

BORRA DE CAFÉ COMO SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL: PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE BIOCARVÕES ATIVADOS PARA A REMOÇÃO DE FLÚOR EM MEIO AQUOSO

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.I-010>

José Marçal da Silva (*), Beatriz Carolina Alvez Tovar, Renata Medici Frayne Cuba, Paulo Sérgio Scalize

* Universidade Federal de Goiás- UFG; e-mail: josemarcal@discente.ufg.br

RESUMO

O café se enquadra como a segunda bebida mais consumida no mundo e gera uma enorme quantidade de resíduos em sua produção, os quais, quando descartados inadequadamente, geram graves problemas ambientais. Todavia, devido suas características, a borra do café pode ser utilizada na produção de biocarvão direcionado à remoção de contaminantes em meio aquoso, como é o caso do flúor, o qual ganhou destaque nos últimos anos, devido sua alta presença no ambiente, de forma particular em águas subterrâneas. A presente pesquisa visou analisar a eficiência da adsorção de flúor por meio do biocarvão provindo da borra de café, produzido com e sem impregnação do ácido cítrico. A aplicabilidade do material foi avaliada em cinco diferentes situações, sendo: a borra de café *in natura*, borra carbonizada sem ativar, borra carbonizada e ativada com dióxido de carbono, borra carbonizada e ativada com ácido fosfórico e carvão ativado comercial. Os resultados mostraram que o biocarvão ativado com dióxido de carbono impregnado com ácido cítrico obteve os melhores valores de adsorção do flúor em meio aquoso, cerca de 98,5%. Por tanto, pode-se concluir com este trabalho que o biocarvão provindo da borra de café apresentou ótimos resultados no processo de adsorção do flúor.

PALAVRAS-CHAVE: Borra de café, Adsorção de Flúor, Dióxido de carbono, Ácido Fosfórico, Ácido Cítrico.

ABSTRACT

Coffee ranks as the second most consumed beverage in the world and generates a large amount of waste during its production. When improperly discarded, this waste can cause serious environmental problems. However, due to its characteristics, coffee grounds can be used to produce biochar aimed at removing contaminants in aqueous environments, such as fluoride, which has gained prominence in recent years due to its high presence in the environment, particularly in groundwater. This research aimed to analyze the efficiency of fluoride adsorption using biochar derived from coffee grounds, produced with and without citric acid impregnation. The applicability of the material was evaluated in five different conditions: raw coffee grounds, carbonized grounds without activation, carbonized grounds activated with carbon dioxide, carbonized grounds activated with phosphoric acid, and commercial activated carbon. The results showed that the biochar activated with carbon dioxide and impregnated with citric acid achieved the highest fluoride adsorption rates in aqueous media—about 98.5%. Therefore, it can be concluded that the biochar produced from coffee grounds showed excellent performance in the fluoride adsorption process.

KEY WORDS: Coffee grounds, Fluoride adsorption, Carbon dioxide, Phosphoric acid, Citric acid.

INTRODUÇÃO

O café se enquadra como a segunda bebida mais consumida pelo homem na atualidade, atrás apenas da água, sendo o Brasil o maior produtor do grão e o segundo maior consumidor da bebida, ultrapassado unicamente pelos EUA (Brasil, 2023). Na preparação da bebida utiliza-se apenas uma pequena porção do grão de café, cerca de 0,2%, o que ocasiona enorme produção de resíduos mediante o grão moído, e que em sua maioria é destinado a aterros (McNutt *et al.*, 2019), todavia uma outra parcela do resíduo é descartada de forma inadequada.

Devido as suas características, a borra do café (resíduo provindo da produção da bebida), pode ser caracterizada como um composto prejudicial ao meio ambiente, já que esta possui substâncias como taninos, lipídeos e cafeína, que em grandes concentrações são prejudiciais, por exemplo, aos animais, sendo, portanto, necessária sua destinação final adequada ou seu aproveitamento (Cardoso *et al.*, 2023).

Atualmente existem inúmeras pesquisas que buscam encontrar formas de aproveitar a borra do café, transformando-a em matéria prima, seja na geração de energia, produção de biodiesel, óleos, biochar, carvão ou outros (Melo *et al.*, 2024).

