REMOÇÃO DE CAFEÍNA EM CARVÃO ATIVADO PULVERIZADO

Alana Francischini Ferreira[(1)]
Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).
Beatriz Pinho de Almeida[(2)]
Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).
Julia Roberta Candido[(3)]
Técnica em Meio Ambiente pelo Instituto Federal de Mato Grosso Campus Bela Vista (IFMT), graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).
Rafael Scholze Venuti[(4)]
Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).
Amanda Alcaide Francisco Fukumoto[(5)]
Engenheira Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Londrina (UTFPR). Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). Docente do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso.

Endereço[(1)]**:** Rua T-5, quadra 42, 06 – Parque Cuiabá – Cuiabá – Mato Grosso - CEP: 78095-467 - Brasil - Tel: +55 (65) 99207-9355 - e-mail: alana.ferreira@sou.ufmt.br

RESUMO

A cafeína é considerada um poluente emergente frequentemente encontrado em mananciais de abastecimento, apresentando baixa remoção pelos sistemas convencionais de tratamento de água. Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência do carvão ativado pulverizado (CAP), produzido a partir da madeira de Pinus, na remoção de cafeína em solução aquosa. Os ensaios foram realizados com concentração inicial de aproximadamente 20 mg/L de cafeína, utilizando dosagens de CAP de 250, 300, 350 e 400 mg/L. Os experimentos ocorreram a 25 °C, sob agitação contínua de 150 rpm, durante 70 minutos, com coletas realizadas a cada 10 minutos. Os resultados demonstraram elevada eficiência de adsorção para todas as dosagens testadas, com remoções acima de 90% ao final do experimento. O melhor desempenho foi obtido com a dosagem de 400 mg/L de CAP, que alcançou 99,53% de remoção em 50 minutos de contato, resultando em concentração residual de apenas 0,09 mg/L. Conclui-se que o método apresentou alta eficiência de remoção e a adsorção em CAP é uma alternativa promissora para a remoção de cafeína em tratamentos de água, embora sejam necessários estudos adicionais em condições reais de abastecimento, visando futuras aplicações práticas.

PALAVRAS-CHAVE: Poluentes emergentes, Adsorção, Tratamento de água.

INTRODUÇÃO

A presença de contaminantes emergentes nos recursos hídricos em todo o mundo é uma das maiores preocupações ambientais contemporâneas, já que os impactos que eles podem ocasionar aos organismos expostos e ao ambiente ainda não são bem compreendidos (SOARES; LEÃO, 2015; KOREKAR et al., 2020). Entre os compostos de preocupação emergente, destaca-se a cafeína (1,3,7-trimetilxantina), a substância psicoativa mais consumida no mundo (COLINBENOIT et al., 2017). Ela é encontrada naturalmente em mais de 60 espécies vegetais e constitui muitos alimentos e bebidas (KOREKAR et al., 2020), medicamentos, suplementos alimentares (BIESTERBOS et al., 2019), moderadores de apetite e estimulantes (MONTAGNER et al., 2014; MONTAGNER et al., 2017; COLIN-BENOIT et al., 2017). Após a ingestão, a sua meia-vida no organismo é de cerca de 4 a 5 horas (DOEPKER, 2016), e aproximadamente 3% do total ingerido é excretado pela urina (MONTAGNER et al., 2017). O consumo elevado de cafeína pode desenvolver efeitos negativos à saúde de adultos e crianças, afetando o sono, provocando dores de cabeça, problemas cardíacos, ansiedade, náusea, entre outros (NAWROT et al., 2003).

