a temperatura era de 45°C e 19,8°C, a relação sólido-líquido de 0,32 e 2, e o tempo de 60 minutos para ambos.

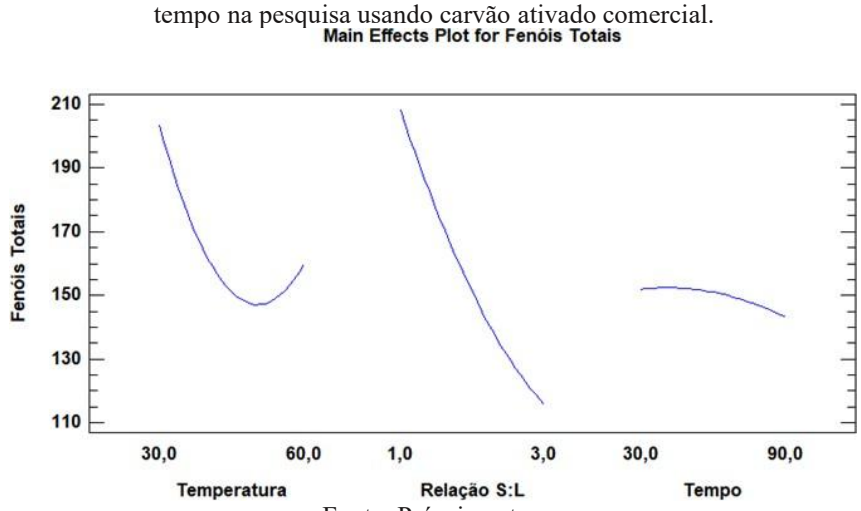
Os melhores ensaios com carvão ativado de eucalipto (3 e 14), ocorreram utilizando respectivamente, 60°C e 45°C, 3 e 3,68179 de relação sólido-líquido e um tempo de 30 e 60 minutos. Assim sendo, nota-se que para temperaturas mais altas, relações sólido-líquido mais altas, tempo por volta de 36 minutos, obteve-se uma remoção maior de compostos fenólicos. Visto que nos piores ensaios, 10 e 12, a temperatura de ambas era 30°C, a relação sólido-líquido de 1 e 3 respectivamente, e o tempo de 30 e 60 minutos respectivamente.

Os resultados indicam que tanto o carvão ativado comercial quanto o carvão ativado de eucalipto foram eficazes na destoxificação do hidrolisado hemicelulósico da casca de café. No entanto,

o carvão ativado de eucalipto apresentou resultados ligeiramente inferiores em comparação com o carvão ativado comercial em termos de remoção de fenóis totais e perda de açúcares totais.

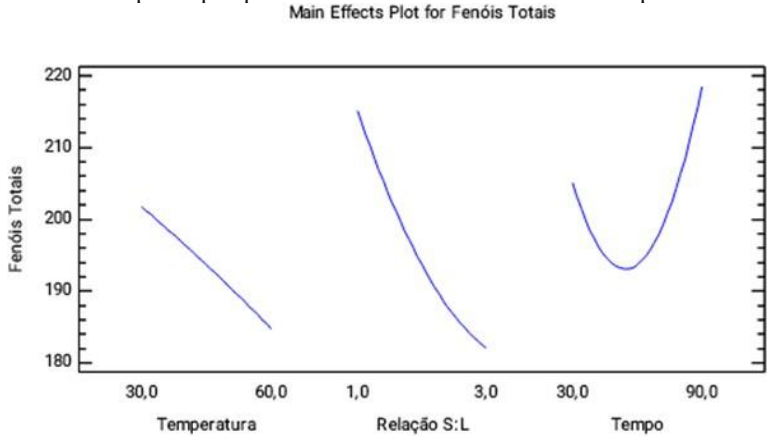
Para análise dos dados, faz-se necessária uma análise estatística dos dois processos, para evidenciar dentre as três variáveis (temperatura, relação sólido-líquido, tempo), qual apresenta maior significância quanto a remoção de fenóis totais para cada um deles. A seguir, os gráficos ilustram as relações dos parâmetros com as variáveis de resposta.

Figura 5: Remoção de compostos fenólicos totais em relação à variação dos parâmetros de temperatura, relação S:L e tempo na pesquisa usando carvão ativado comercial.



Fonte: Próprio autor.

Figura 6: Remoção de compostos fenólicos totais em relação à variação dos parâmetros de temperatura, relação S:L e tempo na pesquisa usando carvão ativado de eucalipto.



