



AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE DUAS TÉCNICAS DE EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS DE FOLHA DE BAMBU POR MEIO DA FERRAMENTA SPMS

A. R. dos Reis¹, J. A. Camponogara¹, A. C. A. A. Farias¹, I. G. Oliveira¹; C.A. Ballus¹; M. T. Barcia¹

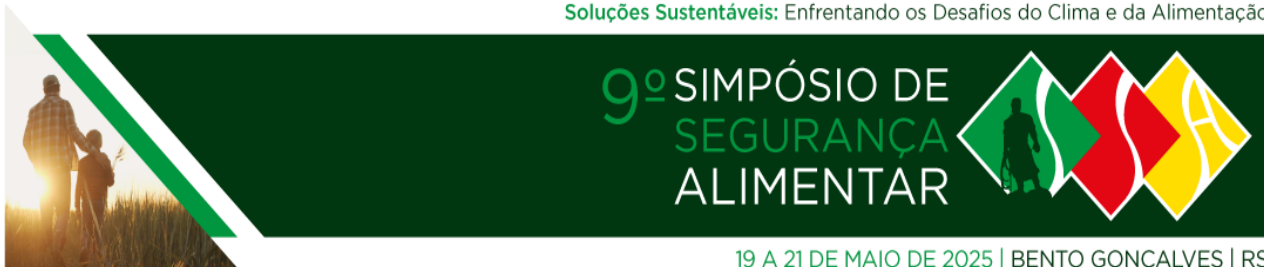
1- Departamento de Ciência e Tecnologia dos Alimentos/ Universidade Federal de Santa Maria (andrear.reis@acad.ufsm.br; juliana.alves@acad.ufsm.br; carla.farias@acad.ufsm.br; isac.goncalves@acad.ufsm.br; cristiano.ballus@ufsm.br; milene.barcia@ufsm.br)

RESUMO – As técnicas de extração verde são essenciais para a sustentabilidade, pois minimizam o uso de solventes orgânicos, consumo de energia e tempo de processamento. Uma forma de avaliar a extração é utilizando a Métrica de Sustentabilidade no Preparo de Amostra (SPMS), que avalia a eficiência do processo e consumo energético. Este estudo teve como objetivo avaliar o caráter sustentável de duas técnicas de extração de compostos fenólicos das folhas de bambu a partir da SPMS. As técnicas de extração envolveram a utilização de sonda de ultrassom e agitação mecânica. A partir da análise dos dados de extração percebe-se que as técnicas obtiveram uma pontuação final superior a 7, ultrapassando 70% da tonalidade verde associada à química verde e que a técnica utilizando sonda ultrassônica, obteve uma maior concentração de compostos fenólicos. A partir deste estudo foi possível observar que as técnicas podem ser consideradas sustentáveis para extração dos compostos fenólicos.

ABSTRACT – Green extraction techniques are essential for sustainability, as they minimize the use of organic solvents, energy consumption, and processing time. One way to assess extraction efficiency is by using the Sample Preparation Green Metric (SPMS), which evaluates the efficiency of the process and energy consumption. This study aimed to evaluate the sustainability of two phenolic compound extraction techniques from bamboo leaves using SPMS. The extraction techniques involved the use of an ultrasound probe and mechanical stirring. Based on the extraction data analysis, it was observed that both techniques achieved a final score above 7, exceeding 70% of the green zone associated with green chemistry. Moreover, the technique using the ultrasound probe resulted in a higher concentration of phenolic compounds. This study demonstrated that both techniques can be considered sustainable for the extraction of phenolic compounds.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade; fenólicos; bambu. **KEYWORDS:** Sustainability; Phenolics; Bamboo.

1. INTRODUÇÃO



O bambu é uma planta lenhosa sustentável, com uma ampla variedade de aplicações. Ele faz parte de um conjunto de plantas perenes com flores, que pertencem à subfamília Bambusoideae dentro da família das gramíneas Poaceae (Zhao *et al.*, 2019).

As folhas do bambu são essenciais para a planta, pois sintetizam metabólitos secundários, como os compostos fenólicos, que desempenham funções importantes, como defesa contra raios ultravioleta e patógenos, além de contribuir para a pigmentação de matrizes vegetais (Nirmala *et al.*, 2018; Cheynier *et al.*, 2012). O interesse por proteger esses compostos bioativos tem crescido, e a obtenção deles pode ser feita por métodos convencionais e não convencionais (Yusoff *et al.*, 2022). Os métodos convencionais, vem sendo criticados, por serem menos ecológicos, devido ao uso excessivo de solventes tóxicos e etapas demoradas (Rajput e Desai, 2024).