Dessa forma, com o aumento do consumo diário e a constante eliminação por efluentes domésticos e industriais, observa-se aumento da concentração de cafeína em corpos d'água (KOREKAR et al., 2020), sendo ela um indicador químico de ambientes contaminados, diretamente relacionado a atividades humanas, e possível indicador de contaminação ambiental por esgoto doméstico (GARDINALI; ZHAO, 2002; IDE; ARTIGAS, 2011). No Brasil,

uma estimativa baseada em dados da Pesquisa de Orçamentos Familiares de 2008-2009 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) revelou um consumo diário de cafeína de pouco mais de 115 mg por pessoa (SARTORI; SILVA, 2013). Os níveis de concentração de cafeína no esgoto bruto variam em função de inúmeros aspectos, tais como padrão de consumo, temperatura, época do ano, número de habitantes atendidos, extensão e capacidade da rede de esgotamento sanitário (INCTAA, 2014). No município de Campinas, SP, cafeína foi encontrada no esgoto bruto do em níveis de mais de 290 µg/L (SODRÉ et al., 2010).

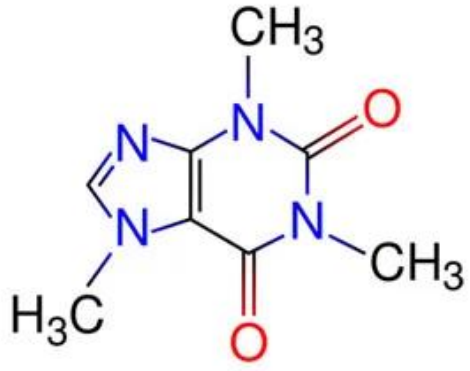
Em matrizes ambientais, tais como águas superficiais e de abastecimento, a concentração dos contaminantes emergentes ocorre em nível de traços, ou seja, da ordem de picogramas (10^{-12} g) a miligramas (10^{-3} g) por litro de amostra, essas concentrações são consideradas baixas e, por isso, requerem tanto tratamentos específicos (INCTAA, 2014). No Brasil, a qualidade das águas superficiais é regulamentada pela Resolução CONAMA nº 357/2005 e a água destinada ao consumo humano deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Entretanto, apesar da relevância da cafeína como poluente emergente, não há legislação específica que estabeleça limites ou exija o monitoramento desse contaminante em águas superficiais ou destinadas ao consumo humano.

Portanto, o tratamento de água convencional, seguindo as etapas de coagulação, floculação, sedimentação, filtração, desinfecção e fluoretação não são eficazes para a remoção dos contaminantes emergentes e seus metabólitos, além de as estações de tratamento de água normalmente não serem dimensionadas para removê-los (BRACK et al., 2015; RIBEIRO et al., 2015). Desse modo, torna-se necessário a busca por tecnologias complementares capazes de remover a cafeína das águas superficiais de forma eficiente. Entre as alternativas disponíveis, a adsorção em carvão ativado destaca-se por sua elevada capacidade de remoção, simplicidade operacional e potencial aplicação em sistemas de tratamento de água. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do carvão ativado pulverizado (CAP), produzido a partir da madeira de pinus, na remoção de cafeína em solução aquosa, investigando o efeito de diferentes concentrações de adsorvente e tempos de contato sobre o processo de adsorção.

METODOLOGIA

A cafeína é um composto alcalóide, identificado como 1,3,7-trimetilxantina, em sua forma pura é um pó branco, em que sua estrutura assemelha-se às purinas, conforme Figura 1. É um dos compostos com atividade biológica mais ingeridos no planeta (DE MARIA et al., 2007). Têm massa molar de 194,19 g/mol e o volume de distribuição no organismo é de 0,7 L/kg, um valor que sugere que ela é hidrofílica e se distribui livremente na água intracelular dos tecidos, no entanto, a cafeína também é suficientemente lipofílica para atravessar todas as membranas biológicas e cruza facilmente a barreira hematoencefálica (ARNAUD, 1987, 1993).

Figura 1 – Estrutura química da cafeína



Fonte: Brasil escola, 2026.

CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ ADSORVENTE

O CAP utilizado nos ensaios de adsorção da cafeína, produzido a partir da madeira de Pinus, foi adquirido comercialmente, sendo disponibilizada sua caracterização em relação aos parâmetros de número de iodo (mg/g), umidade (%), teor de cinzas (%), granulometria, pH e adsorção de azul de metileno (mL/g).

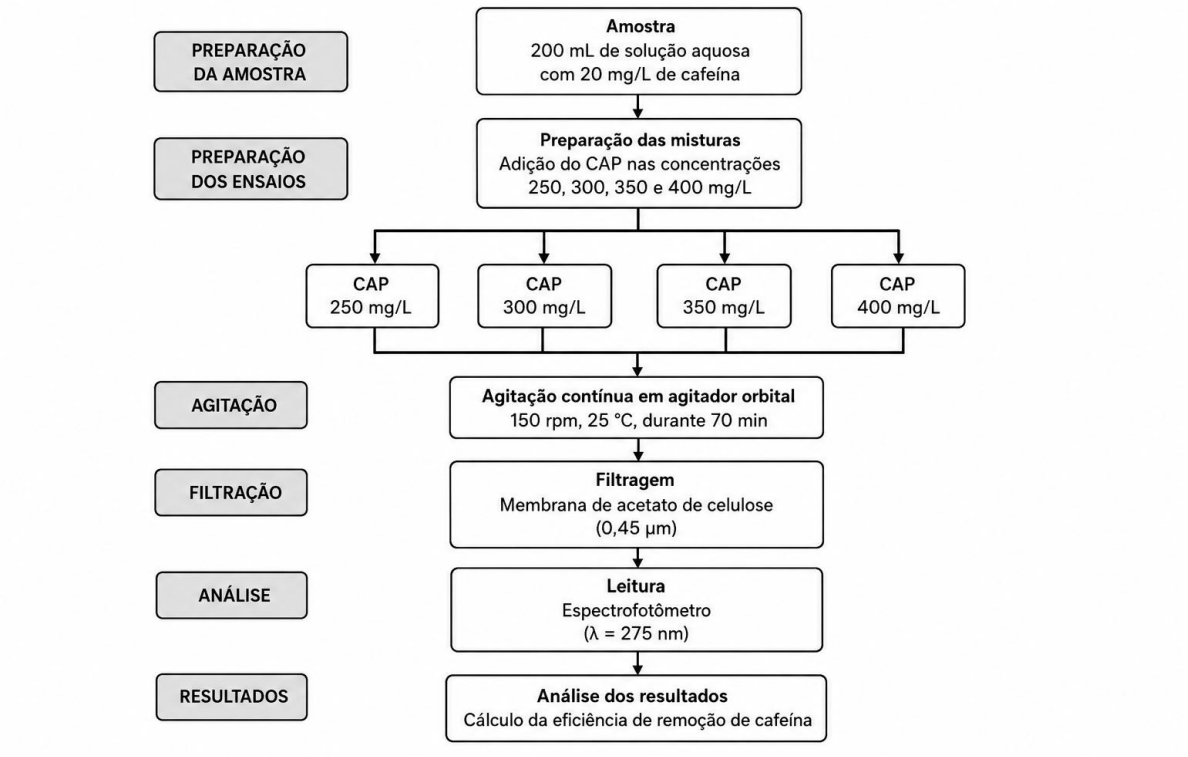
Além dessas análises, de forma a complementar a caracterização do CAP utilizado, foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para investigar as propriedades da superfície do CAP e de Brunauer–Emmett–Teller (BET) e Barrett–Joyner–Halenda (BJH) para a determinação da área superficial específica e da distribuição do volume e tamanho de poros. Para a obtenção das imagens do MEV, foi utilizado um microscópio Zeiss EVO-MA10, operando com voltagem de aceleração de 20 kV e aproximação de 100µm e 10µm. Já para a análise BET e BJH, foi empregado um analisador de área superficial por adsorção/dessorção de nitrogênio (N2) (JWGB BK400), operando a -196 °C.

