UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

Universidade Estadual Paulista - Campus de São José do Rio Preto.

Iaquine Maria Castilho Bezerra

COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO DE SUBPRODUTOS AGROINDUSTRIAIS PARA SUA CONVERSÃO EM PRODUTOS DE VALOR AGREGADO:

estudos com bagaço de uva e bagaço de cana-de-açúcar

São José do Rio Preto

2026

Iaquine Maria Castilho Bezerra

Comportamento higroscópico de subprodutos agroindustriais para sua conversão em produtos de valor agregado:

estudos com bagaço de uva e bagaço de cana-de-açúcar

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto/SP., para obtenção do título de Doutor(a) em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos em Programa de Pós Graduação em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos.

Área de Concentração: Alimentos e Nutrição

Orientador(a): Prof. Dr. Javier Telis Romero

São José do Rio Preto - SP

2026

B574c

Bezerra, Iaquine Maria Castilho

Comportamento higroscópico de subprodutos agroindustriais para sua conversão em produtos de valor agregado : estudos com bagaço de uva e bagaço de cana-de-açúcar / Iaquine Maria Castilho Bezerra. -- São José do Rio Preto, 2026

107 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

Orientador: Javier Telis Romero

1. Isotermas de sorção. 2. Atividade de água. 3. Umidade de equilíbrio. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A presente pesquisa apresenta potencial de impacto científico, tecnológico, econômico, social, educacional, ambiental e cultural ao ampliar o conhecimento sobre o comportamento higroscópico de subprodutos agroindustriais, com ênfase no bagaço de cana-de-açúcar e nos bagaços de uva Bordô e Merlot. No âmbito científico, os resultados contribuem para o conhecimento das relações entre composição química, estrutura da matriz, atividade de água, umidade de equilíbrio e propriedades termodinâmicas de sorção, destacando a importância da caracterização específica de diferentes matérias-primas e cultivares. A caracterização inédita e comparativa das propriedades de sorção dos bagaços de uva Bordô e Merlot amplia a base de conhecimento disponível para estudos futuros.

Do ponto de vista técnico e inovador, os dados obtidos fornecem subsídios para o planejamento e a otimização de operações de secagem, estabilização, armazenamento e conservação desses materiais. A identificação das condições de interação água–sólido e da atividade de água adequada ao armazenamento do bagaço de uva contribui para a definição de condições mais eficientes de processamento, podendo favorecer a redução de perdas e a manutenção da qualidade dos subprodutos. Esses conhecimentos também podem apoiar futuras estratégias de transformação das biomassas em ingredientes, materiais e outros produtos de maior valor agregado.

No âmbito econômico e social, a pesquisa fortalece a perspectiva de aproveitamento integral de resíduos e subprodutos gerados pelas cadeias agroindustriais, contribuindo para sua transição de materiais de baixo valor para matérias-primas potencialmente aproveitáveis em processos de maior valor agregado. Essa abordagem pode favorecer a redução de desperdícios, o uso mais eficiente dos recursos e a geração de novas oportunidades de aplicação tecnológica. Quanto ao desenvolvimento sustentável, o trabalho está alinhado aos princípios da economia circular e da valorização de biomassa, ao propor

conhecimento científico capaz de apoiar o aproveitamento de subprodutos agroindustriais e a redução de perdas. Dessa forma, contribui para uma utilização mais racional dos recursos naturais e para o desenvolvimento de processos agroindustriais mais sustentáveis.

No âmbito educacional e cultural, os resultados constituem material de referência para formação e capacitação nas áreas de Engenharia de Alimentos, Ciência e Tecnologia de Alimentos, Engenharia Química, Ciências Agrárias e áreas correlatas, além de favorecer a disseminação do conhecimento sobre aproveitamento de resíduos, sustentabilidade e inovação na agroindústria. A pesquisa também valoriza o conhecimento associado às cadeias produtivas da cana-de-açúcar e da uva e à transformação de seus subprodutos em recursos tecnológicos.

Em relação à inserção local, regional e nacional, os conhecimentos produzidos apresentam aplicabilidade às cadeias agroindustriais que geram biomassas lignocelulósicas e resíduos de processamento, podendo subsidiar pesquisas e futuras aplicações em diferentes escalas. A abordagem integrada adotada permite que os resultados sejam utilizados como base para estudos de engenharia de processos, desenvolvimento de produtos e estratégias de valorização de biomassa.

Finalmente, a pesquisa apresenta potencial de internacionalização por abordar uma temática de interesse global — a valorização sustentável de subprodutos agroindustriais e o aproveitamento de biomassa — utilizando metodologias, modelos matemáticos e parâmetros termodinâmicos amplamente empregados na literatura científica internacional. Os resultados, portanto, contribuem para ampliar a inserção da pesquisa brasileira no debate científico sobre sustentabilidade, economia circular, processamento de biomassa e desenvolvimento de produtos de maior valor agregado.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The present research has the potential to generate scientific, technological, economic, social, educational, environmental, and cultural impacts by expanding knowledge on the hygroscopic behavior of agro-industrial by-products, with emphasis on sugarcane bagasse and Bordô and Merlot grape pomaces. From a scientific perspective, the results contribute to understanding the relationships among chemical composition, matrix structure, water activity, equilibrium moisture content, and sorption thermodynamic properties, highlighting the importance of the specific characterization of different raw materials and cultivars. The novel comparative characterization of the sorption properties of Bordô and Merlot grape pomaces expands the available knowledge base for future studies.

From a technical and innovative perspective, the data obtained provide support for the planning and optimization of drying, stabilization, storage, and preservation operations for these materials. The identification of water–solid interaction conditions and the appropriate water activity for grape pomace storage contributes to defining more efficient processing conditions, potentially reducing losses and maintaining the quality of these by-products. This knowledge may also support future strategies for transforming these biomasses into ingredients, materials, and other higher-value-added products.

From an economic and social perspective, the research strengthens the potential for the comprehensive utilization of residues and by-products generated by agro-industrial chains, contributing to their transition from low-value materials to potentially useful raw materials for higher-value-added processes. This approach may contribute to reducing waste, improving resource efficiency, and creating new opportunities for technological applications. Regarding sustainable development, the study is aligned with the principles of the circular economy and biomass valorization by providing scientific knowledge capable of supporting the utilization of agro-industrial by-products and reducing losses. In this way, it contributes to a more rational use of natural resources and to the

development of more sustainable agro-industrial processes.

From an educational and cultural perspective, the results constitute a reference for education and training in Food Engineering, Food Science and Technology, Chemical Engineering, Agricultural Sciences, and related fields, while also promoting the dissemination of knowledge on waste utilization, sustainability, and innovation in the agro-industrial sector. The research also contributes to valuing the knowledge associated with sugarcane and grape production chains and the transformation of their by-products into technological resources.

With regard to local, regional, and national integration, the knowledge generated has applicability to agro-industrial chains that produce lignocellulosic biomass and processing residues and may support research and future applications at different scales. The integrated approach adopted allows the results to serve as a basis for studies on process engineering, product development, and biomass valorization strategies.

Finally, the research has internationalization potential because it addresses a globally relevant topic—the sustainable valorization of agro-industrial by-products and biomass utilization—using methodologies, mathematical models, and thermodynamic parameters widely employed in the international scientific literature. Therefore, the results contribute to strengthening the international visibility of Brazilian research in the scientific discussion on sustainability, circular economy, biomass processing, and the development of higher-value-added products.

Iaquine Maria Castilho Bezerra

Comportamento higroscópico de subprodutos agroindustriais para sua conversão em produtos de valor agregado:

estudos com bagaço de uva e bagaço de cana-de-açúcar

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto/SP., para obtenção do título de Doutor(a) em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos em Programa de Pós Graduação em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos.

Área de Concentração: Alimentos e Nutrição

Data da defesa: 24/09/2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Javier Telis Romero
UNESP - Universidade Estadual Paulista - Campus de São José do Rio Preto/SP.

Prof.a Dra. Jane Selia dos Reis Coimbra
Universidade Federal de Viçosa - UFV.

Prof.a Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa
Universidade Federal de Lavras - UFLA.

Prof.a Dr. Marcio Augusto Ribeiro Sanches
Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e à vida, pela oportunidade de chegar até aqui, pela força para permanecer e superar as adversidades, sobretudo, pela saúde que me permitiu concluir este trabalho.

Agradeço, à minha família, alicerce fundamental em todos os momentos da minha caminhada. Obrigada pelo amor, pela compreensão, pelo incentivo, pela paciência e por acreditarem em mim, inclusive nos momentos em que eu mesma tive dúvidas sobre minha capacidade de continuar. Esta conquista também pertence a vocês.

Ao meu orientador Javier Telis Romero, expresso minha especial gratidão pela orientação, pelos ensinamentos, pelas discussões científicas, pelo acolhimento, disponibilidade e por todas as contribuições que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e deste período da minha vida. Orientar uma pesquisa é também participar da formação de uma pessoa e de uma profissional, e sou grata por tudo aquilo que aprendi e levarei sempre comigo.

Agradeço também a todos os professores, pesquisadores, técnicos, colegas e integrantes do grupo de pesquisa e do laboratório que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste estudo.

A ciência é feita de resultados, mas também é feita de pessoas. É feita de colaboração, de perguntas, de tentativas, de erros, de recomeços e da disposição de compartilhar aquilo que se sabe para que o conhecimento possa avançar. Exige honestidade para reconhecer aquilo que os dados demonstram, mesmo quando os resultados não correspondem às expectativas. Exige humildade para admitir aquilo que ainda não sabemos, responsabilidade para comunicar aquilo que sabemos e coragem para questionar aquilo que acreditamos saber.

Esta tese representa uma conquista científica, mas também representa resiliência, amadurecimento, superação e extrema gratidão.
A todos que contribuíram para que este momento fosse possível, meu muito obrigada.

Que eu possa honrar cada ensinamento recebido não apenas pelo conhecimento que produzi, mas também pela profissional, pesquisadora e pessoa que escolho continuar sendo. E que, eu jamais me esqueça que a verdadeira grandeza de uma trajetória não está apenas em chegar ao destino, mas em quem nos tornamos durante o caminho e em quantas vidas conseguimos tocar enquanto caminhamos.

Por fim, deixo registrada a minha mais profunda gratidão àqueles que estiveram comigo nos dias bons e, principalmente, nos dias difíceis. Algumas vitórias são medidas por títulos, diplomas e conquistas; outras, muito maiores, são medidas pela força que encontramos para continuar. Esta tese é, para mim, ciência escrita em páginas, mas também a história de uma caminhada de superação. Chego até aqui com a certeza de que não caminhei sozinha e é por isso que, hoje, mais do que orgulho, sinto gratidão.

Alem disso, gostaria de agradecer a CAPES, pois o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A todos que fizeram parte desta história, minha eterna e sincera gratidão.

RESUMO

A valorização de subprodutos agroindustriais constitui uma estratégia importante para o aproveitamento de biomassa, a redução da geração de resíduos e o desenvolvimento de produtos de maior valor agregado. Entretanto, antes de sua utilização em diferentes rotas de valorização, esses materiais necessitam de condições adequadas de estabilização, armazenamento e processamento. Nesse contexto, o conhecimento do comportamento higroscópico e das propriedades de sorção de água é fundamental para o planejamento de operações de secagem e armazenamento. Esta tese teve como objetivo estudar o comportamento higroscópico de subprodutos agroindustriais, com ênfase no bagaço de cana-de-açúcar e nos bagaços de uva das cultivares Bordô e Merlot, visando gerar informações para sua estabilização e posterior valorização. O Capítulo 1 apresenta uma revisão sobre subprodutos agroindustriais, com destaque para os bagaços de cana-de-açúcar e de uva, abordando sua geração, composição, potencial de aproveitamento e os fundamentos relacionados à atividade de água, umidade de equilíbrio e isotermas de sorção, bem como os principais modelos matemáticos utilizados para sua descrição. No Capítulo 2, foram determinadas as isotermas de adsorção e dessorção de água do bagaço de cana-de-açúcar em temperaturas representativas das condições de armazenamento e secagem. O material apresentou composição predominantemente lignocelulósica, com 44,54 ± 1,23% de celulose, 23,21 ± 1,24% de hemicelulose e 24,60 ± 0,68% de lignina, além de 4,12 ± 0,00% de extrativos, 2,00 ± 0,17% de cinzas e 0,81 ± 0,02% de proteínas, em base seca. As isotermas apresentaram comportamento sigmoidal do Tipo II, com aumento do teor de umidade de equilíbrio com a atividade de água e redução com o aumento da temperatura. Entre os modelos avaliados, o GAB apresentou desempenho satisfatório e foi selecionado para representar o comportamento de sorção. O calor isostérico líquido de sorção aumentou com a redução do teor de umidade, variando de 5.156,14 a 18.935,76 J mol^{-1} na adsorção e de 6.445,17 a 23.669,69 J mol^{-1} na dessorção,

indicando maior intensidade das interações entre água e matriz sólida em baixos teores de umidade. No Capítulo 3, o comportamento de sorção dos bagaços de uva Bordô e Merlot foi comparado em condições de armazenamento e secagem. Ambos os materiais apresentaram composição lignocelulósica, com diferenças na composição química associadas a diferentes comportamentos higroscópicos. O BGP apresentou 13,723 ± 0,191% de celulose, 18,461% de hemiceluloses, 40,640% de lignina e 4,459 ± 0,125% de extrativos, enquanto o MGP apresentou 14,062 ± 0,156%, 16,039%, 39,567% e 5,337 ± 0,024%, respectivamente. O MGP apresentou maiores teores de compostos fenólicos totais (68,86 ± 0,74 mg GAE 100 g^{-1}) e antocianinas monoméricas totais (5,10 ± 0,10 mg M3G 100 g^{-1}), além de maior capacidade antioxidante, enquanto o BGP apresentou maior higroscopicidade. As isotermas também apresentaram perfil sigmoidal do Tipo II, e o modelo GAB proporcionou ajuste satisfatório aos dados experimentais, com R^2 ajustado superior a 0,9921 e RMSE igual ou inferior a 0,0084. O bagaço Merlot apresentou maiores valores de calor isostérico líquido de sorção, atingindo 14.762,74 J mol^{-1} na adsorção e 18.935,76 J mol^{-1} na dessorção. Em conjunto, os resultados demonstram que as isotermas de sorção e sua modelagem constituem ferramentas importantes para compreender a interação entre água e subprodutos agroindustriais e para estabelecer condições adequadas de secagem e armazenamento. As informações obtidas contribuem para a estabilização dos materiais e podem subsidiar o dimensionamento de operações e sua posterior utilização em diferentes estratégias de valorização, com potencial para reduzir perdas e ampliar o aproveitamento tecnológico de resíduos agroindustriais.

Palavras–chave: atividade de água; isotermas de sorção; umidade de equilíbrio; secagem; armazenamento.

ABSTRACT

The valorization of agro-industrial by-products constitutes an important strategy for biomass utilization, reducing waste generation, and developing higher value-added products. However, prior to their use in different valorization routes, these materials require appropriate conditions for stabilization, storage, and processing. In this context, understanding hygroscopic behavior and water sorption properties is essential for planning drying and storage operations. This thesis aimed to study the hygroscopic behavior of agro-industrial by-products, with emphasis on sugarcane bagasse and grape pomaces from the Bordô and Merlot cultivars, with the purpose of generating information for their stabilization and subsequent valorization. Chapter 1 presents a review of agro-industrial by-products, with emphasis on sugarcane and grape pomaces, addressing their generation, composition, utilization potential, and the fundamentals related to water activity, equilibrium moisture content, and sorption isotherms, as well as the main mathematical models used for their description. In Chapter 2, water adsorption and desorption isotherms of sugarcane bagasse were determined at temperatures representative of storage and drying conditions. The material presented a predominantly lignocellulosic composition, with 44.54 ± 1.23% cellulose, 23.21 ± 1.24% hemicellulose, and 24.60 ± 0.68% lignin, in addition to 4.12 ± 0.00% extractives, 2.00 ± 0.17% ash, and 0.81 ± 0.02% protein, on a dry basis. The isotherms exhibited a sigmoidal Type II behavior, with an increase in equilibrium moisture content with increasing water activity and a decrease with increasing temperature. Among the models evaluated, the GAB model showed satisfactory performance and was selected to represent the sorption behavior. The net isosteric heat of sorption increased with decreasing moisture content, ranging from 5,156.14 to 18,935.76 J mol^{-1} for adsorption and from 6,445.17 to 23,669.69 J mol^{-1} for desorption, indicating greater intensity of interactions between water and the solid matrix at low moisture contents. In Chapter 3, the sorption behavior of Bordô and Merlot grape pomaces was compared under storage and drying conditions. Both materials exhibited a lignocellulosic composition,

with differences in chemical composition associated with distinct hygroscopic behaviors. BGP presented 13.723 ± 0.191% cellulose, 18.461% hemicellulose, 40.640% lignin, and 4.459 ± 0.125% extractives, whereas MGP presented 14.062 ± 0.156%, 16.039%, 39.567%, and 5.337 ± 0.024%, respectively. MGP presented higher contents of total phenolic compounds (68.86 ± 0.74 mg GAE 100 g^{-1}) and total monomeric anthocyanins (5.10 ± 0.10 mg M3G 100 g^{-1}), as well as greater antioxidant capacity, whereas BGP exhibited greater hygroscopicity. The isotherms also exhibited a sigmoidal Type II profile, and the GAB model provided a satisfactory fit to the experimental data, with an adjusted R^2 greater than 0.9921 and an RMSE equal to or lower than 0.0084. Merlot grape pomace presented higher net isosteric heat of sorption values, reaching 14,762.74 J mol^{-1} for adsorption and 18,935.76 J mol^{-1} for desorption. Overall, the results demonstrate that sorption isotherms and their modeling constitute important tools for understanding the interaction between water and agro-industrial by-products and for establishing appropriate drying and storage conditions. The information obtained contributes to the stabilization of these materials and may support the design of processing operations and their subsequent use in different valorization strategies, with the potential to reduce losses and expand the technological utilization of agro-industrial residues.

Keywords: water activity; sorption isotherms; equilibrium moisture content; drying; storage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Representação esquemática do estabelecimento do equilíbrio higroscópico entre o alimento e o ambiente, evidenciando a migração de moléculas de água até a 27

Figura 1.2. Representação da estabilidade de alimentos em função da atividade de água, indicando as principais regiões de ocorrência de reações químicas, bioquímicas e 25

Figura 1.3. Classificação geral das isotermas de sorção baseadas na teoria de adsorção de van der Waals, conforme proposta por Brunauer et al. (1940), evidenciando os diferentes perfis de adsorção em função da atividade de água. 29

Figura 2.1. Isotermas de adsorção nas temperaturas de armazenamento (20, 30 e 40 °C) e isotermas de dessorção em temperaturas de secagem (50, 60, 70 e 80 °C). 52

Figura 2.2. Resíduos do modelo GAB em função da atividade de água para as isotermas de (a) adsorção e (b) dessorção de água do bagaço de cana-de-açúcar em diferentes 56

Figura 2.3. Calor isostérico líquido de sorção (qst) do bagaço de cana-de-açúcar em função do teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) para os processos de adsorção e dessorção de 59

Figura 3.1. Isotermas de adsorção de água do bagaço de uva nas temperaturas de armazenamento: Bordô (BGP) e Merlot (MGP) com modelo GAB ajustado. 83

Figura 3.2. Isotermas de dessorção de água para o bagaço de uva nas temperaturas de secagem: Bordô (BGP) e Merlot (MGP), com o modelo GAB ajustado. 83

Figura 3.3. Distribuições dos gráficos de resíduos para a equação GAB em todas as temperaturas. 86

Figura 3.4. Calor isostérico líquido de sorção (q_{st}) dos bagaços de uva bordo e merlot em função do teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) para os processos de adsorção (a) e 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Composição química de materiais lignocelulósicos e valores obtidos no presente estudo. 19

Tabela 2.1. Modelos matemáticos utilizados para o ajuste dos dados experimentais das isotermas de adsorção de água do bagaço de cana-de-açúcar (BC). 48

Tabela 2.2. Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados às isotermas de sorção de água do bagaço de cana-de- 55

Tabela 3.1. Composição química dos bagaços de uva bordo e merlot (em g/100 g de matéria seca). 78

Tabela 3.2. Compostos bioativos e capacidade antioxidante. 80

SUMÁRIO

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
1.1 Subprodutos agroindustriais 17
1.2 Bagaço de cana-de-açúcar 18
1.3 Bagaço de uva 21
1.4 Água e atividade de água 23
1.5 Umidade de equilíbrio e comportamento higroscópico 26
1.6 Isotermas de sorção 28
1.7 Efeito da temperatura sobre as isotermas de sorção 30
1.8 Modelagem matemática das isotermas de sorção 31
1.8.1 Modelo GAB 31
1.8.2 Modelo de Peleg 32
1.8.3 Modelo de Halsey 32
1.8.4 Modelo de Henderson 33
1.8.5 Modelo de Oswin 33
1.9 Calor isostérico líquido de sorção 34
1.10 Relação entre propriedades de sorção, secagem e armazenamento 35
1.11 Lacuna científica e justificativa do estudo 36
1.12 REFERÊNCIAS 38
2. PROPRIEDADES DE SORÇÃO DE ÁGUA DO BAGAÇO-DE-CANA-DE-AÇÚCAR: um estudo voltado para sua estabilização antes de sua valorização 41
2.1 INTRODUÇÃO 42
2.2 MATERIAL E MÉTODOS 44
2.2.1 Preparação da matéria-prima e das amostras 44
2.2.2 Composição química do BC 45
2.2.3 Determinação das isotermas de sorção 46
2.2.4 Calor de sorção 48
2.2.5 Análise estatística 49
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 50
2.3.1 Composição química 50
2.3.2 Isotermas de sorção 51
2.3.3 Modelagem matemática das isotermas 54

2.3.4 Calor de sorção 58
2.4 CONCLUSÃO 61
2.5 REFERÊNCIAS 62
3. ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO DOS BAGAÇOS DE UVA BORDÔ E MERLOT 68
3.1 INTRODUÇÃO 71
3.2 MATERIAL E MÉTODOS 72
3.2.1 Preparação da matéria-prima e das amostras 72
3.2.2 Composição química dos bagaços de uva 73
3.2.3 Compostos bioativos 74
3.2.3.1 Extração de compostos bioativos 74
3.2.3.2 Teor de fenólicos totais (TPC) 74
3.2.3.3 Antocianinas monoméricas totais (TMA) 75
3.2.3.4 Capacidade antioxidante (ABTS, DPPH e FRAP) 75
3.2.4 Isotermas de sorção de água 75
3.2.5 Calor isostérico líquido de sorção 76
3.3 Análise estatística 77
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 78
3.4.1 Composição química 78
3.4.2 Compostos bioativos 80
3.4.3 Isotermas de sorção de água 82
3.4.4 Modelagem das isotermas de sorção 85
3.4.5 Calor isostérico líquido de sorção 87
3.5 CONCLUSÃO 91
3.6 REFERÊNCIAS 92
4. CONCLUSÃO GERAL 104

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Subprodutos agroindustriais

Os subprodutos agroindustriais são materiais gerados ao longo do processamento de matérias-primas agrícolas e agroalimentares que, embora não constituam o produto principal, ainda apresentam componentes de interesse tecnológico e potencial para diferentes estratégias de aproveitamento. Esses materiais podem ser originados de operações como moagem, prensagem, extração, fermentação e processamento de frutas, cereais, oleaginosas e culturas destinadas à produção de biocombustíveis. Sua composição pode incluir carboidratos estruturais, proteínas, lipídios, minerais e compostos fenólicos, dependendo da matéria-prima e das condições empregadas durante o processamento (Galanakis, 2022; Bordiga et al., 2019).