Com o aumento da preocupação da sustentabilidade na preparação e extração de amostras, esforços significativos têm sido feitos para desenvolver novas técnicas de extração (Gonzalez-Martín *et al.*, 2023). Essas inovações incluem o desenvolvimento de fases de proteção mais ecológicas, o uso de fontes de energia renováveis e eficientes, além da automação de todo o processo (Garrigues e Guardia, 2020). A SPMS (Sample Preparation Metric of Sustainability) possibilita avaliar e comparar técnicas de extração de forma eficiente, visando a sustentabilidade do método (Gonzalez-Martín *et al.*, 2023). Com base nisso, este estudo tem como objetivo avaliar, com base na métrica SPMS, o caráter sustentável de duas técnicas de extração de compostos fenólicos das folhas de bambu, utilizando sonda de ultrassom e a agitação mecânica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Amostras

As folhas de bambu da espécie denominada *Dendrocalamus asper*, foram coletadas em uma propriedade rural (29°39'21.17"S 53°46'56.39"W) localizada na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

2.2 Preparo da amostra

Para preservar as propriedades bioativas, as folhas de bambu foram secas utilizando o método de liofilização (Terroni-Fauvel-LH2000/3) a temperaturas variando de -4 a -5 °C, durante 72 horas, com o objetivo de remover a água livre das folhas. Após a liofilização, as folhas foram trituradas em um moinho de facas (Marconi-MA630/1) e, em seguida, passaram por peneiração com



19 A 21 DE MAIO DE 2025 | BENTO GONÇALVES | RS

malha 45 (TPL LTDA-INOX 8" x 2"), a qual apresentava um diâmetro médio de partícula de 350 μm , com o intuito de obter uma amostragem mais homogênea. As amostras foram mantidas a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ para conservar suas características até o momento das análises.

2.3 Extração dos compostos fenólicos da folha de bambu em sonda ultrassônica

A extração dos compostos fenólicos da folha de bambu foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Farias *et al.* (2024) com modificações. As folhas de bambu foram conduzidas em frascos de polipropileno com capacidade de 150 mL, diâmetro interno de 6,1 cm, altura de 8 cm e fundo cônico. Para isso utilizou-se as seguintes condições: sonda ultrassônica operando a uma frequência de 20 kHz, com potência nominal de 130 W, aplicador com 0,4 cm de diâmetro e altura de 13,5 cm (Sonics, Newtown, EUA), 0,4 g de amostra em 50 mL de solvente extrator, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 1 min de extração. A ponta da sonda ultrassônica foi submersa cerca de 1 cm a partir do fundo do frasco. Após a sonicação os extratos foram centrifugados e filtrados sob vácuo e armazenados a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.4 Extração dos compostos fenólicos da folha de bambu sob agitação mecânica

Um agitador mecânico (PT3100 D, Polytron, Suíça) equipado com uma ponta homogeneizadora (diâmetro 10 mm) foi utilizada para extração sob agitação silenciosa. Para isso utilizou-se as seguintes condições: agitação mecânica a 500 rpm, 0,4 g de amostra em 50 mL de solvente extrator, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 14 min de extração. Após a extração com agitação mecânica, os extratos foram centrifugados e filtrados sob vácuo e armazenados a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.5 Compostos fenólicos totais (Folin-Ciocalteu)

Os compostos fenólicos totais foram realizados conforme Singleton *et al.* (1999) a partir de uma análise espectrométrica com leitura no comprimento de onda de 765 nm. Foi realizado uma curva de calibração com ácido gálico sendo os resultados expressos em mg equivalente de ácido gálico por 100 g de folha de bambu seca.

2.6 Métrica de sustentabilidade no preparo de amostra

Para avaliar se os métodos propostos seguem os princípios da química analítica verde, utilizou-se o SPMS, que foi desenvolvida por Gonzalez-Marín *et al.* (2023) a. Esta métrica possui uma



escala de 0 a 10, onde 0 representa o menos sustentável e 10 o mais sustentável. Nesse sistema, verde indica "bem-sucedido", amarelo significa "aceitável", laranja aponta para "tolerável" e vermelho representa "inadequado". A métrica SPMS oferece uma visão detalhada sobre a sustentabilidade dos processos de preparação de amostras, com foco na natureza do extrator, e aborda novos aspectos diferentes: quantidade de amostra (1); quantidade de extrator (2); natureza do extrator (3); número de etapas (4); tempo de extração (5); etapas adicionais após a extração (6); amostras simultâneas (7); consumo de energia (8); desperdício total (9); reutilização simbolizada com (*) (Gonzalez-Martín *et al.*, 2023).

