

BIOCARVÃO COMO MEIO FILTRANTE NA REMEDIAÇÃO DA ÁGUA RESIDUÁRIA DO CAFÉ: ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E BIOLÓGICAS

Augusto César Santos Oliveira¹, Thalita Sousa Silva¹, Benvindo Sirtoli Gardiman Junior² Tatiana da Silva Souza¹.

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Alto Universitário, S/N, Guararema, 29500-000, Alegre-ES, Brasil, augusto.acso@gmail.com, talitassilva72@hotmail.com, tatianas.souza@hotmail.com

²Instituto Federal do Espírito Santo, campus Ibatiba, CEP 29395-000, Ibatiba, ES, Brasil, benvindo.gardiman@ifes.edu.br

Resumo

O processamento do café por via úmida gera a água residuária do café (ARC), caracterizada por alta carga orgânica, acidez e compostos tóxicos. Este estudo avaliou colunas filtrantes com biocarvão da casca do café para tratar a ARC. Foram realizadas análises físico-químicas e bioensaios com *Lactuca sativa* L. e *Allium cepa* L. para verificar efeitos fitotóxicos e citogenotóxicos. O tratamento reduziu significativamente DQO, açúcares, fenóis, nutrientes (N, P, K) e turbidez, além de elevar o pH e sólidos dissolvidos. Também promoveu recuperação parcial da germinação e crescimento radicular em *L. sativa*, além de restaurar o índice mitótico, alterações cromossômicas e a viabilidade celular em *A. cepa*. Contudo, alterações mutagênicas persistiram, indicando que a ARC tratada ainda apresenta toxicidade residual. Os resultados demonstram o potencial do biocarvão como alternativa sustentável para a remediação de efluentes da cafeicultura, embora ajustes sejam necessários para garantir segurança ambiental e viabilidade agrícola do efluente tratado.

Palavras-chave: Efluente. Fitotoxicidade. Resíduos Agrícolas.

Área do Conhecimento: Ciências agrárias (subárea: Agronomia)

Introdução

O processamento do café por via úmida, destinado à produção de grãos de alta qualidade, gera grandes volumes de água residuária do café (ARC), caracterizada por alta carga orgânica, pH ácido, elevadas DBO e DQO e teores significativos de K, N e P (Gardiman Junior *et al.* 2022). Esse efluente apresenta toxicidade comprovada em diferentes bioindicadores (*Allium cepa*, *Lactuca sativa*, *Eichhornia crassipes*, *Danio rerio*), além de impactos ambientais como salinização do solo, alteração da microbiota e eutrofização de corpos hídricos (Aguilar *et al.* 2016; Souza *et al.* 2020; Ahmed *et al.* 2021).

Dentre as alternativas de tratamento da ARC o biocarvão, obtido por pirólise de resíduos vegetais, é promissor devido suas propriedades físico-químicas adequadas para a adsorção de contaminantes (Trivedi *et al.* 2025).

A casca de café, resíduo sólido abundante e subutilizado, pode ser convertida em biocarvão para uso em colunas filtrantes, proporcionando simultaneamente o tratamento da ARC e a mitigação de problemas associados ao descarte inadequado de resíduos da cafeicultura.

Este estudo avaliou a eficiência de colunas filtrantes contendo biocarvão de casca de café no tratamento da ARC, combinando análises físico-químicas e bioensaios de fitotoxicidade (*L. sativa*) e citogenotoxicidade (*A. cepa*), a fim de verificar a redução dos efeitos tóxicos e mutagênicos do efluente e o potencial do biocarvão como solução sustentável e de baixo custo.