Durante muito tempo, diversos subprodutos agroindustriais foram destinados principalmente à alimentação animal, fertilização do solo ou geração de energia, enquanto uma parcela era descartada sem aproveitamento adequado. Atualmente, esses materiais têm recebido maior atenção devido à possibilidade de utilização como fontes de biomassa e de compostos de interesse, inserindo-se em estratégias de economia circular e de desenvolvimento de processos capazes de aumentar o aproveitamento das matérias-primas e reduzir a geração de resíduos (Galanakis, 2022; Matsueda; Antunes, 2024).

A composição química dos subprodutos é diretamente influenciada pela matéria-prima, pelas condições de cultivo, pelo estágio de maturação e, especialmente, pelas operações empregadas durante o processamento. Por essa razão, resíduos provenientes de diferentes matérias-primas ou de diferentes rotas industriais podem apresentar propriedades físico-químicas distintas, o que interfere em sua estabilidade e nas possibilidades de valorização. A caracterização dessas propriedades é, portanto, importante para estabelecer condições adequadas de processamento, armazenamento e utilização posterior (Antonić et al., 2020; Alokika et al., 2021).

Entre as propriedades relevantes para o aproveitamento de materiais agroindustriais está o comportamento frente à água. A umidade pode afetar a estabilidade física e química, a ocorrência de reações de deterioração, o crescimento microbiano, a eficiência da secagem e a conservação durante o armazenamento. Dessa forma, compreender a interação entre esses materiais e a água constitui uma etapa importante para o desenvolvimento de processos de estabilização e para sua posterior utilização em rotas de maior valor agregado (Al-Muhtaseb et al., 2002; Galanakis, 2022).

1.2. Bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar é o principal resíduo fibroso obtido após a extração do caldo da cana durante a produção de açúcar, etanol e outros derivados da indústria sucroenergética. A elevada quantidade de cana processada em escala mundial resulta na geração de grandes volumes desse material, tornando-o uma das principais fontes de biomassa lignocelulósica disponíveis para aproveitamento industrial (Konde et al., 2021; Alokika et al., 2021).

A produção de bagaço está diretamente relacionada à quantidade de cana processada e às características do sistema empregado para a extração do caldo. Após a retirada da fração líquida, permanece uma matriz fibrosa constituída principalmente por celulose, hemiceluloses e lignina, além de menores quantidades de extrativos, minerais e outros componentes. Essa composição faz do bagaço uma matéria-prima potencial para diferentes rotas de valorização, incluindo processos de obtenção de biocombustíveis, produtos químicos, materiais lignocelulósicos e outros produtos de valor agregado (Alokika et al., 2021; Antunes et al., 2022).

Tradicionalmente, grande parte do bagaço produzido nas usinas é empregada como combustível para geração de vapor e eletricidade. Embora essa utilização contribua para o aproveitamento energético do resíduo, estratégias de biorrefinaria têm buscado utilizar de maneira mais completa os diferentes constituintes da biomassa, possibilitando a

recuperação de frações celulósicas, hemicelulósicas e lignínicas para aplicações distintas. Nesse contexto, o bagaço pode ser considerado uma matéria-prima para processos integrados de valorização, nos quais diferentes componentes são direcionados a produtos específicos (Konde et al., 2021; Matsueda; Antunes, 2024).

A composição lignocelulósica do bagaço varia de acordo com a cultivar, condições de cultivo, maturação e características do processamento industrial. Revisões da literatura indicam valores aproximados de 32–45% de celulose, 20–32% de hemiceluloses e 17–32% de lignina, embora variações consideráveis sejam observadas entre diferentes materiais. Essas diferenças são relevantes porque a proporção e a organização dos componentes estruturais influenciam propriedades como porosidade, acessibilidade dos grupos funcionais e interação com a água (Alokika et al., 2021).

Tabela 1.1. Composição química de materiais lignocelulósicos e valores obtidos no presente estudo.

Material / fonte	Celulose (g/100 g MS)	Hemicelulose (g/100 g MS)	Lignina (g/100 g MS)	Extrativos; proteínas; cinzas
Bagaço de cana – literatura (Alokika et al., 2021; Konde et al., 2021)	32–45	20–32	17–32	—
BC – presente estudo	44,54 ± 1,23	23,21 ± 1,24	24,60 ± 0,68	Extrativos: 4,12 ± 0,00; Proteínas: 0,81 ± 0,02; Cinzas: 2,00 ± 0,17
BGP – presente estudo (Facchini et al., 2024; Oliveira et al., 2025)	13,723 ± 0,191	18,461*	40,640*	Extrativos: 4,459 ± 0,125; Proteínas: 13,331 ± 0,415; Cinzas: 8,788 ±

MGP – presente estudo (Facchini et al., 2024; Oliveira et al., 2025)	14,062 ± 0,156	16,039*	39,567*	Extrativos: 5,337 ± 0,024; Proteínas: 15,121 ± 0,034; Cinzas: 9,804 ±

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

*Hemicelulose = xilana + arabinana; lignina = insolúvel + solúvel. Valores em base seca.

A celulose constitui uma das principais frações do bagaço e apresenta estrutura formada por unidades de glicose conectadas por ligações β-(1→4). As cadeias lineares podem formar regiões cristalinas e amorfas estabilizadas por extensas redes de ligações de hidrogênio. A presença de grupos hidroxila ao longo das cadeias contribui para a capacidade da celulose de interagir com moléculas de água, característica particularmente relevante para materiais lignocelulósicos submetidos a processos de secagem e armazenamento (Alokika et al., 2021; Konde et al., 2021).

As hemiceluloses correspondem a uma fração heterogênea de polissacarídeos, incluindo principalmente xilanas, além de arabinanas e outros açúcares. Diferentemente da celulose, apresentam menor grau de polimerização e estrutura menos ordenada, o que pode favorecer a acessibilidade de grupos hidroxila e outros grupos polares. Essas características contribuem para a interação da matriz lignocelulósica com a água e podem influenciar seu comportamento higroscópico (Alokika et al., 2021).

A lignina, por sua vez, apresenta estrutura tridimensional complexa e natureza predominantemente aromática, atuando como componente estrutural associado às fibras de celulose e hemiceluloses. Sua composição e distribuição influenciam a porosidade, a resistência da matriz e a acessibilidade das demais frações. Dessa maneira, a relação entre celulose, hemiceluloses e lignina deve ser considerada na interpretação das propriedades de sorção de água do bagaço de cana-de-açúcar (Konde et al., 2021; Antunes et al., 2022).

Além das três principais frações estruturais, o bagaço contém quantidades menores de extrativos, cinzas e outros constituintes. Os extrativos podem incluir compostos solúveis em água ou solventes orgânicos, enquanto as cinzas representam principalmente a fração mineral. Embora presentes em menores proporções, esses componentes podem modificar as propriedades superficiais e a interação do material com a água, contribuindo para as diferenças observadas entre diferentes amostras de bagaço (Alokika et al., 2021; Antunes et al., 2022).

A elevada disponibilidade e a composição química do bagaço justificam seu interesse para processos de valorização. Entretanto, antes da utilização em diferentes rotas tecnológicas, é necessário considerar sua estabilidade e suas propriedades relacionadas à umidade. A presença de grupos hidrofílicos e a estrutura porosa da biomassa fazem com que o bagaço interaja continuamente com o vapor de água do ambiente, podendo absorver ou liberar umidade de acordo com as condições de temperatura e umidade relativa (Konde et al., 2021; Al-Muhtaseb et al., 2002).

Nesse sentido, a caracterização higroscópica do bagaço de cana-de-açúcar é importante para compreender seu comportamento durante operações de secagem e armazenamento. O conhecimento da relação entre atividade de água e umidade de equilíbrio permite estabelecer condições nas quais o material apresenta maior estabilidade e auxilia na definição de parâmetros para processos de remoção de água e conservação (Al-Muhtaseb et al., 2002; Polachini et al., 2016).

1.3. Bagaço de uva

O bagaço de uva é o principal subproduto sólido gerado durante a elaboração de vinhos e sucos, sendo constituído principalmente por cascas, sementes e, dependendo do processo, pequenas quantidades de engaços e outros tecidos vegetais. A quantidade e a composição desse material dependem da variedade da uva, das condições de cultivo, do grau de maturação e das operações empregadas durante a vinificação ou processamento do fruto (Antonić et al., 2020; Bordiga et al., 2019).

A composição do bagaço de uva apresenta elevada variabilidade entre diferentes estudos. Fibras, compostos fenólicos, minerais, proteínas e lipídios estão entre os principais componentes relatados, sendo que as proporções relativas dependem tanto da variedade quanto do processo de produção do vinho. Essa variabilidade é importante para a valorização do material, pois determina suas características físico-químicas e influencia a escolha das estratégias de processamento mais adequadas (Antonić et al., 2020; Spinei; Oroian, 2021).

Entre os componentes de maior interesse estão os compostos fenólicos, incluindo antocianinas, flavonoides, ácidos fenólicos e taninos. Esses compostos contribuem para o potencial antioxidante do bagaço e justificam seu aproveitamento como fonte de ingredientes e extratos de interesse. Entretanto, a recuperação desses compostos depende da variedade, do processo de vinificação e das condições utilizadas para sua extração (Bordiga et al., 2019; Antonić et al., 2020).

As fibras constituem outra fração relevante do bagaço de uva. A presença de celulose, hemiceluloses e lignina confere ao material características estruturais que podem favorecer seu uso como fonte de fibra ou como matéria-prima para diferentes processos de valorização. A composição estrutural, entretanto, pode variar significativamente entre diferentes bagaços, reforçando a necessidade de caracterização individual do material antes de sua utilização (Spinei; Oroian, 2021; Antonić et al., 2020).

A variedade da uva constitui um dos fatores capazes de modificar a composição do bagaço. A Bordô, pertencente à espécie *Vitis labrusca*, é amplamente empregada no Brasil para produção de sucos e vinhos, enquanto a Merlot pertence à espécie *Vitis vinifera* e é tradicionalmente associada à produção de vinhos finos. As diferenças genéticas entre essas variedades, associadas às condições de cultivo e processamento, podem resultar em diferenças na composição dos respectivos bagaços (Tecchio et al., 2007; Antonić et al., 2020).

A literatura demonstra que a composição do bagaço de uva também é afetada pelo processo de vinificação. Processos envolvendo

diferentes tempos de contato com as partes sólidas da uva, fermentação e operações de prensagem podem alterar a quantidade de compostos extraídos para o vinho e, consequentemente, a composição residual do bagaço. Assim, mesmo materiais provenientes da mesma cultivar podem apresentar propriedades distintas quando obtidos sob diferentes condições de processamento (Antonić et al., 2020; Bordiga et al., 2019).

A elevada umidade presente no bagaço recém-gerado constitui uma das principais limitações para sua conservação. A presença de água favorece alterações químicas e microbiológicas e dificulta o armazenamento prolongado do material. Por esse motivo, a secagem é frequentemente considerada uma etapa necessária para sua estabilização antes de processos de extração, moagem, armazenamento ou incorporação em outros produtos (Antonić et al., 2020; Bordiga et al., 2019).

A definição das condições de secagem, entretanto, não depende apenas da quantidade de água inicialmente presente. A forma como a água está associada à matriz e sua disponibilidade em diferentes condições ambientais também devem ser consideradas. Nesse contexto, o conhecimento das propriedades de sorção do bagaço de uva fornece informações importantes para estabelecer condições de secagem e armazenamento compatíveis com a estabilidade do material (Al-Muhtaseb et al., 2002; Antonić et al., 2020).

1.4. Água e atividade de água

A água exerce papel fundamental na estabilidade de materiais alimentícios e agroindustriais, participando de fenômenos físicos, químicos e biológicos. Entretanto, a quantidade total de água presente em um material não é suficiente para explicar seu comportamento, uma vez que moléculas de água podem apresentar diferentes graus de associação com os componentes da matriz. Por esse motivo, a atividade de água é utilizada como parâmetro para representar a disponibilidade da água no sistema (Al-Muhtaseb et al., 2002).

A atividade de água é definida pela razão entre a pressão parcial de vapor da água em equilíbrio com o material e a pressão de vapor da água pura na mesma temperatura. Assim, pode ser expressa como:

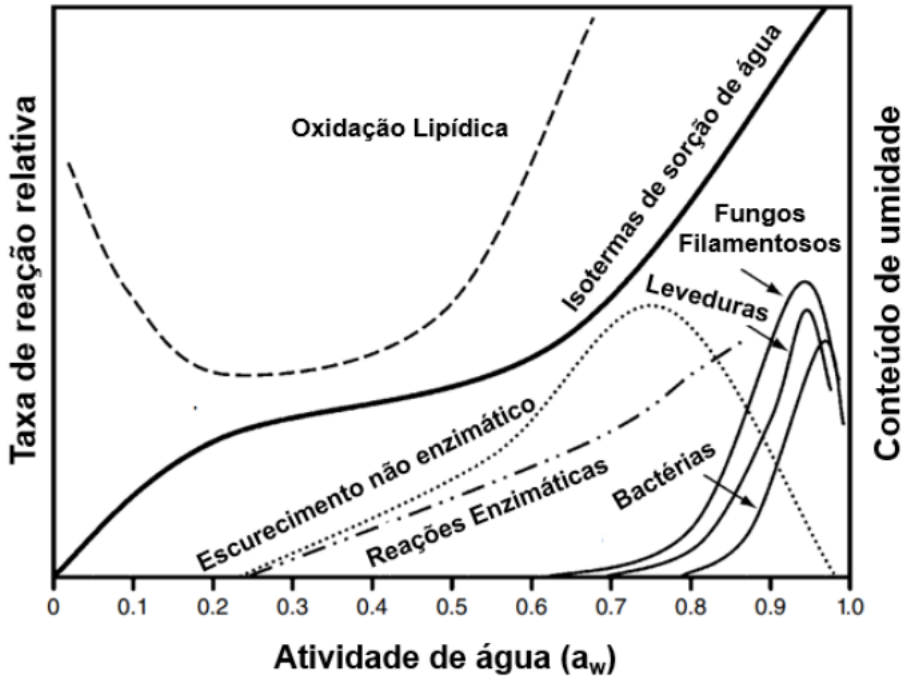
$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

em que a_w representa a atividade de água, P corresponde à pressão parcial de vapor da água em equilíbrio com o material e P_0 corresponde à pressão de vapor da água pura na mesma temperatura (Barbosa-Cánovas et al., 2007).

A atividade de água constitui um parâmetro importante para avaliação da estabilidade de alimentos e materiais agroindustriais, uma vez que diferentes reações químicas, enzimáticas e processos microbiológicos apresentam comportamentos distintos em função da disponibilidade de água. De modo geral, a redução da a_w limita a mobilidade molecular e pode reduzir a ocorrência de diversos processos de deterioração, embora o efeito dependa do tipo de reação e da composição da matriz (Al-Muhtaseb et al., 2002; Labuza; Altunakar, 2007).

A relação entre atividade de água e estabilidade é ilustrada na Figura 1.2. Observa-se que diferentes fenômenos apresentam regiões características de maior ou menor intensidade em função da a_w, enquanto o teor de umidade do material apresenta comportamento crescente com o aumento da disponibilidade de água. Essa relação evidencia que o controle da umidade não deve ser considerado de forma isolada, sendo necessário compreender também a disponibilidade da água na matriz (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Figura 1.2. Representação da estabilidade de alimentos em função da atividade de água, indicando as principais regiões de ocorrência de reações químicas, bioquímicas e crescimento microbiano.



Fonte: Adaptado de Labuza (1980).

Em condições de equilíbrio higroscópico, a atividade de água está diretamente relacionada à umidade relativa do ambiente. Essa relação pode ser expressa conforme apresentado na Equação 2.

$$a_w = \frac{URE}{100} \qquad 2$$

Em um sistema fechado e em equilíbrio, a atividade de água do material corresponde à umidade relativa do ar expressa em base decimal. Essa relação permite utilizar a atividade de água como parâmetro para caracterizar a disponibilidade de água e avaliar a tendência de um material em absorver ou perder umidade para o ambiente (Al-Muhtaseb et al., 2002; Labuza; Altunakar, 2007).

A água presente em uma matriz pode interagir com diferentes componentes por meio de ligações de hidrogênio, interações eletrostáticas e outras forças intermoleculares. Em materiais ricos em polissacarídeos, por exemplo, grupos hidroxila podem atuar como sítios de interação com moléculas de água. A intensidade dessas interações

não é uniforme em toda a matriz, resultando em diferentes níveis de energia associados à retenção da água (Barbosa-Cánovas et al., 2007; Al-Muhtaseb et al., 2002).

A disponibilidade de água influencia diretamente a estabilidade dos materiais. Em alimentos e produtos agroindustriais, alterações da atividade de água podem modificar a velocidade de reações químicas, a mobilidade molecular e a possibilidade de desenvolvimento de microrganismos. Dessa forma, o controle da atividade de água constitui uma estratégia importante para aumentar a estabilidade durante o armazenamento (Labuza; Altunakar, 2007; Al-Muhtaseb et al., 2002).

Para materiais secos, a redução da atividade de água geralmente diminui a disponibilidade de água para reações e crescimento microbiano. Entretanto, níveis muito baixos de atividade de água não significam necessariamente ausência de alterações, pois algumas reações podem apresentar comportamento não linear em função desse parâmetro. Assim, a avaliação da atividade de água deve ser associada à composição e às características específicas de cada matriz (Al-Muhtaseb et al., 2002).

1.5. Umidade de equilíbrio e comportamento higroscópico

O teor de umidade de equilíbrio corresponde à quantidade de água retida pelo material quando este atinge equilíbrio com uma determinada condição de temperatura e umidade relativa do ambiente. Nesse estado, não existe fluxo líquido de água entre o material e a atmosfera, embora as moléculas continuem apresentando movimento e ocorram trocas microscópicas entre as duas fases (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Figura 1.1. Representação esquemática das trocas de água entre o alimento e o ambiente até o estabelecimento do equilíbrio higroscópico, caracterizado pela ausência de fluxo líquido de água entre as fases.



Fonte: Adaptado de BECKER; SALLANS (1956).

Quando um material é colocado em um ambiente cuja umidade relativa é inferior à condição correspondente ao seu estado inicial, ocorre transferência de água do material para o ambiente. Esse processo caracteriza a dessorção. Em situação inversa, quando o ambiente apresenta maior disponibilidade de vapor de água, o material tende a absorver água, caracterizando a adsorção. Ambos os fenômenos prosseguem até que seja atingido o equilíbrio higroscópico (Labuza; Altunakar, 2007).

O comportamento higroscópico é particularmente importante para materiais agroindustriais destinados à secagem e ao armazenamento. Durante essas operações, mudanças na umidade relativa e na temperatura podem provocar ganho ou perda de água, alterando a massa, a estabilidade física e química e as condições necessárias para a conservação do material (Al-Muhtaseb et al., 2002).

A determinação do teor de umidade de equilíbrio permite relacionar quantitativamente a quantidade de água retida pelo material às condições ambientais. Essa relação constitui a base para a construção das isotermas de sorção, que representam uma das principais ferramentas para caracterização higroscópica de alimentos e materiais de origem agroindustrial (Al-Muhtaseb et al., 2002).

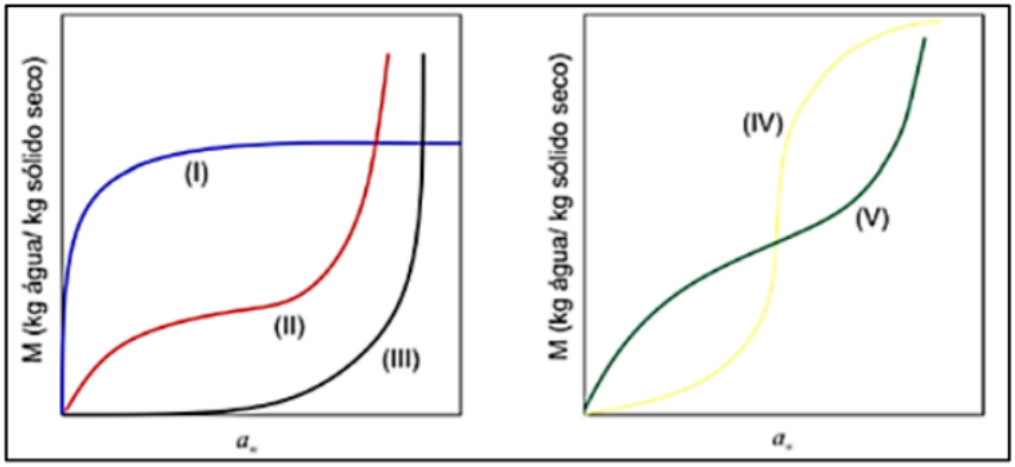
1.6. Isotermas de sorção

As isotermas de sorção representam a relação entre o teor de umidade de equilíbrio de um material e sua atividade de água, mantendo-se constante a temperatura. Essas curvas permitem avaliar como a água é incorporada ou removida da matriz em diferentes condições ambientais e fornecem informações relevantes para operações de secagem, armazenamento, embalagem e estabilização de produtos (Al-Muhtaseb et al., 2002).

As isotermas podem ser determinadas por processos de adsorção ou dessorção. Na adsorção, uma amostra inicialmente seca é exposta a ambientes com diferentes atividades de água e absorve vapor até atingir o equilíbrio. Na dessorção, uma amostra inicialmente úmida perde água progressivamente quando submetida a condições de menor atividade de água. A distinção entre esses processos é importante porque a trajetória de interação com a água pode influenciar a quantidade de água retida pela matriz (Labuza; Altunakar, 2007).

De maneira geral, as isotermas de materiais alimentícios e lignocelulósicos apresentam comportamento não linear. A forma da curva está relacionada à heterogeneidade dos sítios de sorção, à composição química, à estrutura física e às diferentes formas de associação da água com a matriz. Por essa razão, diferentes regiões da isoterma podem representar mecanismos de interação distintos entre água e material (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Figura 1.3. Classificação geral das isotermas de sorção baseadas na teoria de adsorção de van der Waals, conforme proposta por Brunauer et al. (1940), evidenciando os diferentes perfis de adsorção em função da atividade de água.



Fonte: Adaptado de BRUNAUER et al. (1940).

A classificação proposta por Brunauer, Emmett e Teller, posteriormente ampliada para diferentes tipos de isotermas, constitui uma das abordagens mais utilizadas para interpretar o comportamento de sorção. Materiais alimentícios e agroindustriais frequentemente apresentam isotermas dos tipos II ou III, dependendo de sua composição e das interações predominantes entre água e matriz (Brunauer et al., 1938; Al-Muhtaseb et al., 2002).

A isoterma do tipo II apresenta comportamento sigmoidal e está associada a materiais nos quais ocorre inicialmente interação com sítios de maior energia, seguida pela formação de camadas adicionais de água à medida que a atividade de água aumenta. Em atividades de água mais elevadas, a condensação em regiões capilares e a maior disponibilidade de água podem provocar aumento mais acentuado do teor de umidade (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Esse comportamento é particularmente relevante para materiais lignocelulósicos, nos quais a presença de celulose, hemiceluloses e lignina resulta em uma matriz heterogênea, contendo diferentes sítios de

interação e estruturas com diferentes graus de acessibilidade. Estudos recentes sobre subprodutos agroindustriais mostram predominância de isotermas dos tipos II e III, com o comportamento dependendo da composição e da estrutura da matriz (Chamache et al., 2026).

1.7. Efeito da temperatura sobre as isotermas de sorção

A temperatura é uma das principais variáveis que influenciam o comportamento higroscópico. Para uma mesma atividade de água, o aumento da temperatura geralmente resulta em redução do teor de umidade de equilíbrio. Esse comportamento está associado às alterações na energia cinética das moléculas e na intensidade das interações entre água e componentes da matriz (Al-Muhtaseb et al., 2002).