2.7 Análise estatística

Para análise estatística utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk (normalidade) e Levene (homoscedasticidade). Posteriormente, aplicou-se o teste t para comparar as extrações dos compostos fenólicos, considerando $p < 0,05$ como significativo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise de compostos fenólicos totais, a extração por sonda ultrassônica a 130 W apresentou uma concentração de $1027,01 \pm 12,14$ mg de equivalente de ácido gálico por 100g de folha de bambu seca, um valor significativamente ($p < 0,005$) superior a extração por agitação mecânica, a qual atingiu aproximadamente $792,40 \pm 23,90$ mg de equivalente de ácido gálico por 100 g de folha de bambu seca. Diante disso, os resultados obtidos são apresentados para a diferenciação entre os métodos, evidenciando que a extração por sonda ultrassônica extrai uma concentração maior de compostos fenólicos. Além disso, essa abordagem permite avaliar e diferenciar procedimentos que seguem os mesmos princípios de extração, mas que apresentam pequenas diferenças operacionais.

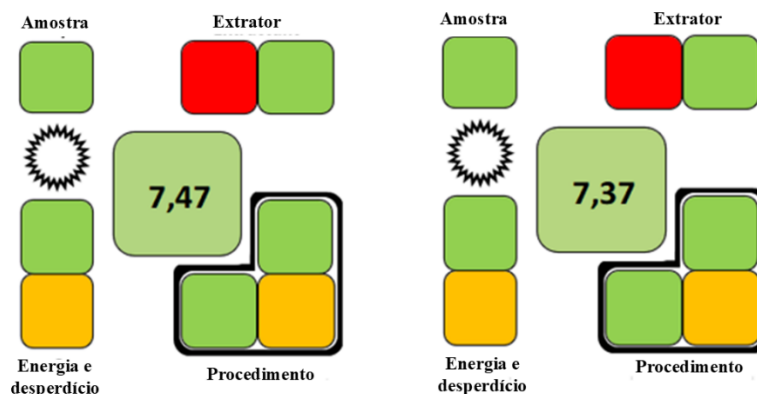
Como pode ser observado na Figura 1 a partir da comparação dos dois métodos de extração com base na métrica SPMS, que avalia a sustentabilidade do processo. Ambos apresentaram altos valores de SPMS — 7,47 para a sonda de ultrassom e 7,37 para a agitação mecânica — indicando a sustentabilidade dos métodos. A sonda de ultrassom mostrou leve vantagem, possivelmente devido à maior eficiência em menor tempo, reduzindo o consumo energético total, apesar da maior demanda instantânea. Embora mais tecnológica, pode ser otimizada para minimizar perdas térmicas e operacionais. A agitação mecânica, embora mais simples e acessível, requer tempos maiores, o que compromete sua eficiência. Assim, ambas as técnicas são sustentáveis, com preferência pela sonda ultrassônica quando se busca maior eficiência e rapidez.



Figura 1. A) Métrica verde SPMS para sonda de ultrassom; B) Métrica verde SPSM para agitação mecânica.

mecânica.

A) SPMS utilizando sonda de ultrassom B) SPMS utilizando agitação mecânica



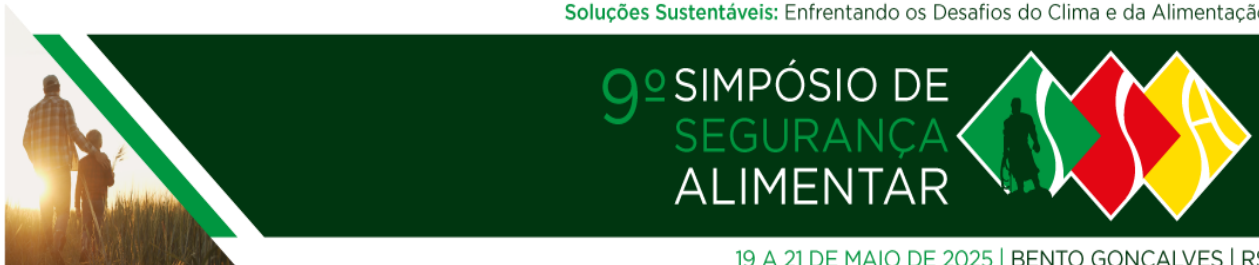
Fonte: Figura adaptada de González-Martín et al., 2024.