No aproveitamento da borra é possível utilizá-la para diferentes vertentes tais como o tratamento de águas mediante processo de adsorção, o qual é amplamente reconhecido por abranger o aspecto sustentável, econômico, de fácil operação e alta eficiência (Sadhu *et al.*, 2021). A adsorção pode ser empregada como resposta para diversos contaminantes, como o flúor que ganhou destaque nos últimos anos devido à alta presença em águas subterrâneas sendo considerado um problema global, uma vez que muitos países se utilizam de tais águas, sobretudo aqueles em estado de desenvolvimento como Índia e China (Ali *et al.*, 2019).

Uma forma de combater o problema do flúor e minimizar o processo de descarte da borra de café é utilizando o presente resíduo na remoção do flúor contido nas águas mediante o processo de adsorção. A borra de café possui compostos químicos que lhe conferem propriedades de adsorvente tanto para íons metálicos, metais pesados, e ânions como o flúor, sobretudo quando convertida em biocarvão (Shin *et al.*, 2020).

Para um melhor funcionamento do biocarvão provindo da borra de café, o material citado pode ser impregnado com determinadas substâncias que tendem a aumentar seu potencial de adsorção, tais como o ácido cítrico, estudado por diversos autores como Zou & Zhao, 2012, que comprovaram sua eficiência no biocarvão provindo da serragem de pinho, e, portanto, indicando a possibilidade do ácido ser utilizado em novos materiais, bem como a borra de café.

O ácido cítrico ($C_6H_8O_7$) é uma substância eficaz no aumento da capacidade de adsorção de materiais em geral, uma vez que sua propriedade quelante e sua acidez podem ser eficientes em processos de adsorção, como no caso do carvão ativado comercial, que apresenta maior eficiência quando impregnado com ácido cítrico (Rashid & Bezbaruah, 2020). Além de sua eficiência, o ácido cítrico não se caracteriza como um contaminante ambiental, e pode ser alcançado mediante alguns produtos naturais, como o limão e a laranja.

Sendo assim, faz-se necessário o estudo da impregnação por ácido cítrico de diferentes adsorventes, como o biocarvão obtido mediante borra de café, testando sua eficiência na remoção de contaminantes ambientais. Tais estudos são importantes para o alcance da sustentabilidade e se enquadram, sobretudo, no sexto Objetivo de Desenvolvimento Sustentável, “Água potável e saneamento”, já que tendem a reaproveitar um resíduo e produzir, de forma limpa, um material descontaminante de águas (ONU, 2015).

OBJETIVO

O objetivo do presente estudo foi avaliar a eficiência do biocarvão derivado da borra de café carbonizada, como adsorvente do flúor (F⁻), ativado com diferentes compostos e impregnado com ácido cítrico.

METODOLOGIA

Obtenção e preparo do material precursor

A matéria prima para a pesquisa foi a borra de café, proveniente de diversas marcas, preparada sem a adição de outras substâncias como açúcar ou adoçante, e agrupadas para obtenção de um único lote de material precursor. Em um primeiro momento ocorreu a lavagem da borra para retirar substâncias solúveis em água e possíveis impurezas, durante a etapa foram utilizados seis litros de água destilada a cada 100g do material.

Após a lavagem o material foi seco em estufa à temperatura de 105°C por 24 horas. Em seguida, a borra seca foi deixada em um dessecador para esfriar, e posteriormente armazenada em recipientes de vidro, à temperatura de 25°C.

Produção do Biocarvão

Com a borra seca iniciou-se a etapa de produção do biocarvão a partir do processo de pirólise ou carbonização. A produção do biocarvão ocorreu em reator de aço inoxidável, em forno tubular da marca Sanchis, à temperatura de 600°C por duas horas, a uma taxa de aquecimento de 10°C.min⁻¹, com atmosfera inerte de nitrogênio- N₂ (160mL.min⁻¹) no interior do reator (Alves *et al.*, 2019). Parte do material foi mantida sem ativar, obtendo-se o adsorvente Biocarvão Sem

Ativar (CSA). Nesta etapa também foi averiguado o rendimento da produção do biocarvão mediante a borra de café, comparando-se a massa de borra utilizada e a massa do biocarvão resultante.

Ativação do biocarvão com CO₂

A ativação física do biocarvão foi realizada em reator de aço inoxidável, em forno tubular da marca Sanchis, a uma temperatura de 600°C, com taxa de aquecimento de 10°.min⁻¹, sob fluxo constante de gás CO₂ (250mL.min⁻¹).