O aumento da temperatura pode favorecer a mobilidade das moléculas de água e reduzir a estabilidade de determinadas interações água-matriz. Como consequência, uma menor quantidade de água pode permanecer associada ao sólido em uma determinada atividade de água. Esse efeito deve ser considerado tanto na definição das condições de secagem quanto na previsão da estabilidade durante armazenamento em diferentes temperaturas (Labuza; Altunakar, 2007).

A influência da temperatura também pode ser observada nos parâmetros dos modelos matemáticos empregados para representar as isotermas. Um dos parâmetros de maior interesse é a umidade da monocamada, que geralmente diminui com o aumento da temperatura. Revisão recente sobre subprodutos agroindustriais em pó confirmou essa tendência para diferentes matrizes, juntamente com a predominância de isotermas dos tipos II e III (Chamache et al., 2026).

Para processos de secagem, o conhecimento desse comportamento permite compreender a quantidade de água que permanece associada ao material em diferentes temperaturas. Para armazenamento, por outro lado, possibilita estimar alterações no teor de umidade de equilíbrio quando o produto é submetido a diferentes condições ambientais. Assim, a avaliação da temperatura em conjunto

com a atividade de água é essencial para o planejamento de processos de estabilização (Al-Muhtaseb et al., 2002).

1.8. Modelagem matemática das isotermas de sorção

A utilização de modelos matemáticos permite representar quantitativamente as relações entre atividade de água e teor de umidade de equilíbrio. Esses modelos são empregados para comparar diferentes materiais, estimar parâmetros associados à interação com a água e auxiliar no projeto de operações de secagem e armazenamento (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Nenhum modelo apresenta comportamento universal para todas as matrizes e faixas de atividade de água. A adequação de uma equação depende da composição, estrutura, temperatura e intervalo experimental considerado. Por essa razão, é comum comparar diferentes modelos e selecionar aquele que apresenta melhor desempenho estatístico e, quando aplicável, maior significado físico para o sistema estudado (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Os modelos podem ser classificados em teóricos, semiempíricos e empíricos. Entre os modelos teóricos ou com fundamentação física destacam-se BET e GAB, enquanto modelos como Halsey, Henderson, Oswin e Peleg são frequentemente empregados para representar empiricamente ou semiempiricamente o comportamento das isotermas de alimentos e materiais agroindustriais (Barbosa-Cánovas et al., 2007; Al-Muhtaseb et al., 2002).

1.8.1. Modelo GAB

O modelo de Guggenheim–Anderson–de Boer (GAB) é amplamente utilizado para representar isotermas de sorção de alimentos e produtos agroindustriais. Sua principal vantagem está na possibilidade de associar os parâmetros matemáticos a características físicas do processo de sorção, permitindo interpretar a umidade da monocamada e propriedades relacionadas à interação da água com a matriz (Lomauro et al., 1985; Quirijns et al., 2005).

No modelo GAB, o parâmetro Xm representa o teor de umidade correspondente à monocamada, enquanto CC está relacionado à diferença de energia entre as moléculas de água da primeira camada e as moléculas de água em um estado semelhante ao líquido. O parâmetro KK está associado às propriedades das moléculas de água nas camadas superiores. Dessa forma, o modelo apresenta maior capacidade interpretativa que equações puramente empíricas (Quirijns et al., 2005).

A umidade da monocamada é particularmente importante para materiais submetidos à secagem. Nessa região, as moléculas de água encontram-se associadas a sítios de maior afinidade da matriz, apresentando menor mobilidade. Por isso, o parâmetro Xm é frequentemente utilizado como referência para avaliar condições de estabilidade de materiais desidratados (Lomauro et al., 1985; Al-Muhtaseb et al., 2002).

1.8.2. Modelo de Peleg

O modelo de Peleg é uma equação semiempírica desenvolvida para representar isotermas de sorção em diferentes faixas de atividade de água. Sua utilização é frequente porque apresenta flexibilidade para ajustar curvas de sorção de diferentes matrizes e pode proporcionar bom desempenho estatístico mesmo quando o comportamento da isoterma é fortemente não linear (Peleg, 1993).

Embora apresente elevada capacidade de ajuste, os parâmetros do modelo de Peleg possuem interpretação física mais limitada quando comparados aos parâmetros do modelo GAB. Dessa forma, o modelo pode ser utilizado para avaliar a qualidade do ajuste das curvas, enquanto o GAB apresenta vantagens adicionais quando se pretende interpretar a interação da água com a matriz (Peleg, 1993; Quirijns et al., 2005).

1.8.3. Modelo de Halsey

O modelo de Halsey foi desenvolvido para representar processos de adsorção em superfícies não uniformes e posteriormente passou a ser empregado na descrição de isotermas de sorção de alimentos e outros

materiais. Sua formulação está relacionada à condensação de moléculas de água em superfícies com diferentes energias de interação (Halsey, 1948).

A utilização do modelo de Halsey em materiais agroindustriais permite avaliar sua capacidade de representar regiões nas quais a interação entre a água e a superfície do sólido apresenta comportamento heterogêneo. Apesar de apresentar menor interpretação direta que o GAB, o modelo pode apresentar bom desempenho estatístico em diferentes matrizes (Al-Muhtaseb et al., 2002).

1.8.4. Modelo de Henderson

O modelo de Henderson é uma equação empírica tradicionalmente utilizada para representar relações entre teor de umidade de equilíbrio, atividade de água e temperatura. Sua aplicação é comum em materiais agrícolas e alimentícios, particularmente para estimativas relacionadas à secagem e armazenamento (Chirife; Iglesias, 1978).

A principal característica desse modelo é sua estrutura relativamente simples, que permite representar o comportamento de sorção sem exigir grande número de parâmetros. Entretanto, como ocorre com outras equações empíricas, a qualidade do ajuste pode depender significativamente da matriz e da faixa de atividade de água considerada (Chirife; Iglesias, 1978).

1.8.5. Modelo de Oswin

O modelo de Oswin é uma equação empírica amplamente utilizada para descrever isotermas de sorção de produtos alimentícios e agrícolas. Sua formulação permite representar o aumento do teor de umidade com a atividade de água e pode ser aplicada a diferentes materiais higroscópicos (Oswin, 1946).

Embora seja matematicamente simples, o modelo de Oswin pode apresentar bom desempenho em determinadas faixas de atividade de

água. Sua utilização em conjunto com modelos como GAB, Halsey, Henderson e Peleg permite comparar diferentes formas de representação das isotermas e selecionar a equação mais adequada ao material estudado (Al-Muhtaseb et al., 2002).

1.9. Calor isostérico líquido de sorção

Além da descrição matemática das isotermas, a caracterização do comportamento higroscópico pode ser complementada pela determinação do calor isostérico líquido de sorção (q_{st}). Esse parâmetro representa a energia adicional associada à sorção da água em relação ao calor latente de vaporização da água pura e fornece informações sobre a intensidade das interações entre a água e a matriz sólida (Al-Muhtaseb et al., 2002).

O q_{st} pode ser estimado a partir da dependência da atividade de água com a temperatura em um determinado teor de umidade, geralmente utilizando a relação derivada da equação de Clausius–
Clapeyron. Dessa maneira, a determinação desse parâmetro depende da análise conjunta das isotermas obtidas em diferentes temperaturas, permitindo avaliar as mudanças na energia de sorção ao longo da faixa de umidade estudada (Sormoli; Langrish, 2015).

Em geral, o calor isostérico líquido apresenta valores mais elevados em baixos teores de umidade. Esse comportamento indica que, quando a quantidade de água presente na matriz é pequena, as moléculas disponíveis tendem a ocupar inicialmente sítios de maior energia, nos quais as interações entre água e sólido são mais intensas. À medida que o teor de umidade aumenta, esses sítios são progressivamente ocupados e novas moléculas passam a interagir com a matriz por mecanismos de menor energia (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Consequentemente, a diminuição do q_{st} com o aumento do teor de umidade é frequentemente observada em materiais alimentícios e agroindustriais. Em regiões de baixa umidade, a remoção de água exige maior quantidade de energia devido à maior intensidade das interações com os sítios ativos. Em maiores teores de umidade, a água adicional

tende a apresentar comportamento progressivamente mais próximo ao da água livre (Sormoli; Langrish, 2015).

A magnitude do calor isostérico também depende da composição e da estrutura do material. Matrizes contendo diferentes proporções de proteínas, polissacarídeos, fibras e outros componentes apresentam diferentes densidades e distribuições de sítios de sorção. Por isso, o qst constitui uma informação complementar à isoterma, permitindo interpretar energeticamente as interações responsáveis pela retenção da água (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Estudos recentes de revisão envolvendo subprodutos agroindustriais demonstram que o comportamento do q_{st} é fortemente dependente da composição da matriz e do teor de umidade, sendo frequentemente observados maiores valores em baixos conteúdos de água. A mesma revisão evidencia a importância desse parâmetro para a otimização de processos de desidratação e para o desenvolvimento de estratégias de valorização de subprodutos (Chamache et al., 2026).

1.10. Relação entre propriedades de sorção, secagem e armazenamento

A caracterização das isotermas de sorção fornece informações fundamentais para o estabelecimento de condições de secagem. A relação entre atividade de água, temperatura e umidade de equilíbrio permite estimar a quantidade de água que permanece associada ao material em diferentes condições e, consequentemente, auxilia na definição de condições adequadas para a estabilização de produtos agroindustriais (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Durante a secagem, a remoção de água ocorre inicialmente de forma relativamente mais fácil quando a água apresenta menor energia de interação com a matriz. À medida que o teor de umidade diminui, permanece uma fração de água mais fortemente associada aos sítios de maior energia, aumentando a demanda energética necessária para sua remoção. O conhecimento do q_{st} permite complementar essa avaliação ao

indicar como a energia de sorção varia em função da umidade do material (Sormoli; Langrish, 2015).

Para o armazenamento, a atividade de água e o teor de umidade de equilíbrio são parâmetros importantes para prever a tendência do material de absorver ou liberar água. Um produto seco exposto a um ambiente com maior umidade relativa pode absorver vapor até atingir um novo equilíbrio, enquanto condições ambientais mais secas podem favorecer a perda de água. Essas mudanças podem alterar propriedades físicas e químicas e devem ser consideradas na definição das condições de armazenamento (Labuza; Altunakar, 2007).

A escolha da temperatura de armazenamento também deve considerar a influência desse parâmetro sobre a sorção. Como o aumento da temperatura geralmente reduz o teor de umidade de equilíbrio para uma determinada atividade de água, alterações na temperatura ambiental podem modificar o estado higroscópico do produto mesmo quando a umidade relativa permanece constante. Dessa forma, informações de sorção obtidas em diferentes temperaturas apresentam utilidade prática para o planejamento de armazenamento (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Para subprodutos como o bagaço de cana-de-açúcar e o bagaço de uva, essas informações são particularmente relevantes porque a secagem constitui uma etapa importante para reduzir a instabilidade associada à elevada umidade do material recém-gerado. Após a estabilização, o conhecimento do equilíbrio higroscópico permite definir condições de armazenamento que minimizem o ganho de umidade e preservem as características necessárias para etapas posteriores de valorização (Antonić et al., 2020; Konde et al., 2021).

1.11. Lacuna científica e justificativa do estudo

Embora o comportamento higroscópico de diferentes alimentos e materiais agroindustriais seja amplamente estudado, as propriedades de sorção não podem ser generalizadas entre diferentes matrizes. A composição química, a estrutura física, a origem da matéria-prima e as condições de processamento podem modificar significativamente a

relação entre atividade de água e umidade de equilíbrio, tornando necessária a caracterização específica de cada material (Al-Muhtaseb et al., 2002; Antonić et al., 2020).

No caso do bagaço de cana-de-açúcar, a literatura apresenta ampla quantidade de estudos voltados à composição lignocelulósica, pré-tratamentos e produção de biocombustíveis e bioprodutos, mas as propriedades relacionadas ao equilíbrio higroscópico e à energia de interação com a água constituem informações complementares importantes para o desenvolvimento de processos de estabilização e armazenamento (Alokika et al., 2021; Konde et al., 2021).

Para o bagaço de uva, a literatura concentra-se principalmente na caracterização da composição, recuperação de compostos fenólicos, propriedades antioxidantes e desenvolvimento de aplicações alimentícias. Entretanto, a composição variável entre cultivares e processos de vinificação reforça a necessidade de avaliar individualmente as propriedades de sorção de diferentes materiais, especialmente quando se pretende utilizá-los como matérias-primas após uma etapa de secagem (Bordiga et al., 2019; Antonić et al., 2020).

Diante disso, a caracterização das isotermas de adsorção e dessorção, associada à avaliação de diferentes modelos matemáticos e à determinação do calor isostérico líquido de sorção, constitui uma abordagem capaz de fornecer informações relevantes sobre a interação desses subprodutos com a água. Esses dados podem contribuir para a compreensão dos mecanismos de retenção de umidade e para o estabelecimento de condições mais adequadas de secagem, estabilização e armazenamento, favorecendo sua utilização posterior em processos de valorização (Al-Muhtaseb et al., 2002; Chamache et al., 2026).

1.12. REFERÊNCIAS

AL-MUHTASEB, A. H., MCMINN, W. A. M., & MAGEE, T. R. A. (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. ***Food and bioproducts processing***, *80*(2), 118-128.

Kumar, A., Kumar, V., & Singh, B. (2021). Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. ***International Journal of Biological Macromolecules***, *169*, 564-582.

ANTONIĆ, B., JANČÍKOVÁ, S., DORDEVIĆ, D., & TREMLOVÁ, B. (2020). Grape pomace valorization: A systematic review and meta-analysis. ***Foods***, *9*(11), 1627.

Antunes, F., Mota, I. F., da Silva Burgal, J., Pintado, M., & Costa, P. S. (2022). A review on the valorization of lignin from sugarcane by-products: From extraction to application. ***Biomass and Bioenergy***, *166*, 106603.

Barbosa-C, G. V., Fontana Jr, A. J., Schmidt, S. J., & Labuza, T. P. (Eds.). (2020). ***Water activity in foods: fundamentals and applications***. John Wiley & Sons.

Bordiga, M., Travaglia, F., & Locatelli, M. (2019). Valorisation of grape pomace: an approach that is increasingly reaching its maturity–a review. ***International Journal of Food Science and Technology***, *54*(4), 933-942.

Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. ***Journal of the American chemical society***, *60*(2), 309-319.

Chamache, M., Rojas, M. L., & Linares, G. (2026). Isosteric heat of sorption in powders produced from agro-industrial byproducts: a systematic review and meta-analysis. ***Scientia Agropecuaria***, *17*(2), 557-576.

Chirife, J., & Iglesias, H. A. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1—a review. ***International Journal of Food Science & Technology***, *13*(3), 159-174.

Galanakis, C. (2020). Food waste valorization opportunities for different food industries. In ***The interaction of food industry and environment*** (pp. 341-422). Academic press.

Halsey, G. (1948). Physical adsorption on non-uniform surfaces. ***The Journal of chemical physics***, *16*(10), 931-937.

Konde, K. S., Nagarajan, S., Kumar, V., Patil, S. V., & Ranade, V. V. (2021). Sugarcane bagasse based biorefineries in India: potential and challenges. ***Sustainable Energy & Fuels***, *5*(1), 52-78.

LABUZA, T. P., & ALTUNAKAR, B. (2020). Water activity prediction and moisture sorption isotherms. ***Water activity in foods: fundamentals and applications***, 161-205.

Lomauro, C. J., Bakshi, A. S., & Labuza, T. P. (1985). Moisture transfer properties of dry and semimoist foods. ***Journal of Food Science***, *50*(2), 397-400.

Matsueda, Y., & Antunes, E. (2024). A review of current technologies for the sustainable valorisation of sugarcane bagasse. ***Journal of Environmental Chemical Engineering***, *12*(6), 114900.

Oswin, C. R. (1946). The kinetics of package life. III. The isotherm. ***Journal of the Society of Chemical Industry***, *65*(12), 419-421.

Peleg, M. (1993). Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms 1. ***Journal of Food Process Engineering***, *16*(1), 21-37.

Polachini, T. C., Betiol, L. F. L., Lopes-Filho, J. F., & Telis-Romero, J. (2016). Water adsorption isotherms and thermodynamic properties of cassava bagasse. ***Thermochimica Acta***, *632*, 79-85.

Quirijns, E. J., Van Boxtel, A. J., Van Loon, W. K., & Van Straten, G. (2005). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. ***Journal of the Science of Food and Agriculture***, *85*(11), 1805-1814.

Nanni, A., Parisi, M., & Colonna, M. (2021). Wine by-products as raw materials for the production of biopolymers and of natural reinforcing fillers: A critical review. ***Polymers***, *13*(3), 381.

SORMOLI, M. E., & LANGRISH, T. A. (2015). Moisture sorption isotherms and net isosteric heat of sorption for spray-dried pure orange juice powder. ***LWT-Food Science and Technology***, *62*(1), 875-882.

Tecchio, F. M., Miele, A., & Rizzon, L. A. (2007). Características sensoriais do vinho Bordô. ***Pesquisa Agropecuária Brasileira***, *42*, 897-899.

2. PROPRIEDADES DE SORÇÃO DE ÁGUA DO BAGAÇO-DE-CANA-DE-AÇÚCAR: um estudo voltado para sua estabilização antes de sua valorização

2.1. INTRODUÇÃO

Observa-se, nos últimos anos, um interesse crescente no aproveitamento de subprodutos agroindustriais como fontes alternativas de matéria-prima para diferentes setores produtivos (Borges-Machado et al., 2024; Polachini et al., 2016; Ribeiro-Sanches et al., 2024). No entanto, ainda são limitados os estudos que investigam de forma sistemática como as características físicas e químicas desses materiais se relacionam com as condições de processamento necessárias para sua estabilização, o que dificulta o planejamento e o dimensionamento eficiente das operações envolvidas em seu aproveitamento.

A cana-de-açúcar destaca-se entre as principais culturas agrícolas em escala global, constituindo a base para a produção de açúcar, etanol e diversos outros produtos industriais. Durante o processamento dessa matéria-prima, a extração do caldo gera o bagaço de cana-de-açúcar (BC), que corresponde ao principal resíduo sólido da indústria sucroenergética e representa a maior parcela dos subprodutos gerados nesse setor (Matsueda & Antunes, 2024). Esse material é formado majoritariamente por componentes lignocelulósicos, principalmente celulose, hemicelulose e lignina, além da fração de água retida após as etapas de moagem. O BC é produzido em grandes quantidades, podendo atingir centenas de quilogramas por tonelada de cana processada, e sua composição pode variar em função da variedade vegetal, das condições agronômicas e do tipo de tecnologia empregada na extração do caldo (Kamboj et al., 2024; Mohomane et al., 2017).

Atualmente, o uso mais comum do BC é como fonte energética nas próprias unidades industriais, especialmente para a geração de vapor e eletricidade (Basuny et al., 2023). Em menor escala, também é empregado na fabricação de papel, na produção de materiais compósitos, em processos para obtenção de biocombustíveis avançados e na recuperação de compostos de maior valor agregado (Agarwal et al., 2022; Alokika et al., 2021). Ainda assim, as possibilidades de aproveitamento desse resíduo são amplas e incluem aplicações como ingrediente rico em fibras, matéria-prima para biopolímeros, materiais adsorventes, produção

enzimática e diversos outros bioprodutos (Alokika et al., 2021; Bueno et al., 2023). A expansão dessas alternativas está diretamente relacionada aos princípios de sustentabilidade e economia circular, promovendo maior eficiência no uso de recursos e redução da geração de resíduos.

Apesar desse potencial, a utilização eficiente de subprodutos agroindustriais depende fortemente de estratégias adequadas de manejo e estabilização (Borges-Machado et al., 2024; Sanches et al., 2023a). No caso do BC, o elevado teor de umidade inicial e seu comportamento higroscópico favorecem a atividade microbiana, aceleram a deterioração e elevam os custos associados ao transporte e armazenamento (Polachini et al., 2016). Por esse motivo, a secagem é frequentemente necessária para reduzir o volume e a massa do material, facilitando sua logística e aumentando sua vida útil. Após a remoção de umidade, o controle das condições de armazenamento torna-se igualmente importante para preservar suas propriedades físicas e químicas e garantir sua utilização posterior (Rosa et al., 2021).

O desenvolvimento e a otimização dessas etapas exigem conhecimento detalhado das interações entre água e matriz sólida, bem como da estabilidade do material em diferentes condições. Nesse contexto, as isotermas de sorção de água descrevem a relação entre a atividade de água ($_{aw}$) e o teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) em determinada temperatura, permitindo compreender a disponibilidade de água e suas interações com os constituintes do sólido (Siqueira-de-Lima et al., 2024). A intensidade com que a água se liga à matriz pode ser avaliada por meio da entalpia diferencial, enquanto a entropia diferencial fornece informações sobre a distribuição energética dos sítios de sorção (Mutavdžić Pavlović et al., 2017). Essas propriedades termodinâmicas podem ser integradas pela energia livre de Gibbs. Além disso, parâmetros como a área superficial de sorção contribuem para a compreensão do comportamento de ligação da água (Sanches et al., 2023a), enquanto a pressão de espalhamento está associada às forças que controlam a difusão em estruturas porosas (Carvalho Lago & Noreña, 2015).

Embora o bagaço de cana seja gerado em larga escala e apresente grande relevância industrial, ainda são relativamente escassas as investigações aprofundadas sobre suas características de sorção de água e seus parâmetros termodinâmicos, sobretudo considerando diferentes condições de processamento. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo determinar e comparar a composição química, as isotermas de adsorção de água em condições de armazenamento (5; 10; 20; 30 e 40°C) e as isotermas de dessorção em condições de secagem (50, 60, 70, 80 e 90 °C) e as propriedades termodinâmicas do bagaço de cana-de-açúcar obtido sob distintas condições de processamento, simulando cenários típicos de armazenamento e secagem.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Preparação de matéria-prima e amostras

O bagaço de cana-de-açúcar (BC) foi fornecido por uma unidade industrial do setor sucroenergético. Após a coleta, o material foi devidamente acondicionado e encaminhado ao Laboratório de Medições Físicas da UNESP (Campus São José do Rio Preto). Para a realização dos experimentos, foram empregados três lotes independentes de bagaço provenientes do processamento industrial.

Para os ensaios de dessorção de água, amostras de bagaço de cana-de-açúcar (BC) in natura foram congeladas e mantidas sob armazenamento até a realização dos experimentos. Quarenta e oito horas antes de cada ensaio, as amostras foram descongeladas gradualmente em incubadora tipo BOD, mantida a 4 °C, e posteriormente submetidas ao método gravimétrico estático para determinação das isotermas de dessorção de água.

Para os ensaios de adsorção, as amostras de BC foram previamente secas em estufa com circulação forçada de ar (MA035/2, Marconi, Brasil), a 50 ± 2 °C, até atingirem massa constante. Após essa

etapa, o material foi utilizado para a determinação das isotermas de adsorção de água pelo método gravimétrico estático.

2.2.2. Composição química dos BC

Como etapa inicial da caracterização, o bagaço de cana-de-açúcar (BC) foi analisado quanto à sua composição química de acordo com os protocolos da AOAC (AOAC, 2005). O teor de nitrogênio total foi determinado pelo método de Kjeldahl, sendo posteriormente convertido em conteúdo de proteína utilizando-se o fator 6,25. A fração mineral foi estimada pela determinação de cinzas, obtida após a calcinação das amostras em forno mufla a 550 °C, mantida até a completa queima da matéria orgânica e formação de resíduo inorgânico estável de coloração clara.

