HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DA CASCA DE MARACUJÁ-AMARELO DA ENTRESSAFRA: IMPACTO DO ESTÁGIO DE MATURAÇÃO

Rodrigo Felipe Santana de Souza, Beatriz Tamiris da Silva André, Gilberto Henrique Teles, Ester Ribeiro

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil (rodrigo.rfss@ufpe.br)

Resumo: Neste trabalho o efeito da maturação na hidrólise da casca de maracujá da entressafra com Cellic CTec2 foi avaliado. A farinha sofreu autoclavação em tampão (pH 4,8). Frutos verdes mantiveram a pectina insolúvel, deixando a celulose exposta e garantindo maior eficiência. Frutos maduros sofreram gelificação da pectina, gerando barreira física às celulases. O uso do estágio verde surge como rota viável para valorizar descartes e raleios de campo, mitigando perdas agrícolas na entressafra.

Palavras-chave: hidrólise enzimática; eficiência; entressafra.

INTRODUÇÃO

O processamento agroindustrial do maracujá-amarelo gera um volume expressivo de cascas lignocelulósicas, subproduto que representa uma biomassa valiosa para a conversão biotecnológica em açúcares fermentáveis por meio da hidrólise enzimática (Infante-Neta et al., 2026). Contudo, a composição estrutural dessa matriz vegetal é fortemente influenciada por fatores sazonais. Os frutos obtidos no período da entressafra desenvolvem-se sob condições de estresse ambiental, tais como restrição hídrica e menor fotoperíodo, o que induz modificações metabólicas na planta e altera a distribuição de polissacarídeos estruturais na parede celular (Mani et al., 2024). Essas alterações sazonais somam-se às variações fisiológicas decorrentes do próprio amadurecimento dos frutos. Assim, investigar a hidrólise enzimática de biomassas oriundas da entressafra torna-se crucial para mitigar as oscilações de rendimento que desafiam a estabilidade de processos industriais ao longo do ano.

Buscando consolidar uma rota verde de biorrefinaria, este trabalho optou pelo aproveitamento integral do resíduo, sem a remoção prévia das frações de pectina e hemicelulose. O pré-tratamento consistiu unicamente na esterilização térmica da farinha em meio tampão, reduzindo custos e o uso de reagentes químicos agressivos (López-Vargas et al., 2023). Para superar a recalcitrância desta parede celular modificada pelas condições climáticas da entressafra, empregou-se o coquetel comercial Cellic CTec2. A importância deste complexo reside em sua robusta atividade celulolítica aliada a enzimas hemicelulolíticas acessórias, capazes de hidrolisar matrizes vegetais íntegras. Essa atuação permitiu a liberação e posterior detecção simultânea de glicose e xilose via cromatografia líquida de alta eficiência, utilizando dados de caracterização composicional previamente obtidos pelo grupo de pesquisa para os teores de celulose e hemicelulose da farinha, determinaram-se as eficiências das hidrólises enzimáticas. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do estágio de maturação (maduro e verde) na eficiência da hidrólise enzimática da farinha da casca do maracujá-amarelo obtido na entressafra.

MATERIAL E MÉTODOS

As hidrólises enzimáticas das farinhas das cascas de maracujá-amarelo da entressafra foram conduzidas avaliando-se os estágios de maturação verde e maduro dos frutos. Os ensaios ocorreram sob temperatura de 50 ºC e agitação de 150 rpm, em um incubador rotativo. Utilizou-se o complexo enzimático comercial Cellic CTec2 na dosagem de 15 FPU/g de farinha. Para o meio reacional, frascos de Erlenmeyer de 500 mL contendo uma massa seca de 5 g de farinha e uma fração de tampão citrato de sódio (pH 4,8) foram submetidos ao pré-tratamento térmico por autoclavação (121 ºC, 1 atm) durante 15 minutos. Após o resfriamento, adicionou-se o volume do coquetel enzimático, previamente diluído em tampão estéril, totalizando um volume reacional final de 150 mL.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente, as eficiências de hidrólise da celulose e da hemicelulose das farinhas das cascas de frutos maduros e verdes de maracujá-amarelo obtidos na entressafra.

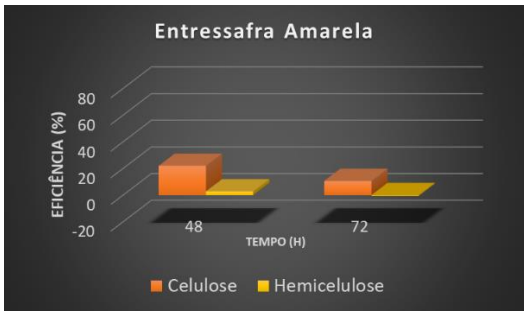


Figura 1. Eficiências das hidrólises da celulose e da hemicelulose da farinha das cascas do maracujá-amarelo obtido na entressafra (frutos maduros).

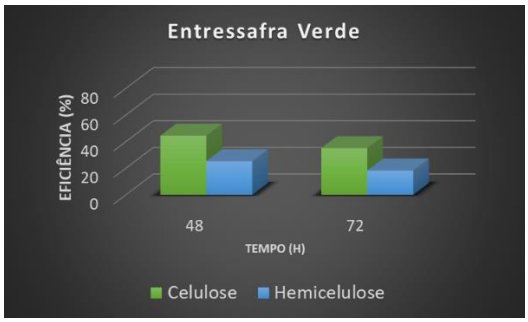


Figura 2. Eficiências das hidrólises da celulose e da hemicelulose da farinha das cascas do maracujá-amarelo obtido na entressafra (frutos maduros).