Para avaliar a adsorção de cafeína em CAP, os ensaios foram realizados utilizando a concentração da ordem de 20 mg/L de cafeína, preparada com água destilada em um volume de reação de 200 mL. Os experimentos de adsorção foram realizados a 25°C, com concentrações empregadas de CAP de 250, 300, 350 e 400 mg/L, as coletas foram realizadas a cada 10 minutos em agitação continua totalizando o tempo de 70 minutos de experimento. A agitação das amostras ocorreu a velocidade 150 rpm em agitador orbital (KLA-210), em seguida as amostras foram filtradas em membrana de acetato de celulose com abertura de 0,45µm e levadas para leitura em espectrofotômetro UV-Vis DR 6000, com comprimento de onda de 273 nm. A eficiência de remoção foi calculada conforme a fórmula de eficiência na equação 1.

$$\mathbf{n = ((C_0 - C_f) / C_0) \times 100}$$ equação (1)

Onde:
n = Eficiência de remoção (%);
C_0 = Concentração inicial (mg/L);
C_f = Concentração final (mg/L).

Figura 2 – Fluxograma do procedimento experimental de adsorção de cafeína em carvão ativado pulverizado (CAP)



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

CARACTERIZAÇÃO DO CAP

Na Tabela 1 são apresentadas as informações fornecidas pelo fabricante do CAP. O Número de Iodo (NI) foi de 710,84 mg/g, valor superior ao limite mínimo de 600 mg/g estabelecido pela NBR 11834/1991 para carvões ativados pulverizados utilizados no tratamento de água de abastecimento. Esse parâmetro está diretamente relacionado à quantidade de microporos presentes no material, sendo amplamente utilizado para estimar sua microporosidade. Além disso, a adsorção de azul de metileno foi de 76 mL/g, indicando a capacidade do carvão ativado em adsorver moléculas de maior dimensão, associadas principalmente à presença de mesoporos. Em conjunto, os resultados sugerem que o CAP apresenta estrutura porosa adequada e potencial para aplicação em processos de adsorção no tratamento de água.

Tabela 1 - Informações do fabricante do CAP

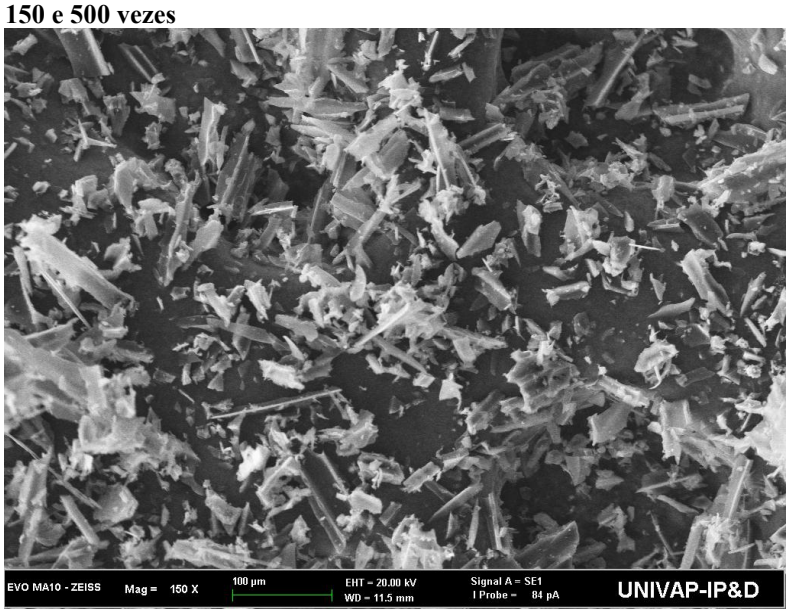
Parâmetros analisados	Resultados
Número de Iodo (mg/g)	710,84
Umidade (%)	6,80
Cinzas (%)	7,90
Granulometria	92,65
pH	Alcalino
Adsorção de Azul de Metileno (mL/g)	76