Ativação do biocarvão com H₃PO₄

Para a ativação com ácido fosfórico (H₃PO₄), a borra de café foi impregnada com solução de H₃PO₄ (25%), na proporção 1:1 (material precursor: agente ativante), e mantida à temperatura de 80°C durante 1h. Em seguida o material foi seco em estufa a 105°C durante 24h. Com o material seco realizou-se o processo de carbonização, a 600°C por duas horas com atmosfera inerte de nitrogênio- N₂ (160mL.min⁻¹). Após a carbonização, o biocarvão foi lavado com água destilada até o pH das águas de lavagem alcançar valores entre 6,5 e 7,5, e em seguida seco em estufa a 105°C durante 24h (Alves *et al.*, 2019).

Modificação com Ácido Cítrico

A modificação dos adsorventes produzidos foi realizada com ácido cítrico (C₆H₈O₇).

Para a modificação foi utilizado ácido cítrico 0,3M, numa proporção de 1:6,25 (adsorvente: solução de C₆H₈O₇), após a imersão do adsorvente na solução de C₆H₈O₇ houve a agitação deste material por 4h, seguida de filtração e secagem em estufa por 24h (Rashid & Bezbaruah, 2020). O processo de impregnação foi realizado em todas as amostras de biocarvão produzido, e como controle foram utilizados biocarvão sem impregnação com C₆H₈O₇ e carvão ativado comercial.

Na **Tabela 1** são apresentados os adsorventes produzidos com suas respectivas denominações:

Tabela 1- Descrição dos adsorventes com os respectivos reagentes utilizados

Nº DO ADSORVENTE	COMPONENTES
01- BSC	Borra sem carbonizar
01- CSA	Biocarvão sem ativar
01- CAC	Biocarvão ativado com CO ₂
01- CAH	Biocarvão ativado com H ₃ PO ₄
01- CC	Carvão comercial
02- BSC	Borra sem carbonizar + C ₆ H ₈ O ₇
02- CSA	Biocarvão sem ativar + C ₆ H ₈ O ₇
02- CAC	Biocarvão ativado com CO ₂ + C ₆ H ₈ O ₇
02- CAH	Biocarvão ativado com H ₃ PO ₄ + C ₆ H ₈ O ₇
02- CC	Carvão comercial + C ₆ H ₈ O ₇

Ensaio de adsorção de flúor (F⁻)

Foram realizados ensaios de capacidade de adsorção de flúor, à temperatura de 25°C, pH 6, e 100 rpm. Os testes com os dez materiais foram realizados sob as mesmas circunstâncias, tendo como diferencial apenas o tipo de adsorvente.

Em todos os casos procedeu-se da seguinte forma: em Erlenmeyers de 50 ml de capacidade, foi adicionado fluoreto de sódio (NaF), com concentração de 6mg.L⁻¹ e 1g do adsorvente. As misturas foram mantidas sob agitação constante em incubadora Shaker Refrigerada SL-223, durante intervalos de tempo pré-determinados, de 1, 3, 6, 8 e 16 horas para verificar o tempo de equilíbrio da adsorção. Ao término dos ensaios, a mistura foi filtrada em papel filtro qualitativo (150 mm, 80g), e procedeu-se com a análise de fluoreto remanescente na solução, pelo método do eletrodo íon-seletivo, marca Analyser® modelo 550M. Todos os experimentos foram realizados em duplicata.

Para verificar a eficiência de adsorção do F⁻ para cada adsorvente, utilizou-se as seguintes equações:

$$RF = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$$

equação (1)

$$qe = \frac{V(C_0 - C_e)}{m}$$

equação (2)

onde RF indica a porcentagem de remoção de F^- , C_0 é a concentração inicial de F^- ($mg \cdot L^{-1}$), C_e é a concentração de equilíbrio de F^- ($mg \cdot L^{-1}$), qe é a quantidade de mg de F^- adsorvido por cada grama de adsorvente, V é o volume da solução em litros e m é a massa do adsorvente em gramas.

RESULTADOS

No processo de produção do biocarvão a partir da borra de café obteve-se um rendimento médio de 25,32%, resultado superior a 16,72%, encontrado por Dos Santos *et al.* (2023), e inferior a 29,05%, indicado por Hirata *et al.*, (2002). Portanto, pode-se afirmar que o rendimento da produção de biocarvão encontrado na presente pesquisa, mediante pirólise em forno, situa-se numa faixa em torno dos 23,69% devido, sobretudo, a liberação de moléculas voláteis e água pela borra de café em temperaturas próximas a 200°C, assim como a liberação de celulose, hemicelulose e outros compostos em temperaturas entre 200°C e 600°C (Lee *et al.*, 2021).

Foi verificada uma perceptível diferença entre os adsorventes utilizados na pesquisa, sendo o biocarvão ativado com dióxido de Carbono (CO_2) (CAC), aquele que apresentou maior capacidade de adsorção do flúor (F^-), com qe máxima de 0,16mg. g^{-1} , seguido do biocarvão sem ativar (CSA), com qe máxima de 0,15mg. g^{-1} , ambos impregnados com ácido cítrico.

Referente ao tempo de processo, o período de seis horas mostrou-se mais eficaz, uma vez que após este tempo de contato entre os adsorventes e a solução de flúor, não ocorreram avanços significativos na taxa de adsorção, e em alguns casos, como no biocarvão ativado com CO_2 , manteve-se um equilíbrio. As **Figuras 1 e 2** apresentam os resultados obtidos na análise dos adsorventes, respectivamente sem e com ácido cítrico, ambos os valores em porcentagem:

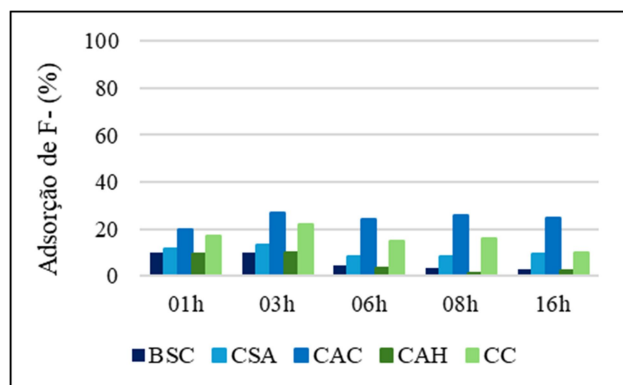


Figura 1. Porcentagem de adsorção de F^- para cada adsorvente analisado (Sem Ácido Cítrico)

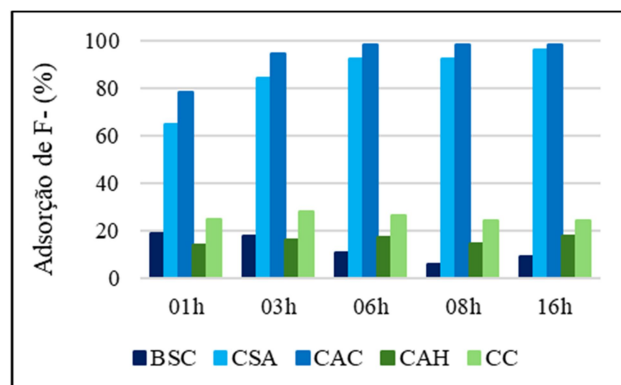


Figura 2. Porcentagem de adsorção de F^- para cada adsorvente analisado (Com Ácido Cítrico)

O ácido cítrico demonstrou forte atuação no aumento da capacidade de adsorção dos biocarvões e do carvão comercial, sobretudo no CAC e no CSA. Estudo anterior evidencia que suas características químicas melhoram a remoção de certos poluentes da água, tais como a anilina, o cobre, o chumbo, o azul de metileno, o urânio (Zou & Zhao, 2012) e o flúor, como constatado na pesquisa.

A remoção do flúor pela borra sem carbonizar (BSC) foi mínima nos dois processos, com e sem o ácido cítrico, variando sem proporção e alcançando uma taxa máxima de 18%, o que afirma a necessidade do processo de pirólise para que a borra de café seja eficiente na adsorção, assim como afirma Dos Santos *et al.* (2023), ao salientar que para o aumento da capacidade da BSC em adsorver íons F^- , é preciso fazer algumas mudanças na estrutura da sua superfície.

Outro adsorvente que apresentou baixa eficiência no processo de adsorção do flúor, foi o biocarvão ativado com o H_3PO_4 (CAH), com máxima de 18,01%, resultado diferente daquele encontrado na ativação de outros substratos, como o resíduo da poda do eucalipto, que quando ativado com H_3PO_4 apresenta taxa de adsorção da amoxicilina dissolvida na água, por volta de 84,5% (Pacheco *et al.*, 2025).