A eficiência da hidrólise enzimática da farinha da casca de maracujá amarelo (*Passiflora edulis*) obtido na entressafra apresentou um comportamento inverso ao da safra (dados do laboratório), com os frutos verdes exibindo maior susceptibilidade ao complexo Cellic CTec2 do que os frutos maduros. Esse fenômeno decorre das modificações estruturais da fração pectínica causadas pelo estádio de maturação e pelo estresse climático da entressafra, associadas ao efeito do pré-tratamento hidrotérmico, uma vez que as variações sazonais alteram sensivelmente o metabolismo e a arquitetura dos polissacarídeos da parede celular vegetal (SILVA et al., 2026).

A casca do maracujá possui elevado teor de pectina (LÓPEZ-VARGAS et al., 2014). Durante o amadurecimento na entressafra, o estresse abiótico altera a regulação das enzimas da parede celular, acelerando a solubilização natural dessas macromoléculas (ZHANG et al., 2025). Ao submeter a farinha do fruto maduro à autoclave em pH 4,8, ocorre a solubilização em massa dessa pectina que, ao resfriar, forma um gel hidrofílico de alta viscosidade (CORRÊA et al., 2015). Como o coquetel Cellic CTec2 é composto essencialmente por celulases e não possui atividade pectinásica, a malha desse gel atuou como uma barreira física por impedimento estérico (ANTONIALLI et al., 2014). Esse encapsulamento restringiu o acesso das enzimas às microfibras de celulose, deprimindo a eficiência da hidrólise no fruto maduro (SILVA et al., 2026).

Em contrapartida, nos frutos verdes, a matriz pectínica encontra-se estruturada na forma de protopectina insolúvel e rigidamente associada à parede celular (ANTONIALLI et al., 2014). Essa conformação estrutural confere maior estabilidade térmica à biomassa e limita a ocorrência de gelificação precoce durante o tratamento em autoclave (CORRÊA et al., 2015). Como consequência direta desse menor rearranjo macromolecular, a fração celulósica da casca do fruto verde permaneceu fisicamente mais exposta e disponível para os processos de adsorção e catálise das celulases (SILVA et al., 2026), justificando a maior eficiência analítica observada experimentalmente neste estádio de maturação.

CONCLUSÃO

O estágio de maturação exerce impacto direto sobre a eficiência da hidrólise enzimática da casca do maracujá-amarelo obtido na entressafra, revelando um comportamento inverso ao padrão da safra comercial. Os frutos verdes constituem a biomassa mais favorável para a obtenção de açúcares fermentáveis por meio do complexo Cellic CTec2 associado ao tratamento hidrotérmico integral. Diante disso, a valorização do subproduto no estágio verde apresenta-se como uma alternativa tecnológica promissora para o aproveitamento de resíduos provenientes do raleio, abortamento de frutos no campo ou rejeitos do mercado de mesa. Essa abordagem mitiga perdas agrícolas e expande o portfólio de matérias-primas viáveis para garantir a estabilidade operacional de biorrefinarias no período de escassez.

AGRADECIMENTOS

A presente pesquisa obteve apoio da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) com toda sua estrutura, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro. O Laboratório de Bioprocessos e Bioprodutos (Labbio-UFPE) e o Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA) ofereceram suporte técnico durante o desenvolvimento da pesquisa. Desta forma, os autores agradecem todo o suporte oferecido para o trabalho.

REFERÊNCIAS

Antonialli, L. R. et al. Optimization of extraction of high-ester pectin from passion fruit (Passiflora edulis flavicarpa) peel flour. Journal of Food Science and Technology, v. 51, n. 1, p. 112-120, 2014.

Corrêa, J. L. G. et al. Comparison of Acidic and Enzymatic Pectin Extraction from Passion Fruit Peels and Its Gel Properties. Journal of Food Process Engineering, v. 38, n. 4, p. 412-421, 2015.

Infante-Neta, A. A. et al. Waste Valorization of Passion Fruit Peel Hydrolysate for Bacterial Cellulose Production: Influence of Nitrogen Source on Yield and Functional Properties for Food Packaging. Foods, v. 15, p. 888, 2026. [1]

López-Vargas, J. H. et al. Thermal pretreatment and enzymatic saccharification of fruit by-products for biorefinery applications. Bioresource Technology Reports, v. 22, p. 101410, 2023.

Mani, S. et al. Seasonal and environmental factors altering the lignocellulosic matrix and structural carbohydrates of tropical fruits. Industrial Crops and Products, v. 210, p. 118120, 2024.

Silva, M. A. et al. Waste Valorization of Passion Fruit Peel Hydrolysate for Biomass and Carbohydrate Recovery. International Journal of Molecular Sciences, v. 27, n. 5, p. 12984, 2026.

Zhang, X. et al. The Dynamics, Degradation, and Afterlives of Pectins: Influences on Cell Wall Assembly and Structure. Annual Review of Plant Biology, v. 76, p. 85-113, 2025.