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

A área superficial, o volume de poros e o diâmetro médio dos poros do CAB foram de 688,95 m^2/g, 0,45 cm^3/g e 2,61nm, respectivamente. Uma área superficial de 688,95 m^2/g sugere que a amostra possui uma superfície significativamente grande, o que pode ser vantajoso em processos que dependem da interação com a superfície do material. A elevada área superficial obtida favorece a interação entre o adsorvente e os contaminantes presentes na solução aquosa, contribuindo diretamente para a eficiência do processo de remoção.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para complementar a caracterização dos materiais adsorventes empregados na remoção de cafeína. Para tanto, foram utilizadas ampliações de 150 e 500 vezes, nas quais foi possível verificar a presença de estruturas irregulares em forma de fibras, conforme esperado para materiais de origem vegetal (LIMA et al., 2014). Resultados semelhantes foram observados por Silveira (2024), que ao caracterizar carvões ativados produzidos a partir de biomassa vegetal por MEV, verificou superfícies heterogêneas e irregulares com a presença de fibras remanescentes do material precursor. Essas características morfológicas são frequentemente relatadas para adsorventes lignocelulósicos e podem contribuir para o desenvolvimento da porosidade e da área superficial do material, favorecendo a adsorção de contaminantes em meio aquoso.

Figura 3 - Micrografias do CAP obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura, com aproximação de 150 e 500 vezes



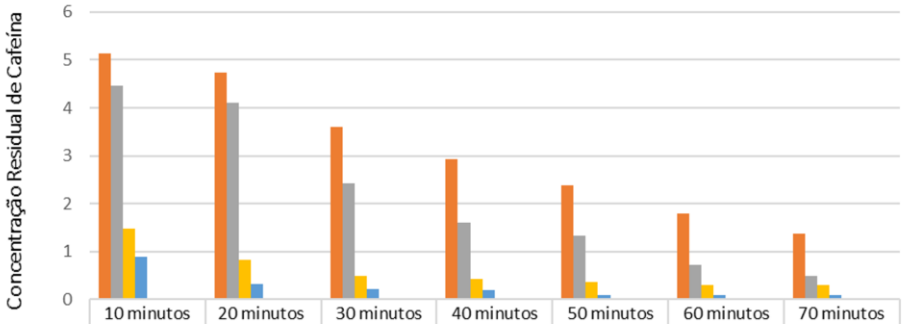


Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

ADSORÇÃO DA CAFEÍNA

Dentre os resultados obtidos todas as dosagens de CAP apresentaram porcentagens de remoção superiores a 70%, desde a primeira coleta e na última a porcentagem foi superior a 90%. Dentre as concentrações de carvão de 250 a 400 mg/L, a maior eficiência de remoção foi obtida para a dosagem de 400 mg/L de CAP, no tempo de contato de 50 minutos, alcançando 99,53% de remoção e resultando em uma concentração residual de 0,09 mg/L, podendo ser observado na figura 4.

Figura 4 – Porcentagem de remoção de cafeína



	10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos	50 minutos	60 minutos	70 minutos
250 mg/L	5,13	4,74	3,59	2,92	2,38	1,79	1,36
300 mg/L	4,47	4,10	2,42	1,60	1,33	0,72	0,48
350 mg/L	1,47	0,83	0,48	0,43	0,36	0,30	0,29
400 mg/L	0,88	0,32	0,21	0,19	0,09	0,09	0,09
Eficiência de remoção (%) - 250 mg/L	72,40	74,50	80,69	84,29	87,20	90,37	92,68
Eficiência de remoção (%) - 300 mg/L	75,95	77,94	86,98	91,39	92,84	96,13	97,41
Eficiência de remoção (%) - 350 mg/L	92,29	95,64	97,48	97,74	98,11	98,43	98,48
Eficiência de remoção (%) - 400 mg/L	95,38	98,32	98,90	99,00	99,53	99,53	99,53