Com base nos resultados apresentados na Figura 1, observa-se uma semelhança entre os métodos propostos, que atingiram uma pontuação total superior a 7, superando 70% da tonalidade verde. Isso sugere que os métodos de extração atendem a maioria dos requisitos da química analítica verde. Tais resultados podem ser atribuídos ao uso de água como solvente, a quantidade de amostra, que foi de apenas 0,4 g, ao tempo de extração de 14 e 11 minutos e à temperatura de 25 °C,

Por outro lado, a cor vermelha na área do solvente é atribuída à quantidade de solvente utilizada no processo de extração dos compostos fenólicos totais, que totaliza 50 mL. Nesse sentido, a métrica adotada favorece metodologias de microextração, que operam com volumes menores, geralmente na faixa de microlitros, ou seja, abaixo de 500 µL (Rajput e Desai, 2024). No entanto, essa característica não compromete a eficiência nem a sustentabilidade dos processos, pois a abordagem proposta mantém índices de desempenho elevados e está em conformidade com as exigências ambientais. Dessa maneira, podemos concluir que a aplicação da métrica SPMS possibilita uma avaliação eficaz dos métodos de preparação de amostras.

4. CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que os procedimentos de extração sugeridos seguem os princípios da sustentabilidade, uma vez que os resultados alcançados são eficientes e permitem uma análise ampla



19 A 21 DE MAIO DE 2025 | BENTO GONÇALVES | RS

e diversificada da métrica de SPMS como ferramenta. Mas que, diante da análise de compostos fenólicos totais, a sonda ultrassônica destaca-se quando comparada com a agitação mecânica. Desta forma, assegura-se que o método por sonda ultrassônica, além de promover uma maior extração dos compostos fenólicos, também se encontra em conformidade com os princípios de sustentabilidade e a redução do impacto ambiental, fundamentais para a química analítica verde.

5. AGRADECIMENTOS

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico –CNPq/MCTI/FNDCT N°18/2021; CNPq/PQ 307668/2022-3; Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES; Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica- PIBIC; Universidade Federal de Santa Maria-UFSM; Grupo de pesquisa VegeTalBio.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHEYNIER, V. Phenolic compounds: From plants to foods. **Phytochemistry Reviews**, vol. 11, no. 2–3, p. 153–177, Jun. (2012). <https://doi.org/10.1007/s11101-012-9242-8>.

FARIAS, C. A. A., DOS REIS, A. R., DE MORAIS, D. R., CAMPONOGARA, J. A., BETTIO, L., PUDENZI, M. A., BALLUS, C. A., BARCIA M. T. Phenolic diversity and antioxidant potential of different varieties of bamboo leaves using LC-ESI-QTOF-MS/MS and LC-ESI-QqQ-MS/MS, **Food Research International**, vol. 179, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114025>.

GARRIGUES, S., ARMENTA, S., DE LA, G. M. Green strategies for decontamination of analytical wastes. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 29, n. 7, p. 592–601, (2010).

GONZÁLEZ-MARTÍN, R. A., GUTIÉRREZ-SERPA, V. P., SAJID, M. A tool to assess analytical sample preparation procedures: Sample preparation metric of sustainability, **J Chromatogr A** 1707 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2023.464291>.

NIRMALA, C., BISHT, M. S., BAJWA, H. K., SANTOSH, O. Bamboo: A rich source of natural antioxidants and its applications in the food and pharmaceutical industry. **Trends in Food Science and Technology**, vol. 77, p. 91–99, 1 Jul. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.003>.

RAJPUT, R. S., DESAI. Assessment of greenness for solid phase microextraction techniques of sample preparation for flavors by AGREE Prep & SPMS tools, **Green Analytical Chemistry**, vol. 11, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2024.100167>

SINGLETON, V. L., ORTHOFER, R., LAMUELA-RAVENTÓS, R. M. Polyphenols and flavonoids, **Analysis of Total Phenols and Other Oxidation Substrates and Antioxidants by Means of Folin-Ciocalteu Reagent**, vol. 52, (1999).

YUSOFF, I. M., MAT, T. Z., RAHMAT, Z., CHUA, L. S. A review of ultrasound-assisted extraction for plant bioactive compounds: Phenolics, flavonoids, thymols, saponins and proteins. **Food Research International**, vol. 157, 1 Jul. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111268>.

ZHAO, Y., DU, Y., KANG, J. S. Characterization and classification of three common Bambusoideae species in Korea by an HPLC-based analytical platform coupled with multivariate statistical analysis. **Industrial Crops and Products**, vol. 130, p. 389–397, 1 Apr. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.096.a>