O teor de compostos extrativos foi determinado por extração em sistema Soxhlet, conforme o procedimento descrito no protocolo NREL/ TP-510-42619 (Sluiter, Ruiz, et al., 2008). Para essa etapa, a biomassa foi inicialmente submetida à extração com água durante 8 h, seguida de extração com etanol por 24 h no mesmo sistema. Após a remoção dos extrativos, o resíduo sólido foi submetido à hidrólise ácida com a finalidade de quantificar os carboidratos estruturais e a lignina, de acordo com o método NREL/TP-510-42618 (Sluiter et al., 2008). A lignina insolúvel (lignina de Klason) foi determinada por via gravimétrica, sendo obtida como fração sólida residual após o processo de hidrólise, conforme descrito por Gomide e Demuner (Gomide end Demuner, 1986). A fração de lignina solúvel em meio ácido foi quantificada por espectroscopia no ultravioleta (Cary 50 Probe, Varian), com leituras realizadas em 215 e 280 nm, seguindo o procedimento proposto por Goldschimid (Goldschimid, 1971).

A quantificação de celulose e hemicelulose foi realizada com base em metodologia adaptada do protocolo NREL/TP-510-42618 (Sluiter et al., 2008). Para isso, os açúcares liberados no hidrolisado previamente filtrado — obtido durante a determinação da lignina insolúvel — foram analisados

por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), utilizando um cromatógrafo Shimadzu Prominence. Foram quantificados os monossacarídeos glicose, xilose e arabinose. As análises foram conduzidas em coluna Phenomenex Rezex RPM-Monossacarídeo, com fase estacionária à base de chumbo e fase móvel composta por 85% de água e 15% de acetonitrila. A temperatura da coluna foi mantida em 80 °C, com vazão de 0,85 mL min^{-1} e tempo de corrida de 18 min. A detecção foi realizada por espalhamento de luz evaporativo (ELSD).

O cálculo do teor dos constituintes estruturais considerou o fator de diluição aplicado na etapa de determinação da lignina insolúvel. A conversão dos monossacarídeos em seus respectivos polímeros estruturais foi realizada a partir dos teores de glicose, xilose e arabinose. Para o cálculo do conteúdo de celulose foi utilizado fator de conversão de 0,9, enquanto para xilana e arabinana foi adotado fator de 0,88. O teor de hemicelulose foi obtido pela soma das frações de xilana e arabinana, por representarem os principais componentes desse polímero (Filippi et al., 2022).

2.2.3. Determinação das isotermas de sorção

O comportamento higroscópico do bagaço de cana-de-açúcar (BC) foi avaliado por meio da determinação das isotermas de adsorção e dessorção de água, utilizando o método gravimétrico estático (Al-Muhtaseb et al., 2002). As isotermas de adsorção foram determinadas em temperaturas representativas das condições de armazenamento (5; 10; 20; 30 e 40 °C), enquanto as isotermas de dessorção foram obtidas em temperaturas representativas do processo de secagem (50, 60, 70, 80 e 90 °C).

Para estabelecer diferentes níveis de umidade relativa, utilizaram-se dessecadores de vidro contendo soluções salinas saturadas, capazes de gerar atmosferas controladas em equilíbrio higroscópico (a_w × 100). As soluções empregadas foram LiBr, LiCl, $MgCl_2$, NaI, K_2CO_3, $Mg(NO_3)_2$, NaBr, KI, NaCl, $(NH_4)_2SO_4$, KCl, KNO_3 e K_2SO_4.

As temperaturas correspondentes às condições de armazenamento foram mantidas em câmara do tipo BOD (MA 830/A, Marconi, Brasil), enquanto aquelas representativas das condições de secagem foram controladas em estufa (MA035/2, Marconi, Brasil). Os valores de atividade de água ($_{aw}$) associados a cada solução salina, em função da temperatura, foram obtidos conforme os dados reportados por Labuza (1963), Greenspan, L. (1977), and Martins et al. (2023).

Porções de aproximadamente 3 g das amostras foram pesadas em triplicata e acondicionadas em recipientes apropriados. Em seguida, esses recipientes foram colocados em dessecadores contendo diferentes soluções salinas saturadas, de modo a estabelecer ambientes com umidades relativas controladas.

As amostras foram periodicamente pesadas em balança analítica (AUW220D, Shimadzu, Japão) até que não fossem observadas variações adicionais de massa, indicando o estabelecimento do equilíbrio higroscópico, o que ocorreu após cerca de três semanas. O teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) em cada condição experimental foi determinado a partir da variação entre a massa inicial e a massa final das amostras.

Para fins de modelagem e previsão, os modelos matemáticos apresentados na Tabela 2.1 foram selecionados para descrever o comportamento higroscópico do material. Além disso, essas equações são amplamente utilizadas na literatura para representar dados experimentais e interpretar os mecanismos envolvidos nos processos de sorção em materiais de origem agroalimentar (Al-Muhtaseb et al., 2002; Carvalho Lago & Noreña, 2015; do Carmo et al., 2026; Rosa et al., 2021; Siqueira-de-Lima et al., 2024).

Tabela 2.1. Modelos matemáticos utilizados para o ajuste dos dados experimentais das isotermas de adsorção de água do bagaço de cana-de-açúcar (BC).

Nome do modelo	Modelo	Referência	Equação
GAB	$Xeq = \frac{X_m \times C \times k \times aw}{(1 - k \times aw)(1 + (C-1)k \times aw)}$	(Lomauro et al., 1985)	(1)
Halsey	$Xeq = \left(-h_1 \times ln(aw)\right)^{-\frac{1}{h_2}}$	(Halsey, 1948)	(2)
Henderson	$Xeq = \left(-\frac{1}{H_1} \times ln(1 - aw)\right)^{\frac{1}{H_2}}$	(CHIRIFE & IGLESIAS, 1978)	(3)
Oswin	$Xeq = M \times \left(\frac{aw}{1 - aw}\right)^{N}$	(Oswin, 1946)	(4)
Peleg	$Xeq = k_1 \times aw^{n1} + k_2 \times aw^{n2}$	(Peleg, 1993)	(5)

C, k, k_1, n_1, k_2, n_2, M, N, h_1, h_2 H_1 e H_2 are constants of the models, X_m represents the monolayer moisture content (dry basis), X_{eq} is the equilibrium moisture content and a_w is the

Os modelos selecionados foram avaliados quanto à sua capacidade de representar o comportamento das isotermas de sorção de água do bagaço de cana-de-açúcar. O ajuste das equações aos dados experimentais foi realizado por meio de regressão não linear, utilizando o software OriginPro 8.0 (OriginLab Corporation, Northampton, MA).

2.2.4. Calor de sorção

O calor isostérico líquido de sorção é uma propriedade termodinâmica que descreve a energia de ligação entre a matriz e as moléculas de água em função do conteúdo de água. Pode ser determinado pela inclinação da equação de Clausius-Clapeyron (Eq. (6)), de acordo com , conforme realizado em estudos anteriores .

$$\frac{\partial\left(ln\,a_w\right)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)}\Big|_{Xeq} = -\frac{q_{st}}{R} \qquad 6$$

Onde q_{st} é o calor isostérico líquido de adsorção; T é a temperatura absoluta (K); R é a constante universal dos gases (8,314 $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$). A atividade da água correspondente a uma determinada umidade de equilíbrio foi obtida através do modelo escolhido para representar as isotermas de adsorção dos BSGs.

2.2.5. Análise estatística

A qualidade do ajuste foi verificada com base no coeficiente de determinação ajustado (R^2_{Adj}) e no teste do qui-quadrado (χ^2). Valores de R^2_{Adj} próximos da unidade, associados a valores reduzidos de χ^2, indicam elevada concordância entre os resultados experimentais e as previsões do modelo.

$$R^2_{Adj} = 1 - \frac{n-1}{n-\left(k+1\right)}(1-R^2) \qquad 7$$

$$\chi 2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(exp - pred\right)^2}{N-z} \qquad 8$$

Em que n representa o número total de observações, k corresponde à quantidade de parâmetros do modelo (desconsiderando o termo constante) e R^2 é o coeficiente de determinação. Os termos Exp referem-se aos valores obtidos experimentalmente, enquanto pred indicam os valores estimados pelo modelo. Além disso, N representa o número total de dados utilizados e z corresponde ao número de constantes do modelo.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Composição química

O bagaço de cana-de-açúcar (BC) apresentou composição predominantemente lignocelulósica, com 44,54 ± 1,23% de celulose, 23,21 ± 1,24% de hemicelulose e 24,60 ± 0,68% de lignina, considerando as frações insolúvel e solúvel. A celulose correspondeu à principal fração da biomassa, enquanto a hemicelulose foi composta por 7,99 ± 0,30% de xilana e 15,22 ± 1,24% de arabinana. A lignina apresentou 16,58 ± 0,28% de fração insolúvel e 8,02 ± 0,40% de fração solúvel. Em conjunto, esses constituintes representaram aproximadamente 92% da matéria seca do BC, confirmando seu caráter essencialmente lignocelulósico.

O elevado conteúdo de celulose observado é particularmente relevante, uma vez que esse polímero constitui uma importante fonte de glicose e pode ser direcionado para diferentes processos de valorização, incluindo hidrólise para produção de açúcares fermentescíveis, bioetanol e outros produtos de interesse biotecnológico. Da mesma forma, a presença expressiva de hemicelulose, especialmente de arabinana e xilana, amplia as possibilidades de aproveitamento da biomassa para obtenção de açúcares e outros compostos de maior valor agregado.

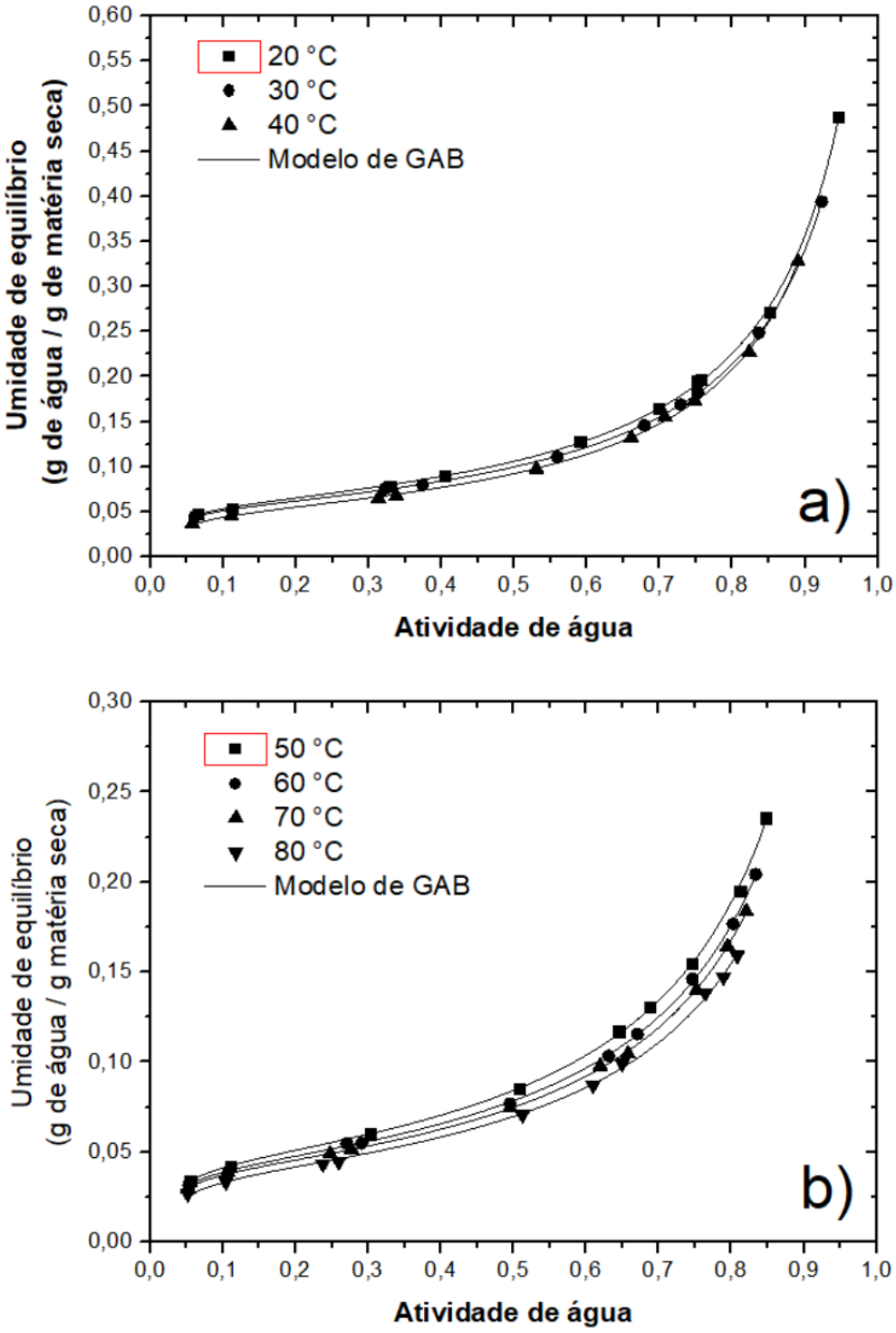
A concentração de lignina também foi significativa, atingindo 24,60%. Esse componente forma, juntamente com a celulose e a hemicelulose, uma estrutura complexa que confere resistência e recalcitrância à parede celular vegetal, dificultando o acesso aos carboidratos estruturais e, consequentemente, sua conversão em produtos de interesse (Wagner et al., 2021), sendo necessária etapas de pré-tratamento. Por outro lado, a lignina pode ser considerada uma fração de interesse em estratégias de valorização integral da biomassa, podendo ser empregada na obtenção de antioxidantes e outros produtos de maior valor agregado (Mussatto et al., 2007). Assim, a elevada proporção das frações lignocelulósicas observada neste estudo reforça o potencial do BC como matéria-prima para processos de biorrefinaria.

As demais frações apresentaram menor contribuição para a composição do BC, correspondendo a 4,12 ± 0,00% de extrativos, 2,00 ± 0,17% de cinzas e 0,81 ± 0,02% de proteínas. A baixa concentração de proteínas está de acordo com a natureza predominantemente lignocelulósica do BC, diferentemente de subprodutos agroindustriais com maior potencial para recuperação proteica como o bagaço de malte (Sanches et al., 2023a).

2.3.2. Isotermas de sorção

A Figura 2.1 apresenta as isotermas de sorção de água do bagaço de bagaço de cana (BC), mostrando a variação no teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) em função da atividade de água (a_w) em diferentes temperaturas. As curvas de sorção de água do BC apresentaram forte dependência da temperatura (Figura 2.1). As isotermas de adsorção, observadas entre 5 e 40 °C (Figura 2.1-a), e as isotermas de dessorção, entre 50 e 90 °C (Figura 2.1-b), apresentaram diferenças no X_{eq} em função da a_w. Essa abordagem permitiu caracterizar o comportamento do BC em uma ampla faixa de condições de temperatura e umidade relativa.

Figura 2.1. Isotermas de adsorção nas temperaturas de armazenamento (20, 30 e 40 °C) e isotermas de dessorção em temperaturas de secagem (50, 60, 70 e 80 °C).



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Independentemente do processo de sorção, observou-se uma tendência de aumento do X_{eq} com a elevação da a_w, enquanto o aumento da temperatura promoveu a redução do teor de água retido para uma mesma a_w. Em ambientes com maior a_w, a disponibilidade de moléculas de água é maior, favorecendo sua interação com os sítios ativos presentes na matriz lignocelulósica. Entre esses sítios, destacam-se os grupos hidroxila presentes principalmente na celulose e na hemicelulose, que podem estabelecer ligações de hidrogênio com as moléculas de água (Sanches et al., 2023a). Em condições de baixa a_w, a sorção ocorre preferencialmente nos sítios de maior afinidade pela água. Com a elevação da a_w, novos sítios tornam-se ocupados e ocorre a formação sucessiva de camadas de moléculas de água, aumentando o X_{eq}. No processo de dessorção, a remoção gradual da água provoca o rompimento das interações mais fracas entre a água e a matriz sólida.

A influência da temperatura está associada às alterações na energia das moléculas de água e na intensidade das interações estabelecidas com a superfície do sólido. O aumento da temperatura pode favorecer a mobilidade das moléculas e reduzir sua afinidade pelos sítios de sorção, fazendo com que uma menor quantidade de água seja retida pelo BC em uma mesma a_w (Al-Muhtaseb et al., 2002). Esse comportamento evidencia a importância da temperatura na definição das condições de armazenamento e secagem da biomassa.

As curvas obtidas apresentaram comportamento sigmoidal, característico das isotermas de Tipo II, conforme a classificação proposta por Brunauer et al. (1940). Esse perfil é frequentemente observado em alimentos e materiais lignocelulósicos e também foi descrito para outros subprodutos agroindustriais, como o bagaço de mandioca (Polachini et al., 2016) e o bagaço de malte (Sanches et al., 2023a). Em contraste, materiais com composição e características superficiais distintas podem apresentar outros padrões de sorção; por exemplo, isotermas do Tipo III foram relatadas para o bagaço de yacon (Carvalho Lago & Noreña, 2015).

O formato Tipo II está relacionado à ocorrência de diferentes mecanismos de interação entre água e matriz sólida ao longo da faixa de

$_{aw}$ avaliada. Em valores mais baixos de $_{aw}$, predomina a ocupação dos sítios de maior afinidade, associada à formação da primeira camada de moléculas de água. Em uma região intermediária, ocorre a deposição de camadas adicionais sobre a água previamente adsorvida, caracterizando a sorção em multicamadas. Já em valores elevados de $_{aw}$, a quantidade de água aumenta de forma mais acentuada, podendo ocorrer fenômenos associados à condensação capilar em regiões porosas da matriz (Mathlouthi, 2001).

2.3.3. Modelagem matemática das isotermas

Entre os modelos avaliados (GAB, Peleg, Halsey, Henderson e Oswin), GAB e Peleg apresentaram os melhores desempenhos estatísticos, com menores valores de RMSE e maiores coeficientes de determinação ajustados (R^2Adj) nas diferentes temperaturas (Tabela 2). Apesar da capacidade semelhante de ambos os modelos em representar os dados experimentais, o modelo GAB foi selecionado para descrever as isotermas de adsorção e dessorção de água do bagaço de cana-de-açúcar devido ao significado físico de seus parâmetros, permitindo uma interpretação das interações entre a água e a matriz sólida (Al-Muhtaseb et al., 2002).

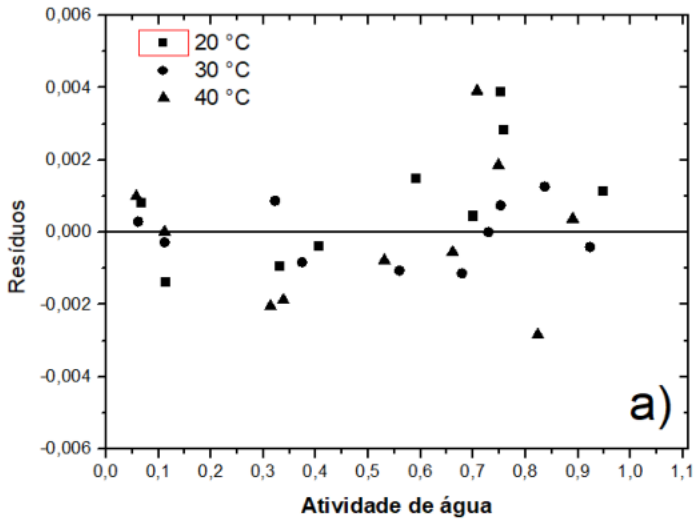
Tabela 2.2. Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados às isotermas de sorção de água do bagaço de cana-de-açúcar.

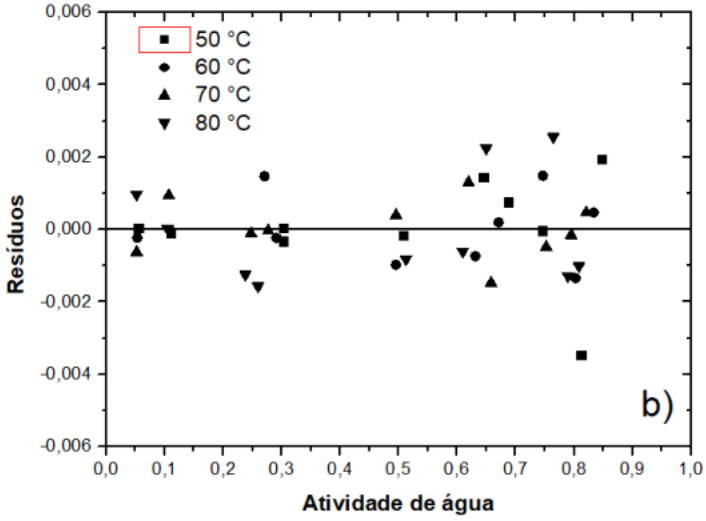
Modelo	Unidades	Adsorção			Dessorção			
		20 °C	**30 °C**	**40 °C**	**50 °C**	**60 °C**	**70 °C**	**80 °C**
GAB	Xm	0,0579	0,0542	0,0498	0,0451	0,0420	0,0400	0,0379
	C	49,2753	57,5533	37,0831	44,7904	48,0214	49,5194	35,7371
	K	0,9314	0,9350	0,9531	0,9528	0,9535	0,9535	0,9468
	R^2Adj	0,9993	0,9999	0,9993	0,9994	0,9996	0,9997	0,9988
	RMSE	0,0043	0,0016	0,0022	0,0016	0,0010	0,0009	0,0017
Peleg	k_1	0,5188	0,1228	0,1123	0,3449	0,0863	0,2824	0,2232
	n_1	7,8903	0,3888	0,4202	5,4355	0,3494	5,0301	3,9815
	k_2	0,1532	0,4620	0,4430	0,0967	0,3073	0,0826	0,0666
	n_2	0,4947	6,5931	6,1838	0,3769	5,1208	0,3515	0,3072
	R^2Adj	0,9938	0,9977	0,9957	0,9970	0,9990	0,9984	0,9995
	RMSE	0,0103	0,0051	0,0059	0,0036	0,0018	0,0021	0,0010
Halsey	h_1	60,5193	54,8646	42,5073	50,2060	56,5086	62,1145	68,3375
	h_2	1,7099	1,6037	1,4298	1,4470	1,4561	1,4675	1,4579
	R^2Adj	0,9980	0,9986	0,9994	0,9986	0,9980	0,9979	0,9989
	RMSE	0,0058	0,0039	0,0022	0,0025	0,0026	0,0024	0,0016
Henderson	h_1	5,8410	6,6215	7,0170	9,5704	11,8237	15,1206	18,3329
	h_2	0,9113	0,9607	0,9714	0,9714	1,1939	1,2714	1,3438
	R^2Adj	0,9598	0,9473	0,9494	0,9451	0,9343	0,9442	0,9570
	RMSE	0,0264	0,0245	0,0206	0,0158	0,0142	0,0128	0,0102
Oswin	m	0,1114	0,1038	0,0955	0,0901	0,0849	0,0816	0,0754
	n	0,5128	0,5311	0,5753	0,5319	0,5169	0,5029	0,5007
	R^2Adj	0,9948	0,9888	0,9873	0,9822	0,9797	0,9797	0,9857
	RMSE	0,0094	0,0112	0,0103	0,0090	0,0084	0,0077	0,0059

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A análise dos resíduos (Figura 2.2) indicou maior dispersão dos desvios nas regiões de elevada atividade de água. Esse comportamento sugere que o modelo GAB apresentou maior dificuldade em representar pequenas variações dos dados experimentais em valores elevados de $_{aw}$, região em que a sorção em multicamadas e as interações entre as moléculas de água tornam o sistema mais complexo (Vasile et al., 2020). Ainda assim, o modelo GAB é amplamente utilizado para representar isotermas de sorção de alimentos e subprodutos agroindustriais, principalmente devido à sua capacidade de fornecer parâmetros com significado físico (Kaderides & Goula, 2017).

Figura 2.2. Resíduos do modelo GAB em função da atividade de água para as isotermas de (a) adsorção e (b) dessorção de água do bagaço de cana-de-açúcar em diferentes temperaturas.





Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os parâmetros Xm, C e K do modelo GAB fornecem informações complementares sobre a interação da água com a matriz sólida. O parâmetro Xm representa o teor de umidade correspondente à monocamada, enquanto C está relacionado à intensidade da interação da água com os sítios de sorção mais energéticos. Já o parâmetro K está associado às propriedades da água presente nas camadas superiores à monocamada (Quirijns et al., 2005).

Durante a adsorção, realizada entre 20 e 40 °C, os valores de Xm variaram de 0,04983 a 0,05798 g de água·g^{-1} de matéria seca. Observou-se uma redução progressiva desse parâmetro com o aumento da temperatura, indicando menor quantidade de água fortemente associada aos sítios de sorção da matriz em temperaturas mais elevadas. Esse comportamento é consistente com a redução do teor de umidade de equilíbrio observada nas isotermas e pode estar relacionado ao aumento da energia cinética das moléculas de água, que favorece a ruptura de algumas interações água-sólido (Muzaffar & Kumar, 2016).

Para a dessorção, conduzida entre 50 e 80 °C, os valores de Xm foram menores e variaram de 0,03790 a 0,04519 g de água·g^{-1} de matéria seca. Assim como observado na adsorção, houve uma redução de Xm com o aumento da temperatura, reforçando a influência da temperatura sobre a quantidade de água associada aos sítios de maior energia da matriz.

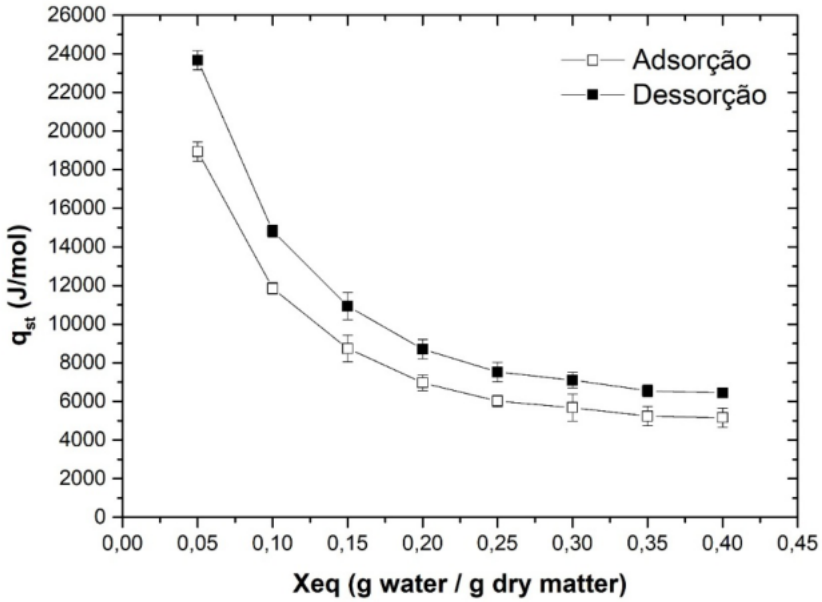
A constante C apresentou comportamento menos sistemático. Na adsorção, seus valores variaram entre 37,08 e 57,55, sendo o maior valor observado a 30 °C e o menor a 40 °C. Na dessorção, C variou de 35,74 a 49,52, sem apresentar uma tendência definida com o aumento da temperatura. Portanto, diferentemente de Xm, os resultados de C não permitem estabelecer uma relação monotônica entre temperatura e intensidade das interações da água com os sítios da matriz. Essa variação pode estar associada à heterogeneidade estrutural do bagaço de cana-de-açúcar e à presença de diferentes constituintes lignocelulósicos, que apresentam diferentes afinidades pela água.

O parâmetro K apresentou menor variação entre as temperaturas avaliadas. Para a adsorção, os valores permaneceram entre 0,93146 e 0,95315, enquanto para a dessorção variaram de 0,94689 a 0,95354. Os valores próximos da unidade indicam que a água presente nas multicamadas apresenta propriedades relativamente próximas às da água no estado líquido, sendo menos fortemente influenciada pela matriz sólida (Pérez-Alonso et al., 2006). A pequena variação de K entre as temperaturas também sugere que esse parâmetro foi menos sensível às alterações de temperatura do que Xm. Esses resultados reforçam a importância da temperatura e da atividade de água na definição das condições de armazenamento e secagem do bagaço de cana-de-açúcar e contribuem para compreender a disponibilidade e a força de ligação da água nesse material.

2.3.4. Calor de sorção

O calor isostérico líquido de sorção (q_{st}) é um parâmetro termodinâmico utilizado para caracterizar a intensidade das interações entre a água e a matriz sólida, além de representar a energia associada ao processo de sorção em determinado teor de umidade de equilíbrio (Polachini et al., 2016). Conforme apresentado na Figura 2.3, o calor isostérico líquido de adsorção variou de 5.156,14 a 18.935,76 J mol^{-1}, enquanto os valores obtidos para a dessorção ficaram entre 6.445,17 e 23.669,69 J mol^{-1}, considerando a faixa de teor de umidade de equilíbrio de 0,05 a 0,40 g de água·g^{-1} de matéria seca.

Figura 2.3. Calor isostérico líquido de sorção (qst) do bagaço de cana-de-açúcar em função do teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) para os processos de adsorção e dessorção de água.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O calor isostérico líquido de sorção de materiais lignocelulósicos pode apresentar ampla variação em função da composição química e estrutural da biomassa, bem como da faixa de umidade considerada. Para o bagaço de malte, (Sanches et al., 2023a) relataram valores de qst entre 140,88 e 14.412,31 J mol^{-1}, considerando uma faixa de umidade de equilíbrio de 0,05 a 0,45 g de água·g^{-1} de matéria seca. As diferenças entre os materiais podem estar relacionadas à quantidade e à natureza dos grupos funcionais disponíveis para interação com a água, especialmente aqueles presentes nos componentes lignocelulósicos.

Para ambos os processos, observou-se um aumento do qst à medida que o teor de umidade de equilíbrio diminuiu. Esse comportamento indica que, em baixos teores de umidade, as moléculas de água estão predominantemente associadas aos sítios de maior energia da matriz, exigindo maior quantidade de energia para que ocorram interações adicionais ou sua remoção. Esses sítios estão relacionados principalmente aos grupos funcionais hidrofílicos presentes

na celulose e na hemicelulose, capazes de estabelecer ligações de hidrogênio com as moléculas de água (Pérez-Alonso et al., 2006).

Com o aumento do teor de umidade, os sítios de maior energia são progressivamente ocupados e a água passa a interagir com regiões de menor energia da matriz e com moléculas de água previamente sorvidas. Dessa forma, as interações tornam-se progressivamente menos intensas, resultando na redução do qst. Esse comportamento indica a presença de sítios de sorção energeticamente heterogêneos no bagaço de cana-de-açúcar, nos quais a água apresenta diferentes níveis de interação com a matriz.

Os valores de qst obtidos para a dessorção foram, em geral, superiores aos determinados para a adsorção. Essa diferença pode estar relacionada à própria natureza dos processos de sorção. Durante a dessorção, a remoção progressiva da água pode promover alterações na estrutura da matriz lignocelulósica, como contração dos poros e redução da acessibilidade de determinados sítios de sorção. Assim, a água que permanece no material em baixos teores de umidade tende a estar associada aos sítios de maior energia, sendo necessária maior energia para sua remoção. Na adsorção, por outro lado, a incorporação de água ocorre inicialmente nos sítios mais acessíveis e de maior afinidade, seguida pela ocupação de regiões de menor energia à medida que o teor de umidade aumenta.

2.4. CONCLUSÃO

O bagaço de cana-de-açúcar apresentou composição predominantemente lignocelulósica, com celulose, hemicelulose e lignina correspondendo às principais frações da biomassa, evidenciando seu potencial como matéria-prima para processos de valorização e biorrefinaria. A caracterização de suas propriedades de sorção demonstrou que o teor de umidade de equilíbrio aumentou com a atividade de água e diminuiu com a elevação da temperatura, tanto para adsorção quanto para dessorção. As isotermas apresentaram comportamento sigmoidal do Tipo II, indicando a ocorrência de diferentes mecanismos de interação entre a água e a matriz sólida ao longo da faixa de atividade de água avaliada.

Entre os modelos matemáticos avaliados, GAB foi selecionado por possibilitar, além de uma boa representação das isotermas, a interpretação física dos parâmetros associados à sorção. O parâmetro Xm apresentou redução com o aumento da temperatura, enquanto C apresentou variações sem uma tendência sistemática e K permaneceu próximo da unidade, indicando alterações mais pronunciadas na quantidade de água associada à monocamada do que nas propriedades da água presente nas multicamadas. Os valores de calor isostérico líquido de sorção aumentaram com a redução do teor de umidade de equilíbrio, evidenciando que a água presente em baixos níveis de umidade está associada a sítios de maior energia da matriz lignocelulósica. Em conjunto, os resultados demonstram que o conhecimento das propriedades higroscópicas e termodinâmicas do bagaço de cana-de-açúcar é fundamental para estabelecer condições adequadas de armazenamento e secagem. Essas informações podem contribuir para o dimensionamento e a otimização dessas operações, favorecendo a estabilização do BC e sua posterior utilização em diferentes rotas de valorização.

2.5. REFERÊNCIAS

Agarwal, N. K., Kumar, M., Ghosh, P., Kumar, S. S., Singh, L., Vijay, V. K., & Kumar, V. (2022). Anaerobic digestion of sugarcane bagasse for biogas production and digestate valorization. *Chemosphere*, *295*, 133893. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.133893

Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2002). Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Food Products: A Review. *Food and Bioproducts Processing*, *80*(2), 118–128. https://doi.org/10.1205/09603080252938753

Alokika, Anu, Kumar, A., Kumar, V., & Singh, B. (2021). Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. *International Journal of Biological Macromolecules*, *169*, 564–582. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2020.12.175

AOAC (1980). Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists (No. Ed. 13, pp. xx+-1018pp).

Basuny, B. N., Kospa, D. A., Ibrahim, A. A., & Gebreil, A. (2023). Stable polyethylene glycol/biochar composite as a cost-effective photothermal absorber for 24 hours of steam and electricity cogeneration. *RSC Advances*, *13*(44), 31077–31091. https://doi.org/10.1039/D3RA06028D

Borges-Machado, A. L., Ribeiro-Sanches, M. A., Martins, M. J. N., Luna-Flores, M., Luna-Solano, G., Souza, S. J. F. de, & Telis-Romero, J. (2024). Drying kinetics and water adsorption properties of jalapeño pepper seeds (Capsicum annuum L.): A study aiming at their recovery and integral exploitation. *LWT*, *204*, 116452. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2024.116452

Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E., & Teller, E. (1940). On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases. *Journal of the American Chemical Society*, *62*(7), 1723–1732. https://doi.org/10.1021/ja01864a025

Bueno, D., de Freitas, C., & Brienzo, M. (2023). Enzymatic Cocktail Formulation for Xylan Hydrolysis into Xylose and Xylooligosaccharides. *Molecules*, *28*(2), 624. https://doi.org/10.3390/MOLECULES28020624/S1

Carvalho Lago, C., & Noreña, C. P. Z. (2015). Thermodynamic analysis of sorption isotherms of dehydrated yacon (Smallanthus sonchifolius) bagasse. *Food Bioscience*, *12*, 26–33. https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2015.07.001

CHIRIFE, J., & IGLESIAS, H. A. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1 — a review. *International Journal of Food Science & Technology*, *13*(3), 159–174. https://doi.org/10.1111/j.13652621.1978.tb00792.x

do Carmo, J. R., Corrêa, J. L. G., Cruz, M. de S., Martins, M. J. N., Sanches, M. A. R., & Telis-Romero, J. (2026). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of isomaltulose-enriched mango. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *106*(1), 260–271. https://doi.org/10.1002/jsfa.70149

Filippi, K., Papapostolou, H., Alexandri, M., Vlysidis, A., Myrtsi, E. D., Ladakis, D., Pateraki, C., Haroutounian, S. A., & Koutinas, A. (2022). Integrated biorefinery development using winery waste streams for the production of bacterial cellulose, succinic acid and value-added fractions. *Bioresource Technology*, *343*, 125989. https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.125989

Halsey, G. (1948). Physical adsorption on non-uniform surfaces. *The Journal of Chemical Physics*, *16*(10), 931–937. https://doi.org/10.1063/1.1746689

Kaderides, K., & Goula, A. M. (2017). Development and characterization of a new encapsulating agent from orange juice by-products. *Food Research International*, *100*, 612–622. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2017.07.057

Kamboj, A., Sadh, P. K., Yadav, B., Kumari, A., Kumar, R., Surekha, Saharan, B. S., Brar, B., Kumar, D., Goyal, C., & Duhan, J. S. (2024). Unravelling the potential of sugarcane bagasse: An eco-friendly and inexpensive agro-industrial waste for the production of valuable products using pretreatment processes for

sustainable bio-economy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *12*(6), 114461. https://doi.org/10.1016/J.JECE.2024.114461

Lomauro, C. J., Bakshi, A. S., & Labuza, T. P. (1985). Evaluation of food moisture sorption isotherm equations part I: Fruit, vegetable and meat products. *LWT - Food Science and Technology*, *18*(2), 111–117.

Martins, M. J. N., Sanches, M. A. R., Polachini, T. C., de Oliveira, E. B., Coimbra, J. S. D. R., & Telis-Romero, J. (2023). Solubility of different salts used in the control of the water activity of foods. *Ciência e Agrotecnologia*, *47*, e018722. https://doi.org/10.1590/1413-7054202347018722

Mathlouthi, M. (2001). Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs. *Food Control*, *12*(7), 409–417. https://doi.org/10.1016/S0956-7135(01)00032-9

Matsueda, Y., & Antunes, E. (2024). A review of current technologies for the sustainable valorisation of sugarcane bagasse. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *12*(6), 114900. https://doi.org/10.1016/J.JECE.2024.114900

Mohomane, S. M., Motaung, T. E., & Revaprasadu, N. (2017). Thermal Degradation Kinetics of Sugarcane Bagasse and Soft Wood Cellulose. *Materials 2017, Vol. 10, Page 1246*, *10*(11), 1246. https://doi.org/10.3390/MA10111246

Mussatto, S. I., Dragone, G., & Roberto, I. C. (2007). Ferulic and p-coumaric acids extraction by alkaline hydrolysis of brewer's spent grain. *Industrial Crops and Products*, *25*(2), 231–237. https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2006.11.001

Mutavdžić Pavlović, D., Ćurković, L., Grčić, I., Šimić, I., & Župan, J. (2017). Isotherm, kinetic, and thermodynamic study of ciprofloxacin sorption on sediments. *Environmental Science and Pollution Research 2017 24:11*, *24*(11), 10091–10106. https://doi.org/10.1007/S11356-017-8461-3

Muzaffar, K., & Kumar, P. (2016). Moisture sorption isotherms and storage study of spray dried tamarind pulp powder. *Powder Technology*, *291*, 322–327.

https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2015.12.046

Oswin, C. R. (1946). The kinetics of package life. III. The isotherm. *Journal of the Society of Chemical Industry*, *65*(12), 419–421. https://doi.org/10.1002/jctb.5000651216

Peleg, M. (1993). Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. *Journal of Food Process Engineering*, *16*(1), 21–37. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1993.tb00160.x

Pérez-Alonso, C., Beristain, C. I., Lobato-Calleros, C., Rodríguez-Huezo, M. E., & Vernon-Carter, E. J. (2006). Thermodynamic analysis of the sorption isotherms of pure and blended carbohydrate polymers. *Journal of Food Engineering*, *77*(4), 753–760. https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2005.08.002

Polachini, T. C., Betiol, L. F. L., Lopes-Filho, J. F., & Telis-Romero, J. (2016). Water adsorption isotherms and thermodynamic properties of cassava bagasse. *Thermochimica Acta*, *632*, 79–85. https://doi.org/10.1016/J.TCA.2016.03.032

Quirijns, E. J., Van Boxtel, A. J. B., Van Loon, W. K. P., & Van Straten, G. (2005). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *85*(11), 1805–1814. https://doi.org/10.1002/JSFA.2140;CTYPE:STRING:JOURNAL

Ribeiro-Sanches, M. A., Stochi, V. A. L., Borges-Machado, A. L., Augusto, P. E. D., Polachini, T. C., & Telis-Romero, J. (2024). Valorization of brewer's spent grains (BSG) through alkaline hydrogen peroxide processing: Effect on composition, structure and rheological properties. *Food and Bioproducts Processing*, *147*, 239–250. https://doi.org/10.1016/J.FBP.2024.07.008

Rizvi, S. S. H. (2014). Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration. *Engineering Properties of Foods: Third Edition*, 239–326. https://doi.org/10.1201/9781420028805-11

Rosa, D. P., Evangelista, R. R., Borges Machado, A. L., Sanches, M. A. R., & Telis-Romero, J. (2021). Water sorption properties of papaya seeds (Carica

papaya L.) formosa variety: An assessment under storage and drying conditions. *LWT*, *138*, 110458. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.110458

Sanches, M. A. R., Augusto, P. E. D., Polachini, T. C., & Telis-Romero, J. (2023a). Water sorption properties of brewer's spent grain: A study aimed at its stabilization for further conversion into value-added products. *Biomass and Bioenergy*, *170*, 106718. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2023.106718

Sanches, M. A. R., Augusto, P. E. D., Polachini, T. C., & Telis-Romero, J. (2023b). Water sorption properties of brewer's spent grain: A study aimed at its stabilization for further conversion into value-added products. *Biomass and Bioenergy*, *170*, 106718. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2023.106718

Siqueira-de-Lima, M., Cagnin, C., Borges-Machado, A. L., Ribeiro-Sanches, M. A., Telis-Romero, J., & Resende, O. (2024). Thermodynamic approach on water vapor sorption of Curcuma longa L. flour. *LWT*, *206*, 116592. https://doi.org/ 10.1016/J.LWT.2024.116592

Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Crocker, D. (2008). *Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass Laboratory Analytical Procedure (LAP) Issue Date: 7/17/2005*. www.nrel.gov

Sluiter, A., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., & Templeton, D. (2008). *Determination of Extractives in Biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP); Issue Date 7/17/2005* . http://www.nrel.gov/biomass/ analytical_procedures.html

Vasile, F. E., Judis, M. A., & Mazzobre, M. F. (2020). Moisture sorption properties and glass transition temperature of a non-conventional exudate gum (Prosopis alba) from northeast Argentine. *Food Research International*, *131*, 109033. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2020.109033

Wagner, E., Pería, M. E., Ortiz, G. E., Rojas, N. L., & Ghiringhelli, P. D. (2021). Valorization of brewer's spent grain by different strategies of structural

destabilization and enzymatic saccharification. *Industrial Crops and Products*, *163*, 113329. https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2021.113329

3. ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO DOS BAGAÇOS DE UVA BORDÔ E MERLOT

RESUMO

O bagaço de uva é um subproduto agroindustrial com potencial para a produção de ingredientes de valor agregado. Neste estudo, as isotermas de adsorção e dessorção de água dos bagaços de uva Bordô (BGP) e Merlot (MGP) foram investigadas e correlacionadas com sua composição química. Os bagaços foram caracterizados quanto à composição química e compostos bioativos; as isotermas de adsorção foram determinadas em temperaturas de armazenamento (5–40 °C) e as de dessorção em temperaturas de secagem (50–90 °C), utilizando o método gravimétrico estático. Ambos os bagaços apresentaram altos teores de fibras lignocelulósicas — sendo a lignina insolúvel o componente predominante (~32% em base seca) — e teor moderado de proteínas (13–15% em base seca). O modelo GAB proporcionou o melhor ajuste aos dados experimentais (R_{adj}^2 > 0,9921 e RMSE ≤ 0,0084) e foi, portanto, utilizado para estimar as propriedades físicas e termodinâmicas da sorção de água. As isotermas de adsorção e dessorção exibiram um perfil sigmoidal do tipo II, com o teor de umidade de equilíbrio aumentando à medida que a atividade de água aumentava e a temperatura diminuía. Em comparação com o MGP, o BGP apresentou maior higroscopicidade, enquanto o MGP exibiu interações água-sólido mais fortes, refletidas por valores mais elevados de calor isostérico líquido de sorção. Por fim, identificou-se uma atividade de água de aproximadamente 0,38 como a condição ideal de armazenamento para o bagaço de uva.

ABSTRACT

Grape pomace is an agro-industrial by-product with the potential for the production of value-added ingredients. In this study, water adsorption and desorption isotherms for Bordô (BGP) and Merlot (MGP) grape pomace were investigated and correlated with their chemical composition. The pomace samples were characterized in terms of their chemical composition and bioactive compounds; adsorption isotherms were determined at storage temperatures (5–40 °C), and desorption isotherms at drying temperatures (50–90 °C), using the static gravimetric method. Both types of pomace showed high levels of lignocellulosic fibers—with insoluble lignin as the predominant component (~32% on a dry basis)—and a moderate protein content (13–15% on a dry basis). The GAB model provided the best fit to the experimental data (R_{adj}^2 > 0.9921 and RMSE ≤ 0.0084) and was, therefore, used to estimate the physical and thermodynamic properties of water sorption. The adsorption and desorption isotherms exhibited a type II sigmoidal profile, with the equilibrium moisture content increasing as water activity rose and temperature decreased. Compared to MGP, BGP showed higher hygroscopicity, while MGP exhibited stronger water-solid interactions, as reflected by higher values for the net isosteric heat of sorption. Finally, a water activity of approximately 0.38 was identified as the ideal storage condition for grape pomace.

3.1. INTRODUÇÃO

O crescente interesse na valorização de subprodutos agroindustriais tem impulsionado pesquisas voltadas ao seu uso como matérias-primas para a produção de ingredientes funcionais, biomateriais e outros bioprodutos de valor agregado (Borges-Machado, Ribeiro-Sanches, Martins, et al., 2024; Da et al., 2025; Pertuzatti et al., 2020a; Ribeiro-Sanches et al., 2026). No entanto, o desenvolvimento e o projeto adequado dos processos envolvidos em sua estabilização e utilização permanecem limitados pela escassez de informações sobre suas propriedades físicas, higroscópicas e termodinâmicas sob diferentes condições de processamento.

A indústria vinícola é um dos setores mais importantes da indústria agroalimentar global, gerando grandes volumes de subprodutos durante o processamento da uva (Barcia, Pertuzatti, Rodrigues, et al., 2014; Evangelista et al., 2020). Entre eles, o bagaço de uva — composto principalmente por cascas, sementes e polpa residual remanescentes após a extração do suco — representa o principal subproduto sólido gerado durante o processo de vinificação (Machado et al., 2024). Dependendo da cultivar de uva e das condições de processamento, o bagaço de uva representa aproximadamente 20% a 25% da massa total de uva processada (Pertuzatti et al., 2020a; Sirohi et al., 2020). Sua composição química varia de acordo com fatores como a cultivar da uva, as condições de cultivo e a tecnologia de processamento, caracterizando-se por elevados teores de compostos de interesse biotecnológico (Barcia, Pertuzatti, Gómez-Alonso, et al., 2014; Jansen et al., 2024).

Apesar de seu elevado potencial como fonte de compostos bioativos benéficos à saúde (da Costa et al., 2024), ingredientes funcionais, biomateriais e matéria-prima para a produção de bioenergia e bioprodutos (Sirohi et al., 2020), uma grande proporção do bagaço de uva ainda é destinada a aplicações de baixo valor ou simplesmente descartada. Esse cenário contrasta com os princípios da economia circular e da sustentabilidade ambiental, que promovem a utilização eficiente de resíduos agroindustriais. Consequentemente, diversas estratégias de valorização têm sido propostas, incluindo a extração de antioxidantes naturais, a produção de farinhas

funcionais, a recuperação de óleos de semente de uva (Vlad et al., 2025), a síntese de biopolímeros (Han & Luo, 2026) e a produção de biocombustíveis (Han et al., 2025).