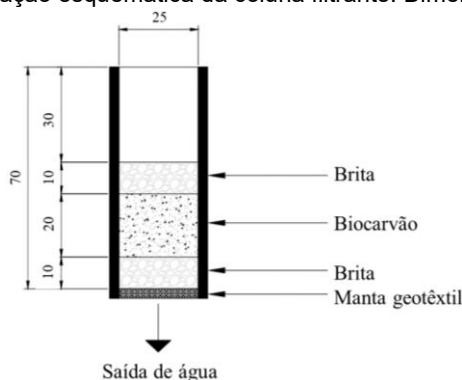
Metodologia

A ARC foi coletada em uma propriedade localizada no município de Espera Feliz - MG a 1789 mil metros de altitude, com coordenadas UTM 220873 S 7729647 E, Zona 24 K. A coleta e armazenamento seguiram a normativa NBR 9898/87.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Para o tratamento da ARC, foi construída uma coluna filtrante de PVC, possuindo 25 cm de diâmetro, e 70 cm de altura. Dois tipos de meios filtrantes foram utilizados: biocarvão (1-3 mm de diâmetro) proveniente da casca do café e brita (diâmetro de 4-6 mm). O esquema e as dimensões básicas da coluna filtrante são ilustrados na Figura 1. Foram construídas 3 colunas filtrantes idênticas; cada coluna constituindo uma repetição.

Figura 1 – Representação esquemática da coluna filtrante. Dimensões em centímetros



Fonte: elaborado pelos autores

Para a análise da fitotoxicidade da ARC pré tratada (ARC1) e pós tratada (ARC2), foram utilizadas sementes de *L. sativa* (alface) (Isia). Os experimentos foram conduzidos de acordo com Aragão et al. (2024), em um delineamento inteiramente casualizado. Três placas de Petri foram utilizadas por tratamento. Em cada placa foram colocadas 20 sementes sobre papel filtro umedecido com a ARC1 ou ARC2. Após 24 h de exposição, o índice de germinação e o crescimento radicular foram estimados. Para isso, as raízes foram medidas com auxílio do paquímetro digital (mm). Água destilada foi utilizada como controle negativo.

Sementes de *A. cepa* foram germinadas por 96 h à $\pm 24^\circ\text{C}$ em água destilada e, posteriormente, expostas por 24 h à ARC1 ou ARC2 em delineamento inteiramente casualizado (3 placas por tratamento). Dez raízes por repetição foram fixadas em etanol:ácido acético (3:1; v/v), submetidas à hidrólise ácida (HCl 5M, 20 min) e coradas com reagente de Schiff (2 h, ausência de luz). Os meristemas radiculares foram esmagados entre lâmina e lamínula. Foram analisadas 1000 células por lâmina, totalizando 5000 células, para determinar índice mitótico e os índices de genotoxicidade e de mutagenicidade.

O ensaio de viabilidade celular foi realizado de acordo com Huang et al. (2022). Dez raízes de *A. cepa* foram coradas azul de Evans (0,25% p/v) por 20 minutos, depois lavadas com água destilada até remoção do excesso de corante, embebidas com 4 mL de N,N-dimetilformamida por 2 horas em temperatura ambiente e centrifugadas a 3000 rpm por 5 minutos para a extração do corante das células. A absorbância do extrato foi medida usando um espectrofotômetro (IL 226-nm Kazuaki) a 600 nm.

Os dados foram inicialmente avaliados quanto à distribuição pelo teste de Shapiro-Wilk. Para os conjuntos de dados que apresentaram distribuição normal, realizou-se análise de variância (ANOVA) seguida do teste de Dunnett ($p < 0,05$) para comparar cada tratamento com o controle negativo, e aplicou-se o teste t de Student ($p < 0,05$) para avaliar diferenças entre o efluente antes e após o tratamento. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R.