O carvão comercial (CC) demonstrou baixa eficiência e pequena alteração nos resultados sem e com a impregnação do ácido cítrico, sendo assim, é correto afirmar que o ácido não causou alterações significativas nas propriedades adsorptivas do CC, e sua capacidade de adsorção do flúor ficou em média 20%.

O biocarvão ativado com CO_2 foi o adsorvente de flúor com maior eficiência registrada nos testes realizados, com uma diferença significativa em relação aos outros adsorventes, e tendo sua capacidade de adsorção maximizada quando impregnado com ácido cítrico, apresentando um salto na adsorção, de 25,5% para 98,5% de remoção do flúor da água. O CO_2 mostrou-se o melhor agente ativante do biocarvão provindo da borra de café, assim como indicado por outros autores para biocarvões de outras matérias-primas, como do resíduo de processamento de açaí, onde foi registrada uma taxa de 84,28% na adsorção do contaminante 2-naftol em água (Dias *et al.*, 2023).

O biocarvão sem ativar apresentou o segundo melhor resultado entre os adsorventes, quando imbuído por ácido cítrico, atingindo uma taxa de 96,36% de adsorção do flúor da água.

A **Figura 3** apresenta a diferença entre o biocarvão sem ativar e o ativado com CO_2 , para uma melhor visualização da diferença entre os dois adsorventes com maiores taxas de adsorção na pesquisa:

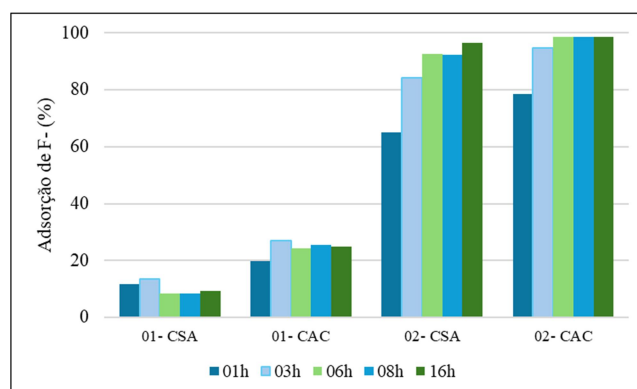


Figura 3. Comparação entre Biocarvão Ativado com CO_2 (CAC) e o Biocarvão sem ativar (CSA), com e sem a presença de ácido cítrico.

Ambos os adsorventes tiveram melhor desempenho quando impregnados com ácido cítrico, desta forma pode-se afirmar que o biocarvão sem ativar + ácido cítrico foi o segundo melhor adsorvente de flúor presente na água, ultrapassado apenas pelo biocarvão ativado com CO_2 + ácido cítrico, o qual obteve os melhores resultados em todos os tempos analisados, sobretudo em seis horas de contato com a solução.

Os resultados encontrados para 02-CSA e 02-CAC foram próximos e até superiores à atuação adsorptiva de outros materiais também modificados com o ácido cítrico, como a alumina mesoporosa estudada por Li *et al.*, em 2022, que apresentou uma taxa de adsorção de F- de 98,20%, e o carvão ativado granular que removeu 70% do flúor presente nas amostras segundo Rashid & Bezbaruah, (2020).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O biocarvão provindo da borra de café mostrou-se um excelente adsorvente de flúor em meio aquoso, quando modificado com ácido cítrico, sem ativar e ativado com dióxido de carbono, ambos atingindo um equilíbrio na taxa de adsorção em 06:00hs. Sendo assim há a possibilidade de se utilizar tal material como suporte para tratamento hídrico, removendo o flúor da água e evitando o descarte inadequado da borra de café na natureza. Todavia há a necessidade de maiores estudos frente sua capacidade adsorptiva também para outros poluentes presentes na água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALI S., FAKHRI Y., GOLBINI M., THAKUR SK., ALINEJAD A., PARSEH I., SHEKHAR S., BHATTACHARYA P. **Concentração de flúor nas águas subterrâneas da Índia: uma revisão sistemática, meta-análise e avaliação de risco.** Groundwater for Sustainable Development, v. 9, 2019, p. 100224, 10.1016/j.gsd.2019.100224.
2. ALVES, ACF; Antero, RVP; Oliveira, SB; Ojala, SA; Scalize, PS. **Carvão Ativado Produzido a Partir de Resíduos de Borra de Café para uma Remoção Eficaz de Bisfenol-A em Meio Aquoso.** Environ. Sci. Pollut. Res. 2019, 26, 24850–24862. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-019-05717-7>. Acesso em 24 jan. 2025.
3. BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Dia mundial do café: Brasil é o maior produtor mundial e o segundo maior consumidor de café.** Brasília, DF: Mapa, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-e-o-maior-produtor-mundial-e-o-segundo-maior-consumidor-de-cafe>. Acesso em 13 fev. 2025.
4. CARDOSO, Lucas Carvalho et al. **Associação entre o consumo de dieta hipercalórica e cafeína e suas implicações sobre a gestação em modelo murino.** Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte- MG, 74 p. 2023.
5. DIAS, Livia Francisca Araújo et al. **Ensaio Iniciais para aplicação do Biocarvão de Açaí Ativado como adsorvente na Remoção de 2-Naftol em efluentes.** 2023.
6. DOS SANTOS, Hellem Victoria R.; Scalize, Paulo Sérgio; Cuba, Francisco Javier T. e Frayne, Renata Medici C. 2023. **Remoção de flúor de meio aquoso usando biocarvão produzido a partir de borra de café.** Recursos 12, no. 7: 84. <https://doi.org/10.3390/resources12070084>
7. HIRATA, M.; KAWASAKI, N.; NAKAMURA, T.; MATSUMOTO, K.; KABAYAMA, M.; TAMURA, T.; TANADA, S. **Adsorption of dyes onto carbonaceous materials produced from coffee grounds by microwave treatment.** Journal of Colloid and Interface Science, Japan, n. 254, 17-22, 2002.
8. LEE, K.-T.; DU, J.-T.; CHEN, W.-H.; UBANDO, AT; LEE, KT. **Aditivo verde para melhorar o biochar de borra de café usada por torrefação para mitigação da poluição.** Environ. Pollut. 2021, 285, 117244.
9. LI, Y.; YANG, Y.; QU, G.; REN, Y.; WANG, Z.; NING, P.; WU, F.; CHEN, X. **Reuse of secondary aluminum ash: Study on removal of fluoride from industrial wastewater by mesoporous alumina modified with citric acid.** Environmental Technology & Innovation. Vol. 28, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102868>.
10. MCNUTT, Josiah et al. **Spent coffee grounds: A review on current utilization.** Journal of industrial and engineering chemistry, v. 71, p. 78-88, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226086X18314825?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=90c466c809f6cb14. Acesso em 03 fev. 2025.
11. MELO, B.; ALVEZ, B.; OTERO, D.; DA SILVA, F.; SCALIZE, P.; DE OLIVEIRA, T. **By-Products of Baru and Monguba: A Review of Their Potential.** Food Humanity 2024, 4, 100477, doi:10.1016/j.foohum.2024.100477.
12. ONU - Organização das Nações Unidas. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.** 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em 10 dez. 2024.
13. PACHECO, M. de C., ALMEIDA, G. S. de, SANTOS, V. Z. dos, GASPARIN, F. P., & RIES, L. A. da S. **Estudo preliminar da remoção de amoxicilina presente em águas empregando biochar ativado oriundo do resíduo da poda do Eucalipto.** Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, 8(1), e76882, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.34188/bjaerv8n1-039>. Acesso em 25 fev. 2025.
14. RASHID, Umma Salma; BEZBARUAH, Achintya N. **Citric acid modified granular activated carbon for enhanced defluoridation.** Chemosphere, v. 252, p. 126639, 2020.
15. ROCHA, Diego Pessoa, COELHO, Nívia Maria Melo. **Extração e pré-concentração em linha de flúor em águas e determinação pelo Método de Spadns.** Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015, p. 81 f. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/17448>. Acesso em 04 fev. 2025.
16. SADHU, M.; BHATTACHARYA, P.; VITHANAGE, M.; SUDHAKAR, PP. **Remoção adsorptiva de flúor usando biochar — uma aplicação potencial no tratamento de água potável.** Separation and Purification Technology, v. 278, p. 119106, 2021.
17. SHIN, Hyuna; TIWARI, Diwakar; KIM, Dong-Jin. **Phosphate adsorption/desorption kinetics and P bioavailability of Mg-biochar from ground coffee waste.** Journal of Water Process Engineering, v. 37, p. 101484, 2020.
18. ZOU, W.H., ZHAO, L., 2012. **Removal of uranium(VI) from aqueous solution using citric acid modified pine sawdust: batch and column studies.** J. Radioanal. Nucl. Chem. 292 (2), 585 e 595.