No entanto, o aproveitamento industrial do bagaço de uva requer estabilização prévia, pois seu elevado teor de umidade e natureza higroscópica comprometem sua conservação e dificultam o processamento subsequente. Nesse contexto, a secagem é uma operação essencial para melhorar sua estabilidade e viabilizar seu aproveitamento tecnológico (Borges-Machado, Ribeiro-Sanches, Martins, et al., 2024). O projeto adequado de operações de secagem e armazenamento requer conhecimento das isotermas de sorção, que descrevem a relação entre a atividade de água e o teor de umidade de equilíbrio do material (Rosa et al., 2021). As isotermas de sorção também podem ser utilizadas para identificar condições adequadas de secagem e armazenamento, relacionando o teor de umidade de equilíbrio à atividade de água e determinando os níveis de umidade nos quais a disponibilidade de água é suficientemente baixa para limitar reações de degradação e o crescimento microbiano.

Embora diversos estudos tenham investigado a composição e os potenciais aplicações do bagaço de uva, as informações sobre suas propriedades de sorção de água e comportamento higroscópico permanecem limitadas, especialmente entre diferentes cultivares de uva. Até onde sabemos, este é o primeiro estudo a caracterizar e comparar as isotermas de adsorção de água e as propriedades termodinâmicas de sorção dos bagaços das uvas Bordô e Merlot. Os resultados oferecem novas perspectivas sobre as diferenças higroscópicas entre essas cultivares e geram informações essenciais para o dimensionamento adequado de processos de secagem e armazenamento, apoiando a valorização industrial sustentável do bagaço de uva.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Preparação de matéria-prima e amostras

Bagaços de uva das cultivares Bordô (*Vitis labrusca*) e Merlot (*Vitis vinifera*) foram coletados durante a safra de 2023 em uma vinícola comercial localizada em São Roque, São Paulo, Brasil (23°31′44″ S, 47°08′06″ O), imediatamente após o processo de vinificação. Aproximadamente 30 kg de cada bagaço de uva foram coletados e transportados ao laboratório para preparação, estabilização e posterior caracterização. Três lotes independentes de cada cultivar de uva foram utilizados em todas as análises experimentais.

Para os experimentos de dessorção de água, amostras de bagaço de uva fresco — com teores de umidade iniciais de 1,564 e 1,439 g de água·g^{-1} de matéria seca para bagaços de uva Bordô (BGP) e Merlot (MGP), respectivamente — foram congeladas e armazenadas até a realização dos experimentos. Quarenta e oito horas antes de cada experimento, as amostras foram descongeladas lentamente em uma incubadora tipo BOD a 4 °C e, posteriormente, submetidas ao método gravimétrico estático para a determinação das isotermas de dessorção de água. Para os experimentos de adsorção de água, as amostras de bagaço de uva foram secas em estufa de convecção de ar forçado (MA035/2, Marconi, Brasil) a 50 ± 2 °C até peso

constante, atingindo teores de umidade de 0,0945 e 0,0921 g de água·g^{-1} de matéria seca para BGP e MGP, respectivamente.

3.2.2. Composição química dos bagaços de uva

A composição química e lignocelulósica dos bagaços de uva foi determinada utilizando métodos analíticos estabelecidos. O teor de proteína foi determinado pelo método Kjeldahl, utilizando um fator de conversão de nitrogênio em proteína de 6,25 (AOAC, 2005), enquanto o teor de minerais foi estimado a partir do teor de cinzas obtido após incineração em mufla a 550 °C até a remoção completa da matéria orgânica (AOAC, 2005). Os extrativos foram determinados de acordo com o protocolo NREL/TP-510-42619 (Sluiter, Ruiz, et al., 2008). Aproximadamente 2,6 g de amostra moída (malha 42–60) foram submetidos à extração Soxhlet com água por 8 h, seguida de extração com etanol por 24 h. Após cada etapa de extração, o solvente foi removido e as frações extraídas foram secas a 105 ± 3 °C até massa constante. O teor de extrativos foi determinado gravimetricamente com base na massa das frações

solúveis em água e em etanol em relação à massa da amostra seca. Os carboidratos estruturais e a lignina foram quantificados após hidrólise ácida em duas etapas. A lignina insolúvel em ácido foi determinada gravimetricamente (Gomide e Demuner, 1986), enquanto a lignina solúvel em ácido foi quantificada por espectrofotometria UV em 215 e 280 nm (Goldschmid, 1971). Os monossacarídeos estruturais foram identificados e quantificados por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC, Shimadzu Prominence) de acordo com o protocolo NREL/TP-510-42618 (Sluiter et al., 2008). A separação cromatográfica foi realizada utilizando uma coluna Phenomenex Rezex RPM-Monosaccharide Pb^{2+} (300 × 7,8 mm, 8 µm) sob eluição isocrática, utilizando uma fase móvel de água/acetonitrila (85:15, v/v) a uma vazão de 0,85 mL min^{-1}. A temperatura da coluna foi mantida a 80 °C e o tempo total de corrida foi de 18 min. A detecção foi realizada utilizando um detector de espalhamento de luz evaporativo (ELSD). Os resultados são apresentados como média ±

desvio-padrão de cinco replicatas analíticas independentes, visando aumentar a precisão e a confiabilidade dos resultados experimentais e considerando a variabilidade inerente ao material biológico.

3.2.3. Compostos Bioativos

3.2.3.1. Extração de Compostos Bioativos

Compostos fenólicos foram extraídos de acordo com o método descrito por Pertuzatti et al. (2020), com modificações. Bagaço de uva seco (2,0 g) foi misturado com 25 mL de uma solução de metanol/água/ácido fórmico (50:48,5:1,5, v/v/v) e submetido à extração em banho de ultrassom (Q3.8/40A, Ultronique, Brasil; 3,8 L, 40 kHz) a 30 °C por 15 min. O extrato foi filtrado em papel de filtro qualitativo (Whatman nº 1, Cytiva, tamanho de poro de 11 µm, diâmetro de 125 mm), e o resíduo sólido remanescente foi submetido a uma segunda extração nas mesmas condições. Ambos os extratos foram então combinados para obter o extrato final utilizado na determinação subsequente de compostos bioativos.

3.2.3.2. Teor de Fenólicos Totais (TPC)

O teor de fenólicos totais (TPC) foi determinado utilizando o método de Folin-Ciocalteu, de acordo com Singleton et al. (1999). A absorbância foi medida a 765 nm, e os resultados foram expressos em miligramas de equivalentes de ácido gálico por 100 g de amostra seca (mg EAG 100 g^{-1} MS), utilizando uma curva de calibração de ácido gálico.

3.2.3.3. Antocianinas Monoméricas Totais (TMA)

O teor de antocianinas monoméricas totais (TMA) foi determinado pelo método de diferencial de pH, de acordo com Giusti & Wrolstad (2001). A absorbância foi medida a 520 e 700 nm, e os resultados foram expressos em miligramas de equivalentes de malvidina-3-glicosídeo por 100 g de amostra seca (mg M3G 100 g^{-1} MS).

3.2.3.4. Capacidade Antioxidante (ABTS, DPPH e FRAP)

A capacidade antioxidante dos extratos foi avaliada utilizando os ensaios ABTS, DPPH e FRAP, de acordo com Re et al. (1999), Brand-Williams et al. (1995) e Benzie & Strain (1996), respectivamente. A absorbância foi medida em 734, 517 e 593 nm para os ensaios ABTS, DPPH e FRAP, respectivamente. A capacidade antioxidante determinada pelos ensaios ABTS e DPPH foi expressa em µmol de equivalentes de Trolox por grama de amostra seca (µmol TE g^{-1} DW), enquanto os valores de FRAP foram expressos em µmol de equivalentes de Fe^{2+} por grama de amostra seca (µmol Fe^{2+} eq. g^{-1} DW).

3.2.3.5. Determinação e modelagem das isotermas de sorção de água

O comportamento higroscópico das amostras de bagaço de uva Bordô (BGP) e Merlot (MGP) foi avaliado pela determinação das isotermas de adsorção e dessorção de água, utilizando o método gravimétrico estático (Spiess e Wolf, 1983). As isotermas de adsorção foram determinadas em temperaturas representativas das condições de armazenamento (5; 10; 20; 30 e 40 °C), enquanto as isotermas de dessorção foram determinadas em temperaturas representativas do processo de secagem (50, 60, 70, 80 e 90 °C). Diferentes níveis de atividade de água ($_{aw}$) foram estabelecidos utilizando soluções salinas saturadas de LiBr, LiCl, $MgCl_2$, NaI, K_2CO_3, $Mg(NO_3)_2$, NaBr, KI, NaCl,

$(NH_4)_2SO_4$, KCl, KNO_3 e K_2SO_4. As soluções salinas saturadas foram utilizadas para obter uma faixa de umidade relativa de 5,20% a 98,48%, correspondendo a valores de atividade de água ($_{aw}$) variando de 0,052 a 0,9848 (Tabela S1 – material suplementar). As temperaturas de armazenamento (5–40 °C) foram mantidas em uma câmara de incubação tipo BOD com controle de temperatura (MA 830/A, Marconi, Brasil), enquanto as temperaturas de secagem (50–90 °C) foram mantidas em uma estufa de convecção de ar forçado (MA035/2, Marconi, Brasil). Os valores de atividade de água de equilíbrio das soluções salinas saturadas em cada temperatura foram obtidos a partir de Labuza (1963), Greenspan (1977) e Martins et al. (2023). Aproximadamente 3 g de amostra foram colocados em recipientes de pesagem e equilibrados em dessecadores hermeticamente fechados, contendo as soluções salinas saturadas, até que fosse atingido peso constante. O teor de umidade de equilíbrio (EMC) foi calculado a partir da diferença entre as massas inicial e de equilíbrio da amostra. Todos os experimentos de sorção de água foram realizados utilizando três amostras independentes para cada condição experimental (n = 3), e os resultados são expressos como média ±

desvio padrão. Cinco modelos de isoterma de sorção amplamente utilizados na literatura — GAB, Henderson, Halsey, Peleg e Oswin (Tabela 1) — foram ajustados aos dados experimentais por meio de regressão não linear, utilizando o software OriginPro 8.0 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, EUA). A qualidade do ajuste de cada modelo foi avaliada com base no coeficiente de determinação ajustado ($Radj^2$) e na raiz do erro quadrático médio (RMSE). Os modelos de sorção foram ajustados exclusivamente aos dados experimentais obtidos na faixa de atividade de água medida (0,0526–0,9848), sem a imposição de pontos de dados adicionais ou restrições em $_{aw}$ = 0 ou $_{Xeq}$ = 0.

3.2.3.6. Calor isostérico líquido de sorção

O calor isostérico líquido de sorção (qst) é um parâmetro termodinâmico que reflete a intensidade das interações água-sólido e a energia associada à sorção de água em um determinado teor de água de equilíbrio. No presente estudo, o qst foi determinado separadamente para as isotermas de adsorção obtidas nas temperaturas de armazenamento (5–40 °C) e para as isotermas de

dessorção obtidas nas temperaturas de secagem (50–90 °C). O calor isostérico líquido de sorção (qst) foi calculado utilizando a equação de Clausius-Clapeyron (Eq. (8)) a partir da dependência da atividade de água em relação à temperatura, mantendo-se constante o teor de água de equilíbrio e utilizando os valores de atividade de água previstos pelo modelo de sorção selecionado, conforme descrito em estudos anteriores (Rosa et al., 2021; Sanches et al., 2023).

$$\frac{\partial\left(ln\,a_w\right)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)}\Big|_{Xeq} = -\frac{q_{st}}{R} \qquad 10$$

Onde qst é o calor isostérico líquido de sorção (kJ·mol^{-1}), T é a temperatura absoluta (K) e R é a constante universal dos gases (8,314 J·mol^{-1} K^{-1}).

3.3. Análise estatística

Todos os experimentos foram realizados em triplicata, e os resultados são apresentados como média ± desvio-padrão (DP). Os dados foram inicialmente testados quanto à normalidade e, após a confirmação de uma distribuição normal, as diferenças entre BGP e MGP foram avaliadas utilizando o teste t de Student com nível de significância de $p < 0,05$. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Statistica 7.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, EUA).

3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1. Composição química

A Tabela 3.1 apresenta a composição química do BGP e do MGP. Ambos os bagaços de uva eram compostos predominantemente por lignina, celulose e hemiceluloses, confirmando sua natureza lignocelulósica.

Tabela 3.1. Composição química dos bagaços de uva bordo e merlot (em g/100 g de matéria seca).

Componente	BGP	BGM
Proteínas	13,331 ± 0,415 [b]	15,121 ± 0,034 [a]
Extrativos	4,459 ± 0,125 [b]	5,337 ± 0,024 [a]
Cinzas	8,788 ± 0,338 [b]	9,804 ± 0,447 [a]
Celulose	13,723 ± 0,191 [b]	14,062 ± 0,156 [a]
Hemicelulose (Xilana)	6,081 ± 0,349 [a]	5,076 ± 0,116 [b]
Hemicelulose (Arabinana)	12,380 ± 0,391 [a]	10,963 ± 0,245 [b]
Lignina insolúvel	32,650 ± 0,971 [a]	32,811 ± 0,297 [a]
Lignina solúvel	7,990 ± 0,211 [a]	6,756 ± 0,278 [b]

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Valor médio ± desvio padrão. BGP = Bagaço de uva bordo; BGM = Bagaço de uva merlot.

A lignina insolúvel foi o principal constituinte em ambas as amostras (aproximadamente 32% em base seca), sem diferença significativa entre BGP e MGP ($p > 0,05$). A celulose foi o segundo componente estrutural mais importante, com o MGP apresentando um teor significativamente maior do que o BGP ($p < 0,05$). Em contrapartida, o BGP exibiu teores significativamente mais elevados de hemiceluloses — representadas por xilana e arabinana — bem como de lignina solúvel ($p < 0,05$). Essas diferenças indicam variações na distribuição relativa de polissacarídeos estruturais e lignina entre os dois bagaços de uva, o que pode influenciar seu comportamento físico-químico e sua adequação a diferentes estratégias de valorização. Variabilidade semelhante na composição lignocelulósica do bagaço de uva tem sido relatada

entre diferentes cultivares de uva e condições de processamento (Facchini et al., 2024).

O teor de proteína variou de 13% a 15% (base seca), com o MGP apresentando um valor significativamente maior do que o BGP ($p < 0,05$). Esse teor proteico é relevante para o comportamento de sorção dos bagaços de uva, uma vez que as proteínas vegetais contêm grupos funcionais polares capazes de interagir com moléculas de água (Oliveira et al., 2025). Portanto, o maior teor de proteína do MGP pode contribuir para diferenças em suas interações água-sólido e em seu comportamento higroscópico. Sob a perspectiva de valorização, os níveis de proteína determinados no presente estudo também indicam o potencial do BGP e do MGP como fontes alternativas de proteína vegetal. Os valores obtidos são inferiores aos relatados para fontes de proteína convencionais, como ervilhas (20–25% em base seca) (Lu et al., 2020) e feijões comuns (17,7–27,9% em base seca) (Santiago-Ramos et al., 2018), mas são comparáveis aos relatados para diversos subprodutos agroindustriais, incluindo sementes de pimentão (~15% em base seca) (Borges-Machado et al., 2024), sementes de mamão (~25% em base seca) (Rosa et al., 2021) e bagaço de malte (~21% em base seca) (Ribeiro-Sanches et al., 2026).

Os teores de extrativos e cinzas também foram significativamente maiores no MGP do que no BGP ($p < 0,05$). Os extrativos representam a fração não estrutural da biomassa que é solúvel em água e etanol sob as condições de extração utilizadas, podendo incluir compostos fenólicos e outros constituintes de baixo peso molecular. Portanto, o maior teor de extrativos indica uma proporção maior de compostos solúveis ou facilmente extraíveis no MGP. O maior teor de cinzas indica uma maior contribuição de componentes minerais para a composição geral do MGP. Em conjunto, essas diferenças demonstram que, embora o BGP e o MGP compartilhem uma composição predominantemente lignocelulósica, as proporções relativas de seus componentes estruturais e não estruturais diferem consideravelmente.

A composição determinada no presente estudo destaca o potencial de ambos os bagaços de uva para diferentes estratégias de valorização, devido às suas fibras lignocelulósicas, proteínas, minerais e compostos solúveis. O alto teor de lignina pode exigir pré-tratamento para melhorar a acessibilidade da

celulose e da hemicelulose (da Silva et al., 2026; Ribeiro-Sanches et al., 2024), embora a própria lignina seja uma matéria-prima valiosa para a obtenção de compostos fenólicos e outros produtos bioativos (Atatoprak et al., 2022). Da mesma forma, materiais derivados de uva têm demonstrado vantagens tecnológicas em aplicações alimentícias, incluindo o aumento dos teores de fibras, minerais e compostos fenólicos em formulações de biscoitos (Estalla et al., 2026), evidenciando assim o potencial dessas matérias-primas.

3.4.2. Compostos Bioativos

A Tabela 3.2 apresenta o teor de compostos bioativos e a capacidade antioxidante do BGP e do MGP. Diferenças significativas foram observadas entre os bagaços de uva, com MGP exibindo maior teor de fenólicos totais (68,86 mg GAE 100 g^{-1} DW) e teor total de antocianinas monoméricas (5,10 mg M3G 100 g^{-1} DW) do que BGP (48,20 mg GAE 100 g^{-1} DW e 3,57 mg M3G 100 g^{-1} DW, respectivamente) ($P < 0,05$).

Tabela 3.2. Compostos bioativos e capacidade antioxidante.

Componente	BGP	MGP
Compostos Fenólicos Totais (mg GAE 100 g^{-1} DW)	48.20 ± 1.30 ^{b}	68.86 ± 0.74 ^{a}
Antocianinas Monoméricas Totais (mg M3G 100 g^{-1} DW)	3.57 ± 0.04 ^{b}	5.10 ± 0.10 ^{a}
ABTS (µmol TE g^{-1} DW)	325.38 ± 4.11 ^{b}	404.22 ± 14.73 ^{a}
DPPH (µmol TE g^{-1} DW)	336.42 ± 2.64 ^{b}	415.33 ± 12.32 ^{a}
FRAP (µmol Fe^{2+} eq. g^{-1} DW)	170.16 ± 3.55 ^{b}	198.66 ± 8.35 ^{a}

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

DW = Peso seco; GAE = ácido galico; BGP = Bagaço de uva bordo; MGP = Bagaço de uva merlot. Letras diferentes na mesma linha indicam diferenças significativas entre as amostras de acordo com o teste t de Student ($p < 0,05$).

Estas descobertas também são consistentes com estudos anteriores sobre subprodutos vinícolas (Pertuzatti et al., 2020a; Sirohi et al., 2020), que demonstraram que a transferência de antocianinas e outros compostos fenólicos das uvas para o vinho é limitada durante a vinificação. Consequentemente, uma proporção substancial destes compostos permanece no bagaço da uva, tornando este subproduto uma fonte atraente de compostos fenólicos naturais.

Os maiores teores de compostos fenólicos e antocianinas no MGP foram acompanhados de maior capacidade antioxidante nos ensaios ABTS, DPPH e FRAP, indicando uma estreita relação entre a concentração desses compostos bioativos e o potencial antioxidante dos extratos. Os compostos fenólicos e as antocianinas são reconhecidos pela sua capacidade de sequestrar radicais livres através da doação de átomos de hidrogênio ou transferência de elétrons, avaliada pelos ensaios ABTS e DPPH, bem como pelo seu poder redutor, refletido pela redução de Fe^{3+} a Fe^{2+} no ensaio FRAP (Barcia et al., 2014; Pertuzatti et al., 2020). Portanto, estes compostos são considerados os principais contribuintes para a atividade antioxidante dos subprodutos vitivinícolas.

A elevada concentração de compostos fenólicos no bagaço de uva não é apenas relevante do ponto de vista composicional, mas também se traduz na funcionalidade biológica. Recentemente, Costa et al. (2024) demonstraram que o bagaço de uva Syrah exibia altos níveis de compostos fenólicos e promovia reduções dependentes da dose na pressão arterial, juntamente com melhorias na função vascular em ratos espontaneamente hipertensos, reforçando o potencial de promoção da saúde dos subprodutos da vinícola.

Estas descobertas reforçam o potencial do bagaço de uva como ingrediente funcional e uma valiosa fonte de extratos naturais para aplicações industriais. Nesse contexto, Jansen et al. (2024) demonstraram que extratos ricos em antocianinas recuperados do bagaço de uva Bordo podem ser incorporados em fibras proteicas por eletrofiação, produzindo materiais com alta carga de compostos bioativos, preservando suas atividades antioxidantes e antimicrobianas. No entanto, o sucesso da utilização industrial do bagaço de uva e dos seus compostos bioativos também depende da compreensão das

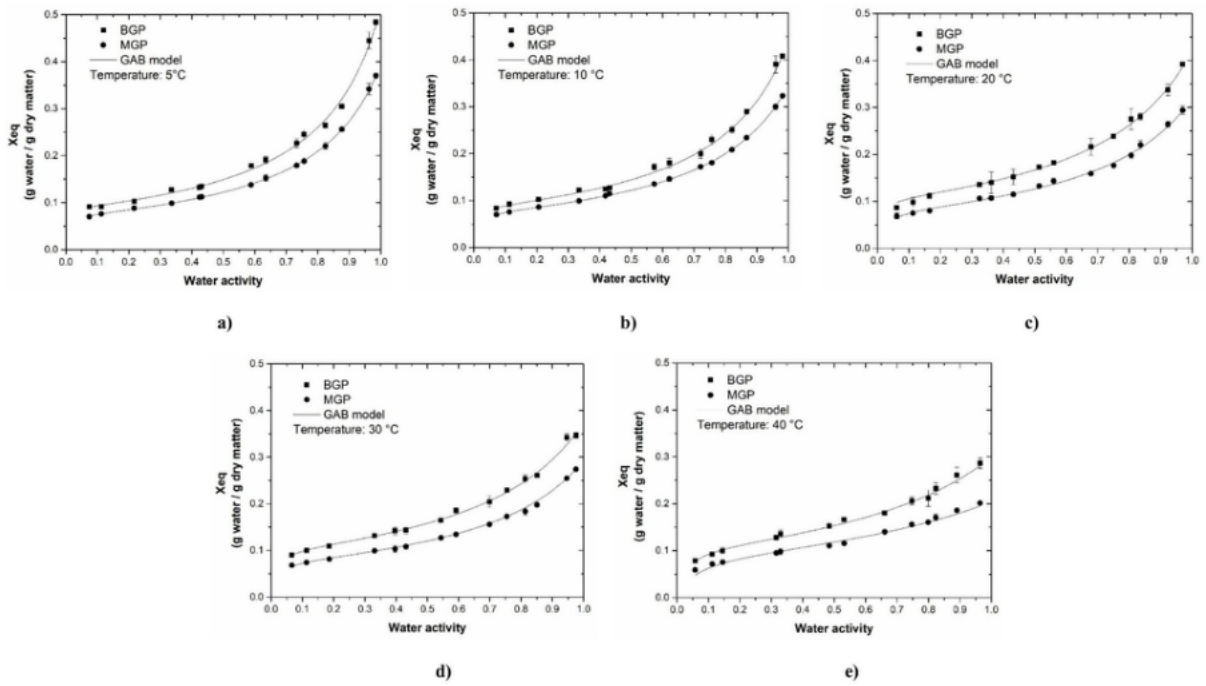
suas propriedades higroscópicas, uma vez que as interações água-sólido afetam diretamente a eficiência da secagem, a estabilidade do armazenamento, o prazo de validade e a preservação dos compostos bioativos. Portanto, a determinação e modelagem de isotermas de sorção de água são essenciais para otimizar as condições de processamento e ampliar as aplicações tecnológicas do bagaço de uva.