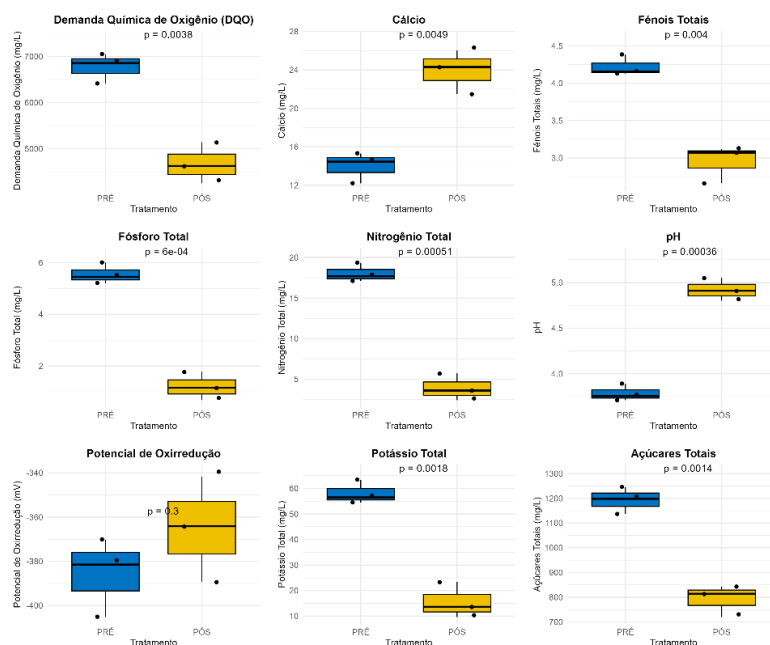
Resultados

O tratamento alterou as características físico-químicas da ARC. Na ARC2, os valores de DQO, açúcares totais, fenóis e macronutrientes (P, N, K) foram reduzidos em relação à ARC1, indicando remoção parcial de compostos orgânicos e fenólicos pelo biocarvão. Em contrapartida, observou-se o aumento do teor de cálcio e do pH, enquanto o potencial de oxirredução não apresentou variação significativa (Figura 2). A série de sólidos da ARC apresentou mudanças significativas após o tratamento (Figura 3). Houve redução nos sólidos suspensos totais e voláteis, bem como nos sólidos totais, voláteis e dissolvidos, resultando também em menor turbidez. Em contrapartida, os sólidos

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

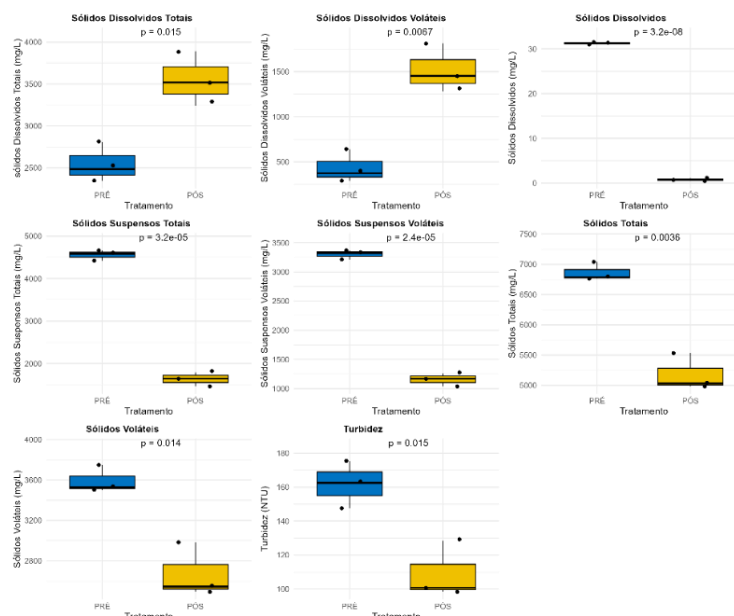
dissolvidos totais e voláteis aumentaram, indicando redistribuição das frações sólidas no efluente tratado.

Figura 2 - Comparação dos parâmetros químicos da ARC pré e pós-tratamento com biocarvão. Seguidos do teste t de Student (nível de significância) de 5%. Diferença estatisticamente significativas entre pré e pós estão indicadas por valores-p em cada parâmetro.