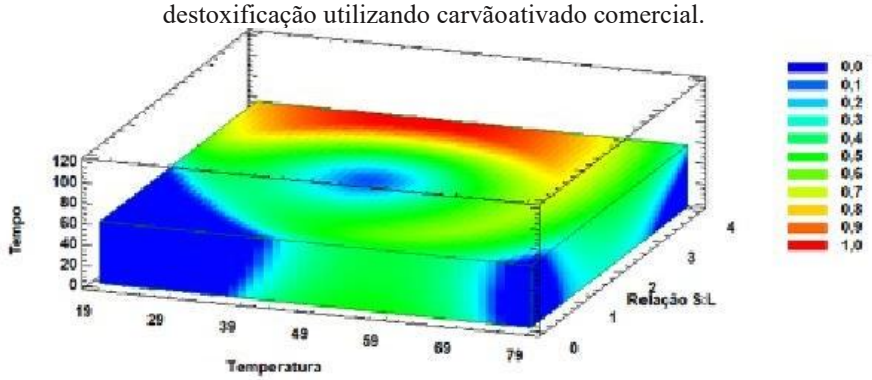
Fonte: Próprio autor

Os melhores ensaios em ambos os trabalhos ocorreram em temperaturas mais altas e com maiores relações sólido-líquido, demonstrando a influência desses parâmetros na eficácia da destoxificação. Além disso, a análise estatística revelou que as variáveis de maior relevância para a remoção dos compostos fenólicos no hidrolisado hemicelulósico foram a relação sólido- líquido e a temperatura. Em relação à perda de açúcares, a temperatura foi a variável mais influente, com uma influência positiva, ou seja, aumentar a temperatura resultou em uma menor perda de açúcares totais.

É também importantenotar que para o uso do carvão ativado comercial, na Figura 5, a temperatura, por volta de 45°C se tem a maior remoção de compostos fenólicos. E que, acimadeste valor até 60°C há um fenômeno de dessorção de compostos fenólicos no meio devido à forças de repulsão, a temperatura por estar mais elevada carreganegativamente as moléculas e com isso, a adsorção dos compostos fenólicos com o carvão ativado se cessa devido á esta repulsão iônica.

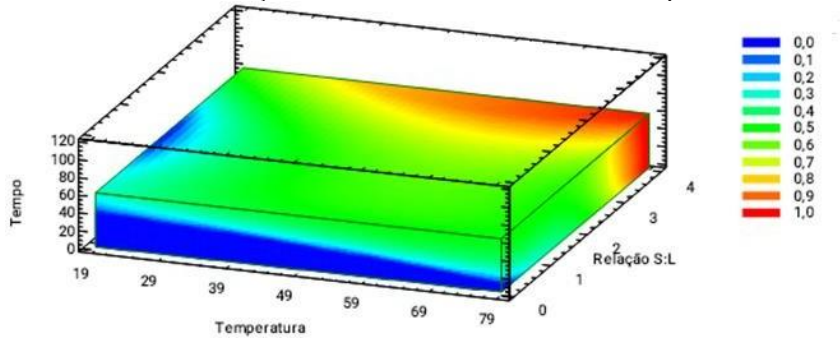
Sendo assim, se faz necessário realizar uma superfície de resposta 3D de como as variáveis se comportam na remoção dos compostos fenólicos. A fim de se ter uma faixa de valores que nos apresentaram as condições ótimas para que a remoção de fenóis totais seja a maisefetiva. Para isso, esta análise foi realizada fixando o parâmetro do tempo, por não ter influência estatisticamente significativa como na relação S:L e temperatura, assim sendo, foi feita a superfície de resposta para ambas as pesquisas.

Figura 7: Superfície de resposta das variáveis temperatura, relação S:L e tempo quanto à remoçãode fenóis totais na destoxificação utilizando carvãoativado comercial.



Fonte: Próprio autor

Figura 8: Superfície de resposta das variáveis temperatura, relação S:L e tempo quanto à remoçãode fenóis totais na destoxificação utilizando carvãoativado de eucalipto.



Fonte: Próprio autor

A superfície de resposta nos mostra valores das melhores condições do processo, sendo apresentada pelo escala de cores (de 0 a 1) com uma coloração avermelhada, sendo os valores desejados. Na análise das condições ótimas, para o caso da remoção de fenóis, a Figura 7 mostra que o carvão ativado comercial apresenta um intervalo de maior remoção quando a relação S:L é mais alta, em torno de 3 a 3,7%, juntamente com uma temperatura em torno de 40-60°C, para se ter uma

eficiência de remoção de fenóis adequada. Já para o uso do carvão ativado de eucalipto na Figura 8, há um intervalo de maior remoção quando a relação S:L é mais alta, em torno de3 a 4%, juntamente com uma temperatura em torno de60-80°C, para se ter uma eficiência de remoção de fenóis adequada. Isso mostra que, em ambos os estudos, para obter maior remoção de fenóis, o fator temperatura tem que ser na faixa de 50-70°C e o fatorrelação S:L na faixa de 3,0-3,7%. Já em relação ao tempo, houve divergências entre os estudos, visto queutilizando carvão ativado comercial, a faixa de tempoótima de processo é de 85 a 90 minutos, enquanto queutilizando carvão ativado de eucalipto a faixa de tempo ótima é de 30 a 40min.

Tabela 4: Condições ótimas esperadas de acordocom a superfície de resposta.

Variável	Condições ótimas para o uso de carvãoativado comercial	Condições ótimas para ouso de carvãoativado de eucalipto
Temperatura (°C)	53,6	70,3
Relação S:L	3,7	3,7
Tempo (min)	89,3	35,8

Fonte: Próprio autor

A tabela 4 apresenta as condições ótimas de temperatura, relação S:L e tempo de acordo com a superfície de resposta, fornecida através das análises estatísticas para as condições analisadas nos intervalosestudados. A temperatura no projeto variou de 30°C para 70,23°C, e se obteve pelas análises estatísticas que a condição ótima de temperatura para remoção dos fenóis totais foi de 53,6°C aproximadamente para o uso de carvão ativado comercial, e de 70,2°C para o carvão ativado de eucalipto. Fazendo o mesmo procedimento para a relação S:L que variou de 1 para3,68, obteve-se 3,66 para o carvão comercial, e 3,68 para o carvão de eucalipto, ambos próximos paraatingir as condições ótimas.

4 CONCLUSÃO

Neste estudo comparativo, foi avaliada a eficiência da destoxificação do hidrolisado hemicelulósico da cascade café com ênfase na remoção de compostos fenólicos. Os materiais em questão são dois tipos distintos de carvão, de origem vegetal (eucalipto) e comercial padrão. Os resultados obtidos indicam que ambos os tipos de carvão ativado são eficazes na remoção de compostosfenólicos tóxicos do hidrolisado hemicelulósico da casca de café. Além disso, pelas análises estatísticas realizadas, revelou-se que no quesito S:L, ambos se performaram de maneira semelhante, visto que quantomaior a quantidade de carvão presente por mL de hidrolisado, maior a remoção de compostos fenólicos.

Quando analisado em relação ao tempo, o carvãoativado de eucalipto obteve um resultado melhor, vistoque só é necessário cerca de ⅓ do tempo de processo comparado a destoxificação com

uso de carvão ativado comercial. Já em relação a temperatura, o carvão ativado comercial padrão se sobressai, visto que no processo necessita menor adição de calor para ocorrer de maneira ótima. O delta de temperatura entre os processos de destoxificação é por volta de 16ºC. Ao observar a remoção de compostos fenólicos, o carvão ativado comercial padrão apresentou uma leve vantagem. Nos melhores ensaios, os compostos fenólicos presentes no hidrolisado foram reduzidos em até 63%, enquanto que no processo utilizando o adsorvente de origem vegetal, a redução foi de 58%. Já em relação a perda de açúcares, nos melhores ensaios do processo utilizando carvão ativado comercial a perda mínima foi de 10%, enquanto que nos processos utilizando carvão ativado vegetal, a perda mínima foi de 17%. Portanto, o estudo demonstra a viabilidade da destoxificação do hidrolisado hemicelulósico da casca de café utilizando ambos os tipos de carvão ativado, visando tornar a casca de café uma fonte promissora de energia renovável e de insumos químicos de alto valor agregado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CNPq, CAPES, FAPEMIG e UFSJ pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Adney, B and Baker, J. (1996). Measurement of Cellulase Activities Laboratory Analytical Procedure (LAP) Issue Date : 08 / 12 / 1996 Measurement of Cellulase Activities Laboratory Analytical Procedure (LAP). *National Renewable Energy Laboratory*,*January*.

Ahn, M. R., Kumazawa, S., Hamasaka, T., Bang, K. S., & Nakayama, T. (2004). Antioxidant activity and constituents of propolis collected in various areas of Korea. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *52*(24). https://doi.org/10.1021/jf048726s

Chaud, Luciana Cristina Silveira. Avaliação do carvãovegetal ativado e polímero vegetal na destoxificação do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de- açúcar para a produção biotecnológica de xilitol. 2010.Dissertação (Mestrado em Conversão de Biomassa) - Escola de Engenharia de Lorena, Université de São Paulo, Lorena, 2010. doi:10.11606/D.97.2010.tde-04102012-111733. Acesso em: 2024-05-13.