Os elevados teores de fenólicos e antocianinas observados no presente estudo reforçam o potencial do bagaço de uva como ingrediente funcional e valiosa fonte de extratos naturais. Em estudo utilizando bagaço de uva Bordô, Pertuzatti et al. (2020) relataram 13,96 mg GAE g^{-1} de compostos fenólicos totais e 0,23 mg equivalentes de cianidina-3-glicosídeo g^{-1} de antocianinas monoméricas totais, confirmando a presença de quantidades substanciais de compostos bioativos neste subproduto. Jansen et al. (2024) demonstraram ainda o potencial tecnológico do bagaço de uva Bordô ao incorporar extratos ricos em antocianinas em fibras proteicas por eletrofiação, produzindo materiais com alta carga de compostos bioativos, preservando suas atividades antioxidantes e antimicrobianas.

3.4.3. Isotermas de sorção de água

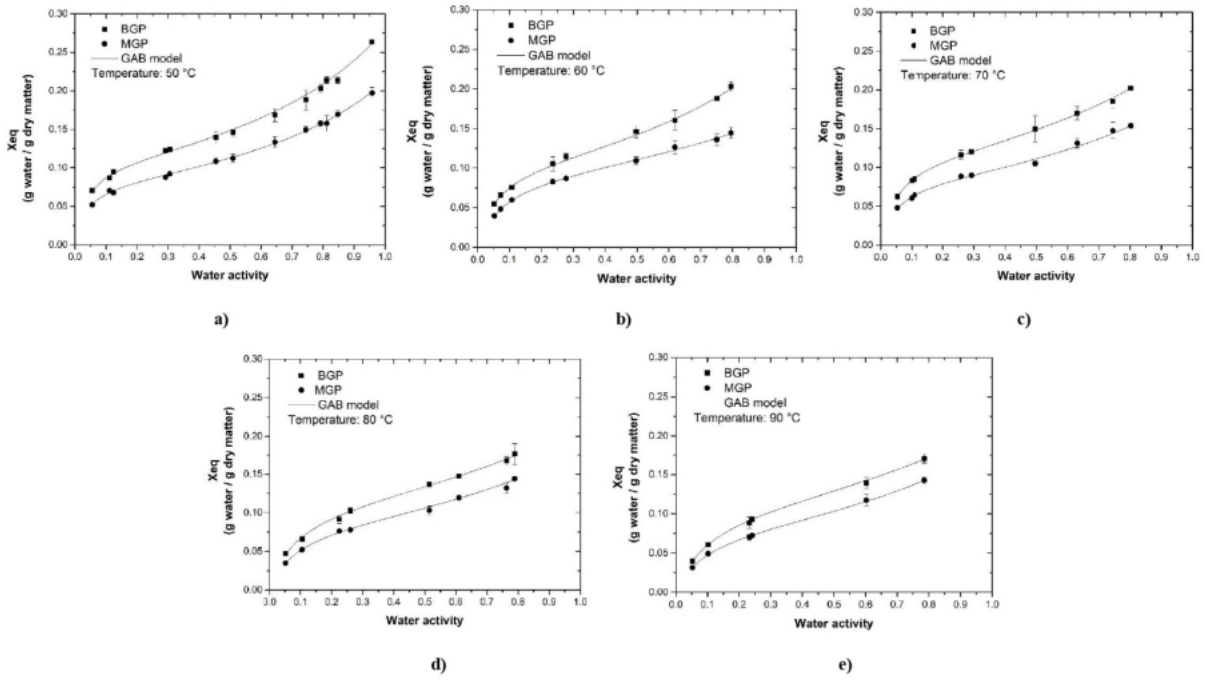
As Figuras 3.1 e 3.2 comparam as isotermas de sorção de água do bagaço de uva Bordô (BGP) e do bagaço de uva Merlot (MGP), mostrando a variação no teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) em função da atividade de água (a_w) em diferentes temperaturas.

Figura 3.1. Isotermas de adsorção de água do bagaço de uva nas temperaturas de armazenamento: Bordô (BGP) e Merlot (MGP) com modelo GAB ajustado.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Figura 3.2. Isotermas de dessorção de água para o bagaço de uva nas temperaturas de secagem: Bordô (BGP) e Merlot (MGP), com o modelo GAB ajustado.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As isotermas de adsorção de água foram determinadas nas

temperaturas de armazenamento (5; 10; 20; 30 e 40 °C; Figura 4), enquanto as isotermas de dessorção de água foram determinadas em temperaturas representativas das condições de secagem (50, 60, 70, 80 e 90 °C; Figura 5). Os dados experimentais (Tabela S1 - Material suplementar) abrangeram uma ampla faixa de X_{eq} (0,0315–0,4847 g de água g^{-1} de matéria seca) e a_w (0,0526–0,9848), fornecendo uma descrição abrangente do comportamento higroscópico de ambos os materiais.

Tanto para a adsorção quanto para a dessorção, o X_{eq} geralmente aumentou com o aumento da a_w e diminuiu com o aumento da temperatura (Figura S1 - Material suplementar). Em valores mais elevados de a_w, uma maior quantidade de água estava disponível para interagir com grupos funcionais hidrofílicos da matriz sólida, particularmente grupos hidroxila associados à celulose, hemicelulose e compostos fenólicos (Sanches et al., 2023). Durante a adsorção, a água interage inicialmente com sítios de sorção de alta energia por meio de ligações de hidrogênio e, à medida que a a_w aumenta, forma progressivamente camadas adicionais de água, resultando em um X_{eq} mais elevado. Durante a dessorção, ocorre o processo inverso, com interações água-sólido progressivamente mais fracas à medida que a umidade é removida da matriz.

O aumento da temperatura eleva a energia cinética das moléculas de água e, geralmente, enfraquece as interações água-sólido, resultando em um X_{eq} menor para uma determinada a_w (Al-Muhtaseb et al., 2002). Essas tendências são consistentes com um comportamento de sorção predominantemente governado por interações físicas.

As isotermas apresentaram perfis semelhantes para ambos os bagaços de uva em todas as temperaturas avaliadas. Em todas as condições experimentais, as curvas de adsorção e dessorção exibiram a forma sigmoidal típica do Tipo II, segundo a classificação de Brunauer et al. (1940), característica de muitos materiais alimentícios e biomassas lignocelulósicas. Comportamento semelhante foi relatado para o bagaço de mandioca (Polachini et al., 2016) e para o bagaço de malte (Sanches et al., 2023). As isotermas do Tipo II compreendem três regiões características correspondentes à sorção em monocamada em baixas atividades de água, sorção em multicamadas em

atividades de água intermediárias e condensação capilar em altas atividades de água (Mathlouthi, 2001).

A histerese de sorção, que se refere à diferença entre os teores de umidade de equilíbrio de adsorção e dessorção em uma mesma atividade de água, é um fenômeno importante em materiais higroscópicos e pode influenciar a secagem, o armazenamento e a estabilidade em relação à umidade (Yan et al., 2008). Embora a histerese não tenha sido quantificada diretamente no presente estudo, visto que as isotermas de adsorção e dessorção foram determinadas em faixas de temperatura distintas, esse fenômeno deve ser considerado em estudos futuros que avaliem o comportamento de sorção de umidade do bagaço de uva sob condições de temperatura idênticas.

As Figuras 3.1 e 3.2 também mostram que o BGP apresentou valores de X_{eq} mais elevados do que o MGP em toda a faixa de temperaturas e atividades de água avaliadas, com diferenças mais acentuadas em altas atividades de água (a_w > 0,6), onde a sorção em multicamadas se torna predominante (Al-Muhtaseb et al., 2002). Esse comportamento pode ser atribuído às diferenças de composição entre os dois materiais. O maior teor de hemicelulose pode aumentar a acessibilidade aos sítios de sorção hidrofílicos, favorecendo, assim, a retenção de água.

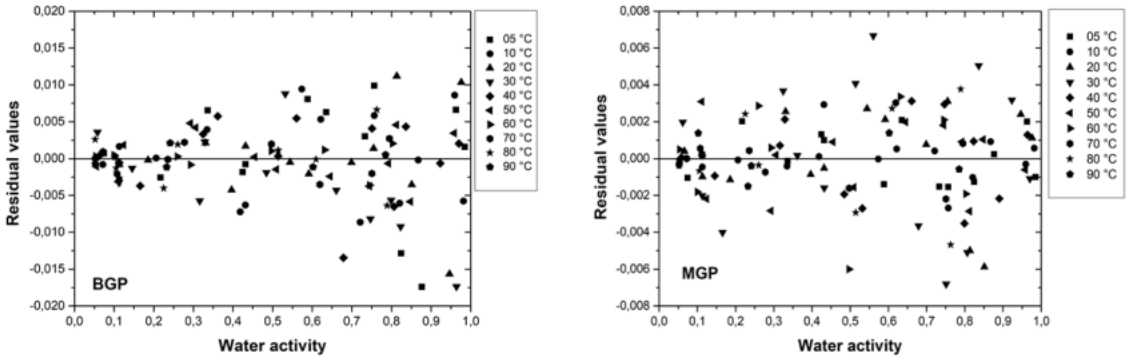
3.4.4. Modelagem de Isotermas de Sorção

Entre os modelos avaliados (GAB, Peleg, Halsey, Henderson e Oswin), os modelos GAB e Peleg apresentaram o melhor desempenho estatístico, exibindo os menores valores de RMSE e os maiores coeficientes de determinação ajustados (Radj²) em todas as temperaturas (Tabela S2 - Material suplementar). Apesar do desempenho de ajuste semelhante desses dois modelos, o GAB foi selecionado para descrever as isotermas de adsorção e dessorção de água dos bagaços de uva devido ao significado físico de seus parâmetros (Al-Muhtaseb et al., 2002), o que permite uma interpretação termodinâmica do processo de sorção.

A análise de resíduos (Figura 6) revelou uma tendência de aumento nos desvios do modelo GAB em altas atividades de água. Esse comportamento indica que, embora o modelo GAB descreva adequadamente as regiões de

baixa e intermediária atividade de água, pequenas discrepâncias podem ocorrer em altas atividades de água ($_{aw}$), onde a sorção passa a ser dominada pela formação de multicamadas (Vasile et al., 2020) e as interações entre as moléculas de água sorvidas aumentam a complexidade do sistema. Comportamento semelhante foi relatado para o bagaço de malte (Sanches et al., 2023). Apesar dessas limitações, o modelo GAB é amplamente utilizado para descrever as isotermas de sorção de alimentos e subprodutos agroindustriais, tanto pelo seu excelente desempenho estatístico quanto pela interpretação física de seus parâmetros (Kaderides & Goula, 2017; Sanches et al., 2023). O modelo GAB pressupõe a sorção em monocamada seguida pela sorção em multicamadas (Quirijns et al., 2005), permitindo que os parâmetros Xm, C e K (Tabela 6) descrevam a disponibilidade e a energia de ligação da água no material.

Figura 3.3. Distribuições dos gráficos de resíduos para a equação GAB em todas as temperaturas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os valores de Xm, correspondentes ao teor de umidade da monocamada, diminuíram com o aumento da temperatura para ambos os bagaços de uva, tanto nos processos de adsorção quanto nos de dessorção, indicando uma redução na quantidade de água fortemente ligada à matriz sólida. Esse comportamento está associado ao aumento da energia cinética das moléculas de água, o que enfraquece as interações de sorção (Muzaffar & Kumar, 2016). Além disso, o BGP apresentou valores de Xm mais elevados do

que o MGP em todas as temperaturas avaliadas e em ambos os processos de sorção, confirmando sua maior afinidade pela água e maior higroscopicidade.

A constante C, associada à energia de ligação das moléculas de água na monocamada, também diminuiu com o aumento da temperatura, tanto na adsorção quanto na dessorção, refletindo a menor afinidade da matriz sólida pela água e confirmando a natureza exotérmica das interações água-sólido (Vasile et al., 2020). Esse comportamento é consistente com a redução no teor de umidade de equilíbrio observada em temperaturas mais elevadas para ambos os processos de sorção.

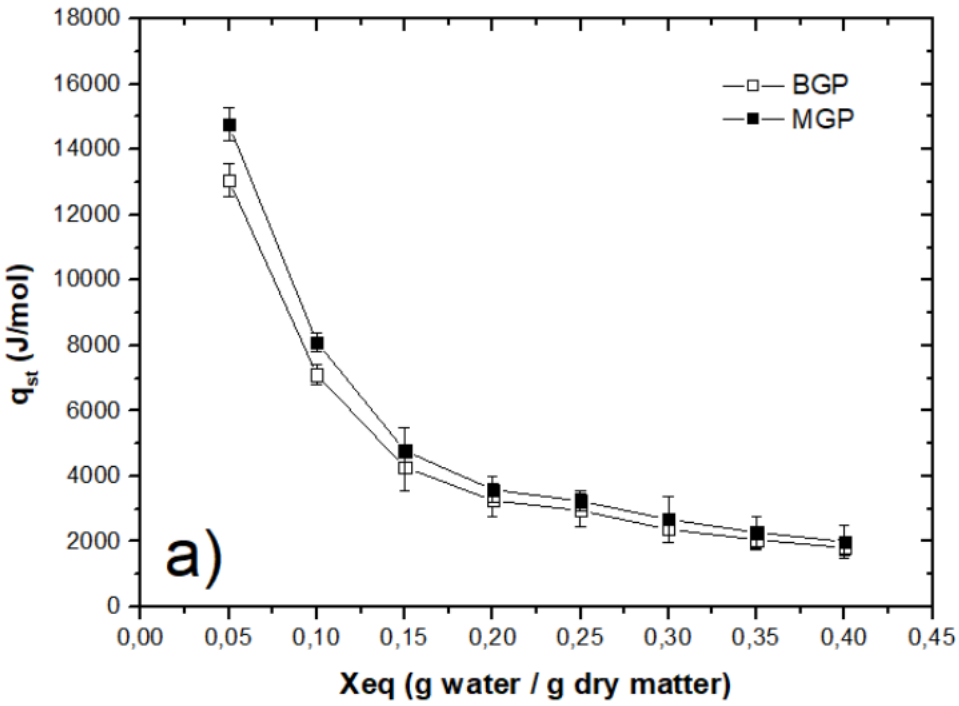
Os valores de K, associados às propriedades da água sorvida nas multicamadas, variaram de 0,53 a 0,83, indicando que a água sorvida apresenta características semelhantes às da água líquida ou fracamente ligada. Esses valores sugerem que as moléculas de água nas camadas externas são fracamente retidas pela matriz (Pérez-Alonso et al., 2006) e, portanto, apresentam maior mobilidade, aumentando sua disponibilidade para participar de reações químicas, enzimáticas e microbiológicas. De modo geral, os parâmetros do modelo GAB obtidos para a adsorção e a dessorção demonstram que o controle do teor de umidade e da atividade de água é essencial para manter a estabilidade físico-química do bagaço de uva durante o armazenamento e para compreender a remoção de umidade em condições de secagem, fundamentando assim sua utilização como matéria-prima para aplicações alimentícias e biotecnológicas.

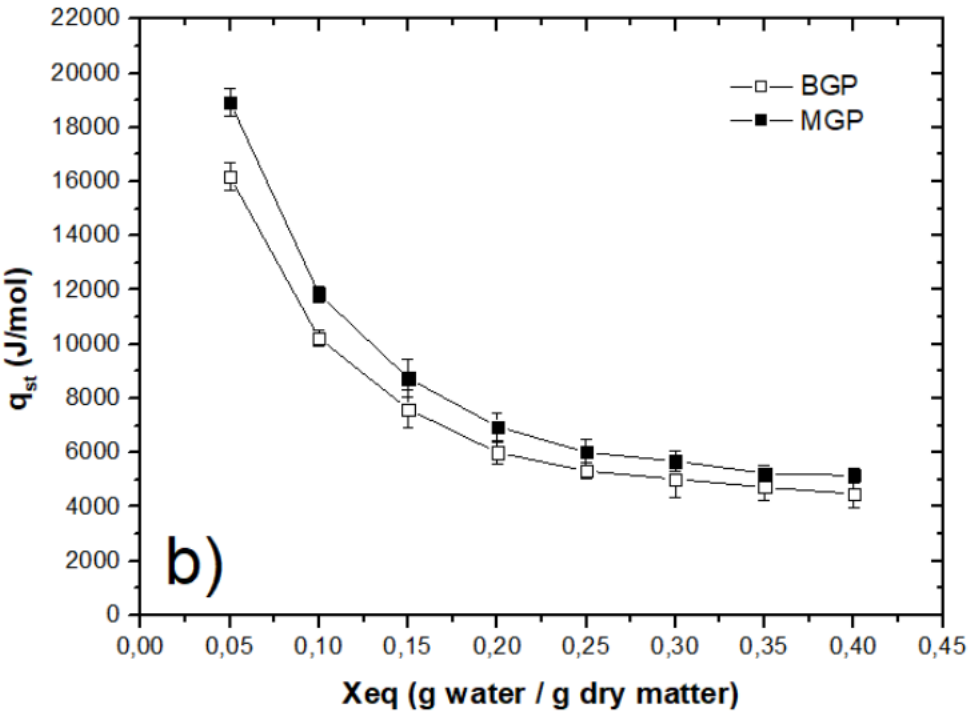
3.4.5. Calor isostérico líquido de sorção

O calor isostérico líquido de sorção (qst) é um parâmetro termodinâmico importante utilizado para caracterizar a intensidade das interações água-sólido e a energia associada à sorção de água em um determinado teor de água de equilíbrio (Polachini et al., 2016). Conforme mostrado nas Figuras 8a e d, o calor isostérico líquido de adsorção variou de 1.813,92 a 13.064,37 J mol^{-1} para BGP e de 1.995,32 a 14.762,74 J mol^{-1} para MGP, enquanto o calor isostérico líquido de dessorção variou de 4.483,60 a 16.184,41 J mol^{-1} para BGP e de 5.156,14 a 18.935,76 J mol^{-1} para MGP, em uma faixa de teor de água de equilíbrio de 0,05 a 0,40 g de água g^{-1} de matéria seca.

O calor isostérico líquido relatado para materiais lignocelulósicos varia consideravelmente, dependendo tanto da composição da biomassa quanto da faixa de umidade de equilíbrio avaliada. Para o bagaço de malte, Ribeiro-Sanches et al. (2023) relataram valores de qst variando de 140,88 a 14.412,31 J mol^{-1} em uma faixa de umidade de equilíbrio de 0,05 a 0,45 g de água g^{-1} de matéria seca, o que é comparável aos valores obtidos no presente estudo. Em contrapartida, Borges-Machado et al. (2024) relataram requisitos energéticos menores para sementes de pimenta jalapeño, com qst variando de 4.105 a 9.588 J mol^{-1} em uma faixa de umidade mais estreita (0,07 a 0,13 g de água g^{-1} de matéria seca).

Figura 3.4. Calor isostérico líquido de sorção (qst) dos bagaços de uva bordo e merlot em função do teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) para os processos de adsorção (a) e dessorção de água (b).





Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Essas diferenças demonstram que o comportamento energético da sorção depende não apenas das características físico-químicas do material, mas também da faixa de umidade considerada. Para ambos os bagaços de uva, o calor isostérico líquido de adsorção e dessorção (qst) aumentou à medida que o teor de umidade de equilíbrio diminuiu, indicando interações água-sólido progressivamente mais fortes e maiores exigências energéticas em teores de umidade mais baixos. Em baixos teores de umidade, as moléculas de água associam-se preferencialmente a sítios de sorção de alta energia por meio de interações fortes com grupos funcionais hidrofílicos presentes em proteínas, celulose, hemiceluloses e outros constituintes polares da matriz lignocelulósica (Pérez-Alonso et al., 2006). À medida que o teor de umidade aumenta, esses sítios de alta energia são progressivamente ocupados, e moléculas de água adicionais são retidas em multicamadas por meio de interações intermoleculares mais fracas, resultando em valores de qst mais baixos e maior mobilidade da água. Esse comportamento foi observado tanto nos processos de adsorção quanto nos de dessorção e é consistente com estudos anteriores sobre bagaço de mandioca (Polachini et al., 2016), folhas de ora-pro-nóbis (Borges-Machado, Ribeiro-Sanches et al., 2024) e sementes de mamão (Rosa et al., 2021).

Embora o BGP tenha apresentado maiores teores de umidade de equilíbrio ao longo das isotermas de sorção avaliadas, o MGP exibiu consistentemente valores mais elevados de calor isostérico líquido na maior parte da faixa de umidade de equilíbrio, tanto para a adsorção quanto para a dessorção. Esse resultado indica que, apesar de reter menores quantidades de água, a água associada ao MGP interage mais fortemente com a matriz sólida e, consequentemente, requer mais energia para a sorção ou remoção (Muzaffar & Kumar, 2016).

3.4.6. CONCLUSÕES

Neste estudo, as propriedades de adsorção e dessorção de água dos bagaços de uva das variedades Bordô (BGP) e Merlot (MGP) foram avaliadas em temperaturas relevantes para o armazenamento (5–40 °C) e a secagem (50–90 °C), respectivamente. Ambos os bagaços de uva apresentaram uma composição lignocelulósica rica em lignina insolúvel, proteínas e compostos bioativos. O MGP apresentou maiores teores de celulose, compostos fenólicos e antocianinas, além de maior capacidade antioxidante, enquanto o BGP exibiu maiores teores de hemicelulose, menor cristalinidade e uma estrutura mais amorfa, o que ajuda a explicar as diferenças no comportamento de sorção de água entre eles.

As isotermas de sorção apresentaram o perfil sigmoidal típico do Tipo II, e o modelo GAB descreveu satisfatoriamente os dados tanto de adsorção quanto de dessorção. Em comparação com o MGP, o BGP apresentou maiores teores de umidade de equilíbrio, indicando maior higroscopicidade; por outro lado, o MGP demonstrou interações água-sólido mais fortes, evidenciadas pelos valores mais elevados de calor isostérico líquido, entalpia diferencial e entropia diferencial em ambos os processos de sorção. Tanto na adsorção quanto na dessorção, a magnitude desses parâmetros termodinâmicos aumentou à medida que o teor de umidade de equilíbrio diminuiu, indicando interações mais fortes entre a água e a matriz sólida em teores de umidade mais baixos.

Do ponto de vista prático, uma atividade de água de aproximadamente 0,38 (≈38% de umidade relativa) foi identificada como a condição ideal de armazenamento, proporcionando um equilíbrio favorável entre a estabilidade do produto e a eficiência da secagem, ao mesmo tempo em que favorece a valorização tecnológica do bagaço de uva.

3.4.7. REFERÊNCIAS

Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2002). Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Food Products: A Review. Food and Bioproducts Processing, 80(2), 118–128. https://doi.org/10.1205/09603080252938753

Atatoprak, T., Amorim, M. M., Ribeiro, T., Pintado, M., & Madureira, A. R. (2022). Effect of alkaline and deep eutectic solvents pretreatments on the recovery of lignin with antioxidant activity from grape stalks. International Journal of Biological Macromolecules, 220, 406–414. https://doi.org/10.1016/j.fochms.2021.100067

Baldán, Y., Riveros, M., Fabani, M. P., & Rodriguez, R. (2023). Grape pomace powder valorization: a novel ingredient to improve the nutritional quality of gluten-free muffins. Biomass Conversion and Biorefinery, 13(11), 9997–10009. https://doi.org/10.1007/S13399-021-01829-8

Barcia, M. T., Pertuzatti, P. B., Gómez-Alonso, S., Godoy, H. T., & Hermosín-Gutiérrez, I. (2014). Phenolic composition of grape and winemaking by-products of Brazilian hybrid cultivars BRS Violeta and BRS Lorena. Food Chemistry, 159(2), 95–105. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.163

Barcia, M. T., Pertuzatti, P. B., Rodrigues, D., Gómez-Alonso, S., Hermosín-Gutiérrez, I., & Godoy, H. T. (2014). Occurrence of low molecular weight phenolics in Vitis vinifera red grape cultivars and their winemaking by-products from São Paulo (Brazil). Food Research International, 62(17), 500–513. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.03.051

Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of “Antioxidant Power”: The FRAP Assay. Analytical Biochemistry, 239(1), 70–76. https://doi.org/10.1006/ABIO.1996.0292

Berger, C., Mattos, B. D., Amico, S. C., de Farias, J. A., Coldebella, R., Gatto, D. A., & Missio, A. L. (2020). Production of sustainable polymeric composites

using grape pomace biomass. Biomass Conversion and Biorefinery 2020 12:12, 12(12), 5869–5880. https://doi.org/10.1007/S13399-020-00966-W

Bonazzi, C., & Dumoulin, E. (2014). Quality Changes in Food Materials as Influenced by Drying Processes. Modern Drying Technology: Volume 1: Computational Tools at Different Scales, 1, 1–20. https://doi.org/10.1002/9783527631728.CH14

Borges-Machado, A. L., Neves-Martins, M. J., Ribeiro-Sanches, M. A., Pereira, L. S., dos Santos, P. A., & Telis-Romero, J. (2024). Desorption properties of taioba (Xanthosoma taioba E.G. Gonç.) leaves: A non-conventional edible plant. Food Bioscience, 59, 104093. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104093

Borges-Machado, A. L., Ribeiro-Sanches, M. A., Martins, M. J. N., Luna-Flores, M., Luna-Solano, G., Souza, S. J. F. de, & Telis-Romero, J. (2024). Drying kinetics and water adsorption properties of jalapeño pepper seeds (Capsicum annuum L.): A study aiming at their recovery and integral exploitation. LWT, 204, 116452. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2024.116452

Borges-Machado, A. L., Ribeiro-Sanches, M. A., Neves-Martins, M. J., dos Santos, P. A., Luna-Solano, G., & Telis-Romero, J. (2024). Water desorption isotherms and thermodynamic properties of Ora-pro-nóbis (Pereskia aculeata Miller). LWT, 193, 115749. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2024.115749

Botelho, T., Costa, M., Wilk, M., & Magdziarz, A. (2018). Evaluation of the combustion characteristics of raw and torrefied grape pomace in a thermogravimetric analyzer and in a drop tube furnace. Fuel, 212, 95–100. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2017.09.118

Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT - Food Science and Technology, 28(1), 25–30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5

Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E., & Teller, E. (1940). On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases. Journal of the American Chemical Society, 62(7), 1723–1732. https://doi.org/10.1021/ja01864a025

Castro, L. E. N., Barroso, T. L. C. T., Sganzerla, W. G., Costa, J. M., Saia, F. T., Colpini, L. M. S., & Forster-Carneiro, T. (2024). Subcritical water hydrolysis of grape pomace as a sustainable pretreatment for anaerobic digestion in a biorefinery concept. Fuel, 363, 130899. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.130899

Castro, L. E. N., Barroso, T. L. C. T., Ferreira, V. C., & Forster Carneiro, T. (2025, January). Characterization of benitaka grape pomace (Vitis vinifera L.): an analysis of its properties for future biorefinery applications. Waste, Vol. 3, No. 1, p. 4.

Da, C., Carvalho, S., Augusto, M., Sanches, R., Delalibera, P., Tussolini, M., Konda, D. H., Pertuzatti, P. B., & Tussolini, L. (2025). Active film made from Psidium guajava peel and starch for use in food packaging. Food Science and Technology, 45, 2025. https://doi.org/10.5327/fst.00409

da Costa, K. C. M., Oliveira, L. de S., Silva, J. C., Santana, T. S., de Freitas, R. A., Bressan, A. F. M., Gómez-Alonso, S., Pérez-Navarro, J., Pertuzatti, P. B., & Giachini, F. R. (2024). Enhancing Vascular Health and Lowering Blood Pressure in Spontaneously Hypertensive Rats through Syrah Grape (Vitis vinifera) Pomace: The Role of Phenolic Compounds. Nutrients 2024, Vol. 16, 16(14). https://doi.org/10.3390/nu16142312

da Silva, M. F., de Mélo, A. H. F., Rodrigues, D. M., Bueno, D., Hoffman, P., & Goldbeck, R. (2026). Intensification of the simultaneous production of multifunctional cello-oligosaccharides and nanocellulose crystalline from ultrasound assisted enzymatic hydrolysis of agroindustrial wastes. Food Research International, 235, 119208. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2026.119208

Food and Drug Administration (FDA) Daily value and percent daily value: Changes on the new nutrition and supplement facts labels; Food and Drug Administration, 2023.

de Almeida, M. J., Ribeiro-Sanches, M. A., Guimarães, B., Lago-Vanzela, E. S., & Telis-Romero, J. (2025). Ultrasound-Assisted Thermal Maceration of Bordo

Grape (Vitis labrusca L.): Insights of Anthocyanin Degradation Kinetics, Antioxidant Activity and Thermostability Parameters. Journal of Food Process Engineering, 48(1), e70049. https://doi.org/10.1111/JFPE.70049

de Castilhos, M. B. M., Betiol, L. F. L., de Carvalho, G. R., & Telis-Romero, J. (2017). Experimental study of physical and rheological properties of grape juice using different temperatures and concentrations. Part I: Cabernet Sauvignon. Food Research International, 100, 724–730. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2017.07.075

de Castilhos, M. B. M., Betiol, L. F. L., de Carvalho, G. R., & Telis-Romero, J. (2018). Experimental study of physical and rheological properties of grape juice using different temperatures and concentrations. Part II: Merlot. Food Research International, 105, 905–912. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2017.12.026

Estalla, A., Álvarez, J., Eduardo, K., Rios-Mera, J. D., Gonza, M. M. C., Huamán-Castilla, N. L., & Saldaña, E. (2026). Composition-driven restructuring of wheat cookies enriched with cañihua flour and grape peel: Linking antioxidant retention, instrumental texture, and dynamic sensory perception. Food Research International, 239, 119573. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2026.119573

Evangelista, R. R., Sanches, M. A. R., de Castilhos, M. B. M., Cantú-Lozano, D., & Telis-Romero, J. (2020). Determination of the rheological behavior and thermophysical properties of malbec grape juice concentrates (Vitis vinifera). Food Research International, 137, 109431. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2020.109431

Facchini, F., Silvestri, B., Digiesi, S., & Lucchese, A. (2024). Subcritical water hydrolysis of grape pomace as a sustainable pretreatment for anaerobic digestion in a biorefinery concept. Fuel, 363, 130899. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103235

Ferreira, A. F., Ribau, J. P., & Costa, M. (2021). A decision support method for biochars characterization from carbonization of grape pomace. Biomass and Bioenergy, 145, 105946. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105946

Garvín, A., Augusto, P. E. D., Ibarz, R., & Ibarz, A. (2019). Kinetic and thermodynamic compensation study of the hydration of faba beans (Vicia faba L.). Food Research International, 119, 390–397. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2019.02.002

Garvín, A., Ibarz, R., & Ibarz, A. (2017). Kinetic and thermodynamic compensation. A current and practical review for foods. Food Research International, 96, 132–153. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2017.03.004

Giusti, M. M., & Wrolstad, R. E. (2001). Characterization and Measurement of Anthocyanins by UV-Visible Spectroscopy. Current Protocols in Food Analytical Chemistry, 00(1), F1.2.1-F1.2.13. https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0102s00

Gomide, J. L., & Demuner, B. J. (1986). Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. O papel, 47(8), 36-38.

Greenspan, L. (1977) Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions. Journal of Research of the National Bureau of Standards—A Physics and Chemistry, 81A, 89-96. https://doi.org/10.6028/jres.081A.011

Han, Y., Shan, C., Zeng, H., Shi, S., & Han, L. (2025). Microwave-assisted alkaline pretreatment of white grape pomace for the production of bioethanol. RSC Advances, 15(31), 25384–25392. https://doi.org/10.1039/d5ra04296h

Han, Z., & Luo, X. (2026). Insights into grape pomace as a sustainable source for active and intelligent packaging: Functional components, processing methods, and applications. Applied Food Research, 6(1), 101776. https://doi.org/10.1016/j.afres.2026.101776

Horwitz, W., & Latimer, G. (2005). Official methods of analysis of AOAC International. https://hero.epa.gov/reference/11581705/

Jansen, E. T., Cruz, E. P. da, Fonseca, L. M., Hackbart, H. C. dos S., Radünz, M., Siebeneichler, T. J., Gandra, E. A., Rombaldi, C. V., Dias, A. R. G., & Zavareze, E. da R. (2024). Anthocyanin-rich grape pomace extract encapsulated in protein fibers: Colorimetric profile, in vitro release, thermal

resistance, and biological activities. Food Research International, 196, 115081. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2024.115081

Kaderides, K., & Goula, A. M. (2017). Development and characterization of a new encapsulating agent from orange juice by-products. Food Research International, 100, 612–622. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2017.07.057

Labuza, T. Creation of Moisture Sorption Isotherms for Hygroscopic Materials. In: Sorption Iso-therm Methods; International Symposium on Humidity and Moisture; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE): Washington, DC, USA, 1963.

Lahaye, M., Falourd, X., Le Bot, L., Bertin, N., & Musse, M. (2025). Impact of drying on the composition and organization tomato fruit cell walls: A biochemical and structural study. Food Research International, 213, 116567. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2025.116567

Lahnine, L., Idlimam, A., Mahrouz, M., Jada, A., Hanine, H., Mouhib, M., Zantar, S., & Kouhila, M. (2016). Adsorption measurements and modeling of thyme treated with gamma irradiation and thermal–biochemical treatment. Industrial Crops and Products, 88, 36–43. https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2016.02.049

Lu, Z. X., He, J. F., Zhang, Y. C., & Bing, D. J. (2020). Composition, physicochemical properties of pea protein and its application in functional foods. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 60(15), 2593–2605. https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1651248

Machado, A. R., Voss, G. B., Machado, M., Paiva, J. A. P., Nunes, J., & Pintado, M. (2024). Chemical characterization of the cultivar ‘Vinhão’ (Vitis vinifera L.) grape pomace towards its circular valorisation and its health benefits. Measurement: Food, 15, 100175. https://doi.org/10.1016/J.MEAFOO.2024.100175

Machado, T. O. X., Portugal, I., Kodel, H. de A. C., Droppa-Almeida, D., Dos Santos Lima, M., Fathi, F., Oliveira, M. B. P. P., de Albuquerque-Júnior, R. L. C.,

Dariva, C., & Souto, E. B. (2024). Therapeutic potential of grape pomace extracts: A review of scientific evidence. Food Bioscience, 60(5), 104210. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104210

Madadian, E., Akbarzadeh, A. H., Orsat, V., & Lefsrud, M. (2017). Pelletized Composite Wood Fiber Mixed with Plastic as Advanced Solid Biofuels: Physico-Chemo-Mechanical Analysis. Waste and Biomass Valorization 2017 10:3, 10(3), 721–732. https://doi.org/10.1007/S12649-017-0080-1

Madadian, E., Rahimi, J., Mohebbi, M., & Simakov, D. S. A. (2022). Grape pomace as an energy source for the food industry: A thermochemical and kinetic analysis. Food and Bioproducts Processing, 132, 177–187. https://doi.org/10.1016/J.FBP.2022.01.006

Martins, M. J. N., Sanches, M. A. R., Polachini, T. C., de Oliveira, E. B., Coimbra, J. S. D. R., & Telis-Romero, J. (2023). Solubility of different salts used in the control of the water activity of foods. Ciência e Agrotecnologia, 47, e018722.

https://doi.org/10.1590/1413-7054202347018722

Mathlouthi, M. (2001). Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs. Food Control, 12(7), 409–417. https://doi.org/10.1016/S0956-7135(01)00032-9

Milanezzi, G. C., & Silva, E. K. (2025). Role of particle size and co-extraction dynamics in the sequential recovery of phenolics, starch, and proteins from potato peel by-products. Food Research International, 221, 117236. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2025.117236

Mohamed Ahmed, I. A., Özcan, M. M., Al Juhaimi, F., Babiker, E. F. E., Ghafoor, K., Banjanin, T., Osman, M. A., Gassem, M. A., & Alqah, H. A. S. (2020). Chemical composition, bioactive compounds, mineral contents, and fatty acid composition of pomace powder of different grape varieties. Journal of Food Processing and Preservation, 44(7), e14539. https://doi.org/10.1111/JFPP.14539;SUBPAGE:STRING:ACCESS

Muzaffar, K., & Kumar, P. (2016). Moisture sorption isotherms and storage study of spray dried tamarind pulp powder. Powder Technology, 291, 322–327. https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2015.12.046

Goldschimid, O. (1971). Ultraviolet spectra. Lignins. New York: Wiley Interscience, 241-266.

Oliveira, A. M. B., Viganó, J., Sanches, V. L., Rostagno, M. A., & Martínez, J. (2022). Extraction of potential bioactive compounds from industrial Tahiti lime (Citrus latifólia Tan.) by-product using pressurized liquids and ultrasound-assisted extraction. Food Research International, 157, 111381. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2022.111381

Oliveira, M. M. G. de, Fessori, A. G. B. W., Huamaní-Meléndez, V. J., & Mauro, M. A. (2025). Cowpea protein concentrate: A detailed analysis of composition, structure, and technological properties. Food Research International, 213, 116581. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2025.116581

Pérez-Alonso, C., Beristain, C. I., Lobato-Calleros, C., Rodríguez-Huezo, M. E., & Vernon-Carter, E. J. (2006). Thermodynamic analysis of the sorption isotherms of pure and blended carbohydrate polymers. Journal of Food Engineering, 77(4), 753–760. https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2005.08.002

Pertuzatti, P. B., Mendonça, S. C., Alcoléa, M., Guedes, C. T., Amorim, F. da E., Beckmann, A. P. S., Gama, L. A., & Américo, M. F. (2020). Bordo grape marc (Vitis labrusca): Evaluation of bioactive compounds in vitro and in vivo. LWT, 129(8), 109625. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109625

Polachini, T. C., Betiol, L. F. L., Lopes-Filho, J. F., & Telis-Romero, J. (2016). Water adsorption isotherms and thermodynamic properties of cassava bagasse. Thermochimica Acta, 632, 79–85. https://doi.org/10.1016/J.TCA.2016.03.032

Quirijns, E. J., Van Boxtel, A. J. B., Van Loon, W. K. P., & Van Straten, G. (2005). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. Journal of the Science of Food and Agriculture, 85(11), 1805–1814.

https://doi.org/10.1002/JSFA.2140

Ravindran, R., Sarangapani, C., Jaiswal, S., Lu, P., Cullen, P. J., Bourke, P., & Jaiswal, A. K. (2019). Improving enzymatic hydrolysis of brewer spent grain with nonthermal plasma. Bioresource Technology, 282, 520–524. https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.03.071

Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radical Biology and Medicine, 26(9–10), 1231–1237. https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3

Ribeiro Sanches, M. A., Camelo-Silva, C., Tussolini, L., Tussolini, M., Zambiazi, R. C., & Becker Pertuzatti, P. (2021). Development, characterization and optimization of biopolymers films based on starch and flour from jabuticaba (Myrciaria cauliflora) peel. Food Chemistry, 343, 128430. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.128430

Ribeiro-Sanches, M. A., Júnior, S. L. F., Santezi, C., Caruso, Í. P., Augusto, P. E. D., Telis-Romero, J., & Polachini, T. C. (2026). Extraction of proteins from brewer's spent grain using ultrasound and alkaline hydrogen peroxide: Impact on extraction yield, structural and techno-functional properties. Food Hydrocolloids, 172, 112012. https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2025.112012

Ribeiro-Sanches, M. A., Stochi, V. A. L., Borges-Machado, A. L., Augusto, P. E. D., Polachini, T. C., & Telis-Romero, J. (2024). Valorization of brewer's spent grains (BSG) through alkaline hydrogen peroxide processing: Effect on composition, structure and rheological properties. Food and Bioproducts Processing, 147, 239–250. https://doi.org/10.1016/J.FBP.2024.07.008

Rizvi, S. S. H. (2014). Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration. Engineering Properties of Foods: Third Edition, 239–326. https://doi.org/10.1201/9781420028805-11

Romero, A., Rebellato, A. P., César Costa-Santos, A., Milani, R. F., Azevedo, M. M., Azevedo, J., Pallone, L., & Morgano, M. A. (2026). Potential Use of Grape

Pomace for the Development of New Products: Study of Inorganic Elements Through Simulated Gastrointestinal Digestion. Foods 2026, Vol. 15, Page 2060, 15(12), 2060. https://doi.org/10.3390/FOODS15122060

Rosa, D. P., Evangelista, R. R., Borges Machado, A. L., Sanches, M. A. R., & Telis-Romero, J. (2021). Water sorption properties of papaya seeds (Carica papaya L.) formosa variety: An assessment under storage and drying conditions. LWT, 138, 110458. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.110458

Sanches, M. A. R., Augusto, P. E. D., Polachini, T. C., & Telis-Romero, J. (2023). Water sorption properties of brewer's spent grain: A study aimed at its stabilization for further conversion into value-added products. Biomass and Bioenergy, 170, 106718. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2023.106718

Santiago-Ramos, D., Figueroa-Cárdenas, J. de D., Véles-Medina, J. J., & Salazar, R. (2018). Beans (Phaseolus vulgaris L.): whole seeds with complex chemical composition. Current Opinion in Food Science, 19, 63–71. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.156

Segal, L., Creely, J. J., Martin, A. E., & Conrad, C. M. (1959). An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. Textile Research Journal, 29(10), 786–794. https://doi.org/10.1177/004051755902901003

Sifuentes-Nieves, I., Yáñez Macías, R., Neira Velázquez, G., Velázquez, G., Garcia Hernandez, Z., Gonzalez Morones, P., & Hernández-Hernández, E. (2021). Biobased sustainable materials made from starch and plasma/ultrasound modified Agave fibers: Structural and water barrier performance. International Journal of Biological Macromolecules, 193, 2374–2381. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.11.071

Simón, C., Esteban, L. G., de Palacios, P., Fernández, F. G., & García-Iruela, A. (2016). Thermodynamic properties of the water sorption isotherms of wood of limba (Terminalia superba Engl. & Diels), obeche (Triplochiton scleroxylon K. Schum.), radiata pine (Pinus radiata D. Don) and chestnut (Castanea sativa

Mill.). Industrial Crops and Products, 94, 122–131. https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2016.08.008

Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). [14] Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. Methods in Enzymology, 299, 152–178. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1

Siqueira-de-Lima, M., Cagnin, C., Borges-Machado, A. L., Ribeiro-Sanches, M. A., Telis-Romero, J., & Resende, O. (2024). Thermodynamic approach on water vapor sorption of Curcuma longa L. flour. LWT, 206, 116592. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2024.116592

Sirohi, R., Tarafdar, A., Singh, S., Negi, T., Gaur, V. K., Gnansounou, E., & Bharathiraja, B. (2020). Green processing and biotechnological potential of grape pomace: Current trends and opportunities for sustainable biorefinery. Bioresource Technology, 314(18), 123771.

Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Crocker, D. (2008). Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass Laboratory Analytical Procedure (LAP) Issue Date: 7/17/2005. www.nrel.gov

Sluiter, A., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., & Templeton, D. (2008). Determination of Extractives in Biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP); Issue Date 7/17/2005. http://www.nrel.gov/biomass/analytical_procedures.html

Spiess, W. E. L., & Wolf, W. (1983). The results of the COST 90 project on water activity. Physical properties of foods, 65.

Takahara, Y., Beni, Y., Sekine, Y., Nankawa, T., & Ikeda-Fukazawa, T. (2024). Structural Changes of Water in Carboxymethyl Cellulose Nanofiber Hydrogels during Vapor Swelling and Drying. ACS Omega, 9(45), 45554–45563.

Vasile, F. E., Judis, M. A., & Mazzobre, M. F. (2020). Moisture sorption properties and glass transition temperature of a non-conventional exudate gum

(Prosopis alba) from northeast Argentine. Food Research International, 131, 109033.

Velázquez-Gutiérrez, S. K., Figueira, A. C., Rodríguez-Huezo, M. E., Román-Guerrero, A., Carrillo-Navas, H., & Pérez-Alonso, C. (2015). Sorption isotherms, thermodynamic properties and glass transition temperature of mucilage extracted from chia seeds (Salvia hispanica L.). Carbohydrate Polymers, 121, 411–419.

Vlad, C. C., Păcularu-Burada, B., Vasile, A. M., Milea, Ștefania A., Bahrim, G. E., Râpeanu, G., & Stănciuc, N. (2025). Apple and grape pomace: emerging upcycled functional ingredients in processed meat products, designed to increase polyphenol and fiber contents. Sustainable Food Technology, 3(4), 861–874.

Zuffi, V., Puliga, F., Mercatante, D., Rodriguez-Estrada, M. T., Sanchez-Cortes, S., Zambonelli, A., & Francioso, O. (2025). Conversion of grape pomace into fungal biomass: a study of Pleurotus cultivation for a sustainable agro-residue management. Chemical and Biological Technologies in Agriculture 2025 12:1, 12(1), 22-. https://doi.org/10.1186/S40538-025-00739-5

4. CONCLUSÃO GERAL

A presente tese permitiu caracterizar e comparar o comportamento higroscópico de subprodutos agroindustriais de relevância tecnológica, com ênfase no bagaço de cana-de-açúcar e nos bagaços de uva das cultivares Bordô e Merlot. A abordagem integrou a caracterização química, a determinação das isotermas de adsorção e dessorção, a modelagem matemática e a avaliação de parâmetros termodinâmicos associados à interação água–sólido.

O bagaço de cana-de-açúcar apresentou composição predominantemente lignocelulósica, com 44,54 ± 1,23% de celulose, 23,21 ± 1,24% de hemicelulose e 24,60 ± 0,68% de lignina, além de 4,12 ± 0,00% de extrativos, 2,00 ± 0,17% de cinzas e 0,81 ± 0,02% de proteínas. As isotermas apresentaram comportamento sigmoidal do Tipo II, com aumento do teor de umidade de equilíbrio com a atividade de água e redução com o aumento da temperatura. O modelo GAB apresentou desempenho satisfatório, e o calor isostérico líquido aumentou com a redução do teor de umidade, evidenciando interações água–sólido mais intensas em baixos conteúdos de água.

Os bagaços de uva Bordô e Merlot também apresentaram composição lignocelulósica, porém com diferenças quantitativas entre as cultivares. O BGP apresentou maior teor de hemiceluloses e maior higroscopicidade, enquanto o MGP apresentou maiores teores de celulose, proteínas, extrativos, compostos fenólicos, antocianinas e capacidade antioxidante. O modelo GAB descreveu satisfatoriamente as isotermas de ambos os materiais, com R^2 ajustado superior a 0,9921 e RMSE igual ou inferior a 0,0084. O MGP apresentou valores mais elevados de calor isostérico líquido de sorção, indicando interações água–sólido mais fortes, apesar de apresentar menor retenção de água em comparação com o BGP.

Os resultados demonstram que o comportamento de sorção não deve ser generalizado entre diferentes subprodutos ou cultivares, uma vez que a composição química, a organização estrutural e a distribuição dos sítios de interação influenciam diretamente a disponibilidade e a retenção de água. Dessa forma, a caracterização específica de cada matriz constitui uma etapa

fundamental para a definição de condições de secagem, estabilização e armazenamento.

Em termos tecnológicos, os resultados obtidos fornecem subsídios para o planejamento de operações de processamento e conservação dos materiais estudados, contribuindo para a redução de perdas, a manutenção da estabilidade e a ampliação de estratégias de valorização. A integração entre composição química, isotermas de sorção e parâmetros termodinâmicos reforça o potencial desses subprodutos como matérias-primas para processos de maior valor agregado, em consonância com princípios de aproveitamento integral da biomassa e economia circular.