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 3 - Comparação da série de sólidos da ARC pré e pós-tratamento com biocarvão. Seguidos do teste t de Student (nível de significância) de 5%. Diferença estatisticamente significativas entre pré e pós estão indicadas por valores-p em cada parâmetro.



A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Fonte: elaborado pelos autores

A ARC1 inibiu totalmente a germinação e o crescimento radicular de *L. sativa*, enquanto a ARC2 promoveu recuperação parcial (33,3% de germinação), evidenciando redução da fitotoxicidade após o tratamento (Tabela 1). Para *A. cepa*, houve redução do índice mitótico (IM) na ARC1 e aumento significativo na ARC2, aproximando-se do controle (Tabela 1). Alterações cromossômicas foram elevadas na ARC1 e menores na ARC2, sem diferença estatística em relação ao controle, indicando eficácia do biocarvão. Entretanto, tanto ARC1 quanto ARC2 elevaram a frequência de alterações mutagênicas (micronúcleos e brotos nucleares) e aumentaram a frequência de morte celular (8,2% e 5,98%, respectivamente) em comparação ao controle.

Tabela 1 – Fitototoxicidade, citotoxicidade e alterações cromossômicas em células meristemáticas de *A. cepa* expostas na ARC pré e pós-tratamento em coluna filtrante com biocarvão da casca do café

Tratamentos	Controle Negativo	ARC1	ARC2
Germinação (%)	86,6±7,63	0±0	33,3±28,41
Crescimento radicular (mm)	6,55±0,57	0±0	1,5±1,34
Índice mitótico (IM)	5,98±2,96	2,42±1,43*	5,82±2,01
Alterações cromossômicas	0,56±0,52	1,5±0,52*	0,6±0,35
Alterações mutagênicas	1,08±0,37	2,92±1,46*	1,48±0,54*
Morte celular	0±0	8±2,93*	5,98±2,84*

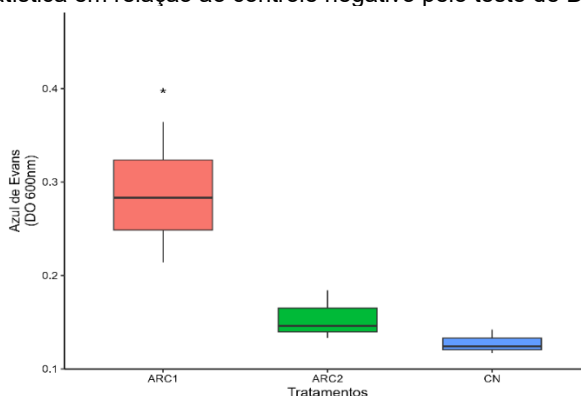
Média ± Desvio Padrão, seguidas de * diferem do controle negativo pelo teste de Dunnet em um nível de significância de p-valor < 0,05.

Fonte: elaborado pelos autores.

Além do IM, outro parâmetro utilizado para avaliar o efeito citotóxico da ARC pré e pós-tratamento, foi a integridade de membrana celular das raízes de *A. cepa*. Para isso levou-se em consideração a quantificação da absorção do corante azul de Evans, cuja retenção intracelular está associada a danos à membrana plasmática. Os resultados demonstraram diferença estatística entre os tratamentos, refletindo os efeitos da ARC1 e ARC2 sobre a permeabilidade celular (Figura 4).

As raízes tratadas com ARC1 apresentaram maior densidade óptica (DO), evidenciando danos à membrana celular em comparação ao controle. No tratamento com ARC2, os valores de DO foram reduzidos e próximos ao controle, indicando que a filtração com biocarvão atenua os efeitos tóxicos da ARC.