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

A taxa de adsorção depende de vários fatores, incluindo a área superficial, a natureza do material precursor, o tamanho, a distribuição e a porosidade dos grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente e o volume específico dos poros (DOMINGUES, 2005). Comparando aos estudos disponíveis na literatura sobre carvão ativado pulverizado de origem vegetal, como Silveira (2024) e Junior (2014) o carvão ativado pulverizado avaliado

apresentou elevada capacidade adsortiva para a remoção de cafeína. Enquanto outros autores reportam tempos de equilíbrio da ordem de horas e com eficiência de remoção inferior a 99%, neste estudo foram obtidas eficiências superiores a 99% utilizando-se apenas 400 mg L^{-1} de CAP e 50 minutos de contato, considerando a concentração inicial de 20 mg/L de cafeína. Esses resultados indicam uma cinética de adsorção mais rápida e maior aproveitamento dos sítios ativos do adsorvente, tornando-o uma alternativa promissora para aplicações em tratamento de água. Assim, os processos adsortivos utilizando carvões ativados (CAs) como adsorvente, destaca-se devido a sua eficácia no tratamento de águas e baixo custo (PERILLI T. A. G.; SICUPIRA, 2014).

Cabe destacar que os ensaios foram realizados sob condições controladas de laboratório, com temperatura mantida em 25 °C e sem ajuste do pH do meio. Essa abordagem permitiu avaliar de forma isolada a capacidade adsortiva do carvão ativado pulverizado, minimizando possíveis interferências de outros compostos presentes em matrizes aquosas. No entanto, para uma avaliação mais próxima das condições reais de aplicação, estudos futuros poderão ser conduzidos utilizando água bruta de mananciais ou outras fontes de abastecimento, nas quais a presença de matéria orgânica, sólidos suspensos, íons dissolvidos e variações de pH podem influenciar o desempenho do processo adsortivo. Essas investigações permitirão verificar a eficiência do adsorvente em cenários mais representativos das condições encontradas em sistemas de tratamento de água.

CONCLUSÃO

A adsorção em carvão ativado pulverizado (CAP) mostrou-se uma alternativa promissora para a remoção de cafeína, apresentando elevada eficiência mesmo em menores tempos de contato e concentrações de adsorvente quando comparada aos resultados encontrados na literatura. Dessa forma, o CAP produzido a partir da madeira de Pinus demonstra potencial para aplicação como etapa complementar de filtração no tratamento de água destinada ao abastecimento humano. Contudo, estudos futuros devem ser realizados com água bruta de mananciais de abastecimento, visando avaliar o desempenho do adsorvente em condições mais próximas da realidade operacional das estações de tratamento de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11834, de 30 de agosto de 1991. Carvão ativado pulverizado – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

2. ARNAUD, M. J. A farmacologia da cafeína. Progress in Drug Research, v. 31, p. 273–313, 1987.

3. ARNAUD, M. J. Metabolismo da cafeína e outros componentes do café. In: GARATTINI, S. (ed.). Cafeína, Café e Saúde. New York: Raven Press, 1993. p. 43–95.

4. BRACK, W. et al. The SOLUTIONS project: challenges and responses for present and future emerging pollutants in land and water resources management. Science of The Total Environment, Amsterdam, v. 503, p. 22–31, 2015.

5. COLIN-BENOIT, E.; FRIOLET, R.; RUSCA, M.; TETA, D.; GOBIN, N. Intoxication sévère à la caféine traitée par hémodialyse et hémodiafiltration. Néphrologie & Thérapeutique, v. 13, p. 183–187, 2017.

6. DE MARIA, C. A. B.; MOREIRA, R. F. A. Cafeína: revisão sobre métodos de análise. Química Nova, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 99–105, 2007.