Chen, B., & Chen, Z. (2009). Sorption of naphthaleneand 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures. *Chemosphere*, *76*(1). https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.02.004

Embrapa Agroenergia (2011). Biorrefinarias. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/908142/biorrefinarias>. Acesso em 25 de Fevereiro 2024.

Barbosa, C. S., Santana, S. A. A., Bezerra, C. W. B., & Silva, H. A. D. S. (2014). Remoção de compostos fenólicos de soluções aquosas utilizando carvão ativado preparado a partir do aguapé (eichhornia crassipes): Estudo cinético e de equilíbrio termodinâmico. *Quimica Nova*, *37*(3). https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140066

Freitas, Wagner Luiz da Costa. Estudo da casca de café como matéria prima em processos fermentativos.2015. Tese (Doutorado em Microbiologia Aplicada) -Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de SãoPaulo, Lorena, 2015. doi:10.11606/T.97.2016.tde- 25022016-094951.

Macêdo, L. P. M. P. de. (2012). Viabilidade da produção de carvão ativado a partir de resíduos alternativos. *Dissertação (Mestre Em Desenvolvimento de Processos Ambientais)- Universidade Católica de Pernambuco*.

Maldonade R. I., Patrícia, G. B. C., & A. Ferreira, N. (2013). Protocolo para determinação de acúcares totais em hortaliças pelo método de DNS. *Comunicado Tecnico*.

Marton, J. M. (2002). Avaliação dos diferentes carvões ativados e das condições de adsorção no tratamento do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana de açúcar para a obtenção biotecnológica de xilitol. Lorena, Brasil, 105p. (M.Sc. FAENQUIL, USP).

Mezzari, I. A. Utilização de carvões adsorventes paraо tratamento de efluentes contendo pesticidas. Tese (Mestrado) – Departamento de Engenharia Química eAlimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

Monteiro, J. M., Albuquerque, U. P., Lins Neto, E. M.F., Araújo, E. L., Albuquerque, M. M., & Amorim, E. L. C. (2006). The effects of seasonal climate changes in the caatinga on tannin levels in Myracrodruon urundeuva (Engl.) Fr. All. and Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, *16*(3). https://doi.org/10.1590/s0102-695x2006000300010

Mussatto, S. I., & Roberto, I. C. (2001). Hydrolysate detoxification with activated charcoal for xylitol production by Candida guilliermondii. *BiotechnologyLetters*,*23*(20). https://doi.org/10.1023/A:1012492028646

ussato, S. I. Roberto, I. C. (2004). Avaliação de diferentes tipos de carvão ativo na destoxificação de hidrolisado de palha de arroz para produção de xilitol.

Ciência e Tecnologia de Alimentos, 24(1). https://doi.org/10.1590/s0101-20612004000100018

Parajó, J. C., Dominguez, H., & Dominguez, J. M. (1996). Study of charcoal adsorption for improving the production of xylitol from wood hydrolysates. Bioprocess Engineering, 16(1). https://doi.org/10.1007/s004490050285

Produção dos Cafés do Brasil ocupa 1,9 milhão de hectares em 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/81515963/producao-dos-cafes-do-brasil-ocupa-19-milhao-de-hectares-em-2023#:~:text=produ%C3%A7%C3%A3o%20no%20Pa%C3%ADs-.>. Acesso em: 22 Fervereiro 2024.

Produção mundial de café para safra 2023-2024 totaliza 171,4 milhões de sacas de 60kg. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/88547345/producao-mundial-de-cafe-estimada-para-safra-2023-2024-totaliza-1714- milhoes-de-sacas-de-60kg#:~:text=Produ%C3%A7%C3%A3o%20mundia l%20de%20caf%C3%A9%20estimada>. Acesso em: 22 Fevereiro. 2024.

Silva, S. S., Mussatto, S. I., Santos, J. C., Santos, D. T., & Polizel, J. (2007). Cell immobilization and xylitol production using sugarcane bagasse as raw material. Applied Biochemistry and Biotechnology, 141(2–3). https://doi.org/10.1007/BF02729063

Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. Methods in Enzymology, 299. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1

Wang, Y., Kuang, Z., Yu, X., Ruhn, K. A., Kubo, M., & Hooper, L. v. (2017). The intestinal microbiota regulates body composition through NFIL3 and the circadian clock. Science, 357(6354). https://doi.org/10.1126/science.aan0677