Figura 4 - Quantificação da integridade da membrana celular por meio da absorbância do corante Azul de Evans (600nm) em raízes de *A. cepa* expostas a ARC pré-tratamento (ARC1) e pós-tratamento (ARC2) em coluna filtrante com biocarvão da casca do café. CN: Controle negativo; DO: Densidade óptica. Asterisco (*) indica diferença estatística em relação ao controle negativo pelo teste de Dunnet (p<0,05).



Fonte: elaborado pelos autores.

Discussão

Os resultados obtidos reforçam o potencial do uso de colunas filtrantes com biocarvão na remoção de matéria orgânica e na atenuação da toxicidade da água residuária do café (ARC). Estudos

anteriores mostram reduções expressivas na DQO, podendo alcançar até 80%, dependendo das características do biocarvão utilizado (Bui et al., 2024). Esse desempenho está associado à elevada área superficial e porosidade do material, que favorecem a adesão de microrganismos degradadores e a retenção de partículas por filtração mecânica e adsorção (Manyuchi et al., 2018). Além disso, a alta relação C/N do biocarvão contribui para a adsorção de nitrogênio (El Barkaoui et al., 2025), enquanto o conteúdo mineral (Ca, Fe, Al) auxilia na remoção de fósforo (Perez-Mercado et al., 2018).

A elevação do pH e o incremento de cálcio no efluente tratado podem estar ligados à liberação de compostos alcalinos e minerais presentes no próprio biocarvão, confirmando seu caráter alcalinizante (pH 10,2). Contudo, o aumento nos sólidos dissolvidos totais e voláteis sugere que substâncias solúveis formadas durante a pirólise podem ser liberadas no processo de filtração (Wu et al., 2019).

Do ponto de vista biológico, a ARC não tratada (ARC1) foi extremamente fitotóxica, inibindo a germinação e o crescimento radicular de *L. sativa*. Esse efeito está associado à elevada carga orgânica, pH ácido e presença de compostos fenólicos e cafeína (Aguiar et al., 2016). Após o tratamento (ARC2), observou-se recuperação parcial, atribuída à adsorção de compostos tóxicos e partículas em suspensão (Trivedi et al., 2025).

Nas análises citogenotóxicas com *A. cepa*, a ARC1 reduziu drasticamente o índice mitótico (IM) e induziu alterações cromossômicas, como cromossomos aderentes e c-metáfases, associadas a falhas no fuso mitótico e segregação cromossômica (Leme & Marin-Morales, 2009). A ARC2 reduziu parcialmente esses efeitos a níveis próximos aos do controle. Porém, foi mutagênica. A morte celular observada nos tratamentos pode ser explicada por essas alterações estruturais, visto que a compactação cromossômica prejudica a viabilidade celular (Fiskesjö, 1985).

A integridade da membrana plasmática, avaliada pelo corante azul de Evans, confirmou danos celulares induzidos pela ARC1 (Zhang et al., 2018). Embora a ARC2 tenha atenuado esses efeitos, a toxicidade residual indica que ajustes no processo são necessários para garantir a segurança ambiental do efluente tratado.

Conclusão

A água residuária do café (ARC) apresentou alto potencial poluidor e tóxico, com elevada carga orgânica, acidez, compostos fenólicos e nutrientes, causando fitotoxicidade em *L. sativa* e citogenotoxicidade em *A. cepa*. O tratamento com biocarvão da casca de café melhorou significativamente a qualidade do efluente, reduzindo DQO, compostos orgânicos, fenólicos, nutrientes e sólidos suspensos, além de diminuir a turbidez. Embora tenha atenuado os efeitos citotóxicos e genotóxicos, a presença de compostos mutagênicos e indutores de morte celular persistiu, evidenciando a necessidade de otimização do processo, seja por maior tempo de retenção, ajuste da temperatura de pirólise ou pós-tratamentos complementares. O estudo demonstra que o uso de resíduos da cafeicultura para produção de biocarvão representa uma estratégia sustentável para tratar a ARC, transformando um passivo ambiental em solução alinhada à economia circular no setor cafeeiro.