7. DOEPKER, C.; LIEBERMAN, H. R.; SMITH, A. P.; PECK, J. D.; EL-SOHEMY, A.; WELSH, B. T. Caffeine: friend or foe? Annual Review of Food Science and Technology, v. 7, p. 117–137, 2016.

8. DOMINGUES, V. M. F. Utilização de um produto natural (cortiça) como adsorvente de pesticidas piretróides em águas. 2005. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2005.

9. GARDINALI, P. R.; ZHAO, X. Trace determination of caffeine in surface water samples by liquid chromatography atmospheric pressure chemical ionization-mass spectrometry (LC-APCI-MS). Environment International, v. 28, n. 6, p. 521–528, 2002.

10. IDE, A. H.; ARTIGAS, A. V. Utilização da cafeína como traçador da atividade antrópica na bacia do alto Iguaçu. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Processos Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

11. INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS ANALÍTICAS AVANÇADAS (INCTAA). Cafeína em águas de abastecimento público no Brasil. Ed. Maria Cristina Canela et al. São Carlos: Editora Cubo, 2014.

12. JUNIOR, Osorio Moreira Couto. Adsorção de cafeína e paracetamol em carvão ativado funcionalizado. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2014.

13. KOREKAR, G.; KUMAR, A.; UGALE, C. Occurrence, fate, persistence and remediation of caffeine: a review. Environmental Science and Pollution Research, v. 27, n. 3, p. 34715–34733, 2020.

14. LIMA, Lisandra. Avaliação da remoção de sulfametoxazol, diclofenaco e E2-estradiol em águas por adsorção em carvão ativado granular. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, 2014.

15. MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABA, R. D. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. Química Nova, v. 40, n. 9, p. 1094–1110, 2017.

16. MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; SODRÉ, F. F.; PESCARA, I. C.; JARDIM, W. F. Cafeína no ambiente. In: CANELA, M. C.; SODRÉ, F. F.; JARDIM, W. F.; GRASSI, M. T. Cafeína em águas de abastecimento público no Brasil. São Carlos: Editora Cubo, 2014. p. 11–18.

17. NAWROT, P.; JORDAN, S.; EASTWOOD, J.; ROTSTEIN, J.; HUGENHOLTZ, A.; FEELEY, M. Effects of caffeine on human health. Food Additives and Contaminants, v. 20, p. 1–30, 2003.

18. PERILLI, T. A. G.; SICUPIRA, D. C. M. M. B. L. A. C. Q. Avaliação da capacidade adsortiva de carvão ativado para a remoção de manganês. HOLOS, v. 30, n. 3, Edição Especial XXV ENTMME/VII MSHNT, p. 264, 2014.

19. RIBEIRO, A. R.; NUNES, O. C.; PEREIRA, M. F. R.; SILVA, A. M. T. An overview on the advanced oxidation processes applied for the treatment of water pollutants defined in the recently launched Directive 2013/39/EU. Environment International, v. 75, p. 33–51, 2015.

20. SARTORI, A. G. O.; SILVA, M. V. Consumo de cafeína no Brasil. Nutrire, v. 38, supl., p. 71–71, 2013.

21. SILVEIRA, Davi Batista. Carvão ativado magnético para o tratamento de efluentes da indústria cafeeira. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Física) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2024.

22. SOARES, A. F. S.; LEÃO, M. M. D. Contaminação dos mananciais por micropoluentes e a precária remoção desses contaminantes nos tratamentos convencionais de água para potabilização. Doutrina Internacional Ensaio, v. 14, n. 24, p. 36–85, jan./jun. 2015.

23. SODRÉ, F. F.; LOCATELLI, M. A. F.; JARDIM, W. F. Occurrence of emerging contaminants in Brazilian drinking waters: a sewage-to-tap issue. Water, Air and Soil Pollution, v. 206, p. 57–67, 2010.