Referências

- Aguiar, L. L.; Andrade-Vieira, L. F.; David, J. A. O. Evaluation of the toxic potential of coffee waste on seeds, roots and meristematic cells of *Lactuca sativa* L. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.07.019>.
- Ahmed, H. M.; Abdullah, S. R. S.; Hasan, H. A.; Et al. Influence of concentration and biomass quantity of water hyacinth as a pre-treatment step: phytotoxicity of coffee wastewater on *Eichhornia crassipes*. **Environmental Engineering and Management Journal**, 20, p. 1543 1544 (2021).
- Bui, V. K. H.; Nguyen, T. P.; Tran, T. C. P.; et al. Biochar-based fixed filter columns for water treatment: a comprehensive review. **Science of the Total Environment**, v. 954, p. 176199 (2024). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176199.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

El barkaoui, S.; Mandi, L.; Fichera, M.; et al. Optimizing biochar-based column filtration systems for enhanced pollutant removal in wastewater treatment: A preliminary study. **Chemosphere**, v. 372, art. 144067 (2025). DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144067.

Fiskesjö, G. The Allium test as a standard in environmental monitoring. **Hereditas**, v. 102, p.99–112 (1985). <https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1985.tb00471.x>.

Gardiman Junior, B. S.; Guimarães, D.; Freitas, W. S.; Et al. Treatment of Coffee Wasterwater with recirculation: optmization and validation. **Internation Journal of Environmental Science and Technology**, 19, p. 363-397 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03340-z>.

Huang, J.; Han, R.; Ji, F.; et al. Glucose-6-phosphate dehydrogenase and abscisic acid mediate programmed cell death induced by aluminum toxicity in soybean root tips. **Journal of Hazardous Materials**. 425 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127964>.

Leme, D. M.; e Marin-Morales, M. A. Allium cepa test in environmental monitoring: A review on its application. **Mutation Research/Reviews in Mutation Research**, v. 682(1), p. 71–81 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2009.06.002>.

Manyuchi, M. M.; Mbohwa, C.; Muzenda, E. Potential to use municipal waste bio char in wastewater treatment for nutrients recovery. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 107, p. 92–95 (2018). DOI: 10.1016/j.pce.2018.07.002.

Perez-mercado, L. F.; Lalander, C.; Berger, C.; et al. Potential of Biochar Filters for Onsite Wastewater Treatment: Effects of Biochar Type, Physical Properties and Operating Conditions. **Water**, v. 10, n. 12, art. 1835 (2018). DOI: 10.3390/w10121835.

Souza, E. D. V.; Henriques, J. A.; Junior, b. S. G.; Vieira, A. F. S. Avaliação ecotoxicológica da água residuária do café por meio de bioensaios com Danio rerio. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, <https://doi.org/10.14210/bjast.v24n2.16267>.

Trivedi, Y.; Sharma, M.; Mishra, R. K.; et al. Biochar potential for pollutant removal during wastewater treatment: A comprehensive review of separation mechanisms, technological integration, and process analysis. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118509>.

Türkoğlu S. Determination of genotoxic effects of chlorfenvinphos and fenbuconazole in Pestic Allium cepa root cells by mitotic activity, chromosome aberration, DNA content, and comet assay. **Biochem Physiol**, <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2012.06.001>.

Wu, H.; Qi, Y.; Dong, Lu; et al. Revealing the impact of pyrolysis temperature on dissolved organic matter released from the biochar prepared from Typha orientalis. **Chemosphere**, v. 228, p. 264–270 (2019). DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.143.

Zhang, Y.; Chen, X.; Gueydan, C.; Han, J. Plasma membrane changes during programmed cell deaths. **Cell research**, v. 28, n. 1, p. 9-21 (2018). <https://doi.org/10.1038/cr.2017.133>.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES).