

# EXTRAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO NO PROCESSAMENTO DE LICOR DE ABACAXI

## SOLID-LIQUID EXTRACTION IN PINEAPPLE LIQUOR PROCESSING

DOI: 10.65747/conali2025v3c38

Caroline de Lima Santos<sup>1</sup>; Ercília Valverde Silva Mota<sup>1</sup>; Elayne Santos Silva<sup>1</sup>;  
Andrea Limoeiro Carvalho<sup>2</sup>; Abraão Brito Peixoto<sup>3</sup>; Taís Silva de Oliveira  
Brandão<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Estudante do Curso de Engenharia de Alimentos – DTEC – UEFS; E-mail:  
selayne95@gmail.com

<sup>2</sup>Docente/pesquisador do Depto de Eng Química/Escola Politécnica – DEQ/EPoli – UFBA.

<sup>3</sup>Docente do Depto de Tecnologia – DTEC – UEFS.

**Resumo:** O abacaxi (*Ananas comosus* L.) é uma fruta tropical com elevado potencial nutricional e bioativo, mas perdas pós-colheita significativas ocorrem devido à sua perecibilidade. Este estudo investigou a cinética da extração sólido-líquido durante a maceração alcoólica para a produção de licor de abacaxi, com foco nos efeitos do tamanho da partícula, matriz vegetal (polpa e casca) e adição de hortelã (*Mentha spicata* L.) no rendimento de sólidos solúveis totais, pH, acidez titulável e compostos fenólicos totais (CFT). Oito tratamentos foram avaliados ao longo de 180 dias utilizando maceração estática com cachaça (18% v/v de etanol). Os resultados mostraram que partículas menores aumentaram a cinética de extração, com polpa finamente cortada (PP, 32 cm<sup>2</sup>) atingindo até 970,19 mg EAG/100 g de CFT aos 30 dias, enquanto a casca grande (CG, 170 cm<sup>2</sup>) alcançou valores superiores de 1.238,97 mg EAG/100 g no mesmo período. A casca demonstrou potencial superior à polpa na extração de compostos fenólicos, com a casca pequena (CP, 13 cm<sup>2</sup>) apresentando o maior rendimento (1.300,32 mg EAG/100 g). A adição de folhas de hortelã aumentou sinergicamente o rendimento fenólico e a complexidade constitucional em ambas as matrizes. O teste de Levene confirmou a homogeneidade das variâncias entre as triplicatas ( $p > 0,05$ ), validando a precisão analítica. A modelagem matemática apresentou elevado ajuste ( $R^2 > 0,97$ ), confirmando extração controlada por difusão. A metodologia de superfície de resposta revelou o tempo ótimo entre 15 e 30 dias, com a área superficial como fator dominante. Estes dados fornecem bases para otimização de processos em escala artesanal e industrial, promovendo a valorização integral de subprodutos do abacaxi e padronização de bebidas alcoólicas ricas em bioativos.

**Palavras-chave:** *Ananas comosus*; maceração alcoólica; compostos fenólicos totais; cinética de extração; metodologia de superfície de resposta

**Abstract:** Pineapple (*Ananas comosus* L.) is a tropical fruit with high nutritional and bioactive potential, yet significant post-harvest losses occur due to its perishability. This study investigates the solid-liquid extraction kinetics during alcoholic maceration for pineapple liqueur production, focusing on the effects of particle size, plant matrix (pulp and peel), and mint (*Mentha spicata* L.) addition on the yield of total soluble solids, pH, titratable acidity, and total phenolic compounds (TPC). Eight treatments were evaluated over 180 days

using a static maceration process with sugarcane spirit (18% v/v ethanol). Results showed that smaller particle sizes enhanced extraction kinetics, with fine-cut pulp (PP, 32 cm<sup>2</sup>) reaching up to 970.19 mg GAE/100g TPC at 30 days, while large peel (CG, 170 cm<sup>2</sup>) achieved superior values of 1,238.97 mg GAE/100g in the same period. Peel demonstrated superior potential to pulp for phenolic compound extraction, with small peel (CP, 13 cm<sup>2</sup>) showing the highest yield (1,300.32 mg GAE/100g). Adding mint leaves synergistically increased phenolic yield and constitutional complexity in both matrices. Levene's test confirmed variance homogeneity among triplicates ( $p > 0.05$ ), validating analytical precision. Mathematical modeling provided an elevated fit ( $R^2 > 0.97$ ), confirming diffusion-controlled extraction. Response surface methodology revealed optimal extraction within 15–30 days, with surface area as the dominant factor. These findings provide insights for process optimization in artisanal and industrial liqueur production, supporting comprehensive valorization of pineapple by-products and standardization of bioactive-rich alcoholic beverages.

**Keywords:** *Ananas comosus*; alcoholic maceration; total phenolic compounds; extraction kinetics; response surface methodology

## INTRODUÇÃO

O abacaxi (*Ananas comosus* L.), nativo de países da América Latina, é uma das frutas tropicais mais populares. O fruto é rico em ácidos orgânicos, proteínas, fibras, minerais e vitaminas, e a sua produção se concentra em regiões de agricultura familiar. No entanto, algumas características como o alto teor de umidade e o tempo de colheita desfavorecem o consumo do abacaxi fresco, por isso, essa realidade evidencia a necessidade de adotar estratégias de aproveitamento de excedentes de produção, como forma de minimizar perdas, reduzir impactos ambientais e promover a inclusão social e econômica de pequenos produtores (1).

A utilização de técnicas adequadas de beneficiamento e do aproveitamento integral das frutas, como a produção de compotas, doces, farinhas e bebidas, representa uma alternativa eficaz no combate ao desperdício alimentar (2,3). Neste contexto, a elaboração de licores a partir de frutas excedentes ou fora do padrão de comercialização surge como uma solução tecnicamente viável, de fácil implementação e com potencial de geração de emprego e renda para agricultores familiares e agroindústrias de pequeno porte (4).

O processamento do licor é considerado simples, especialmente quando se trata de licores tradicionais. Ele se baseia essencialmente em duas etapas principais: (i) a extração sólido-líquido por imersão, na qual a fruta (fase sólida) é mantida em contato direto com o solvente hidroalcoólico, promovendo a solubilização de compostos desejáveis como açúcares, ácidos, compostos voláteis e fenólicos; e (ii) a adição de xarope ao extrato obtido, formando assim o licor final (5). Várias condições operacionais afetam diretamente a eficiência desse processo, incluindo a espécie vegetal, o grau de maturação da fruta, o tamanho das partículas da matéria-prima, o tipo e a concentração do solvente, o tempo ótimo de maceração e as condições de armazenamento (2,6).

Segundo Jesus Filho *et al.* (5), a etapa de extração é decisiva para a definição da qualidade final do produto, pois interfere diretamente na intensidade do aroma, cor, sabor e teor de compostos bioativos presentes no licor. O estudo da cinética de extração e da padronização dos parâmetros tecnológicos é, portanto, essencial para garantir um produto final com características físico-químicas e sensoriais estáveis e agradáveis ao consumidor. A padronização do processo contribui ainda para a viabilidade econômica da produção em escala artesanal ou industrial, além de facilitar o controle de qualidade e a adequação às exigências legais e de mercado.

Esta etapa do processo ocorre por extração sólido-líquido, uma operação unitária amplamente empregada na indústria alimentícia para a obtenção de compostos bioativos ou a remoção de substâncias indesejáveis de matrizes vegetais, como no processamento de licor de abacaxi. Esse processo envolve etapas como a penetração do solvente na matriz sólida, dissolução do soluto e difusão para o meio líquido, sendo a etapa mais lenta, normalmente a difusão interna, a limitante da taxa de extração. Nessa etapa, muitas vezes a taxa de extração se torna menor porque as paredes celulares são resistentes à difusão, e, para resolver isso, é recomendado reduzir a amostra em partículas menores aumentando a superfície de contato, pois, assim, durante a extração o solvente percorre distâncias mais curtas e chega a um maior número de células (5,7).

A eficiência deste processo depende de variáveis como o tipo de solvente, temperatura, agitação, umidade do sólido e tamanho das partículas. A transferência de massa pode ser descrita pela Lei de Fick, e seu desempenho é afetado pela porosidade e tortuosidade da matriz, expressas pelo coeficiente de difusão efetivo ( $D_{eff}$ ). No caso do licor de abacaxi, a extração adequada é fundamental para garantir o rendimento e as características sensoriais do produto final, sendo essencial o controle rigoroso das condições de operação e das propriedades físico-químicas da matéria-prima (5,7).|

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo estudar a extração sólido-líquido de compostos do abacaxi durante o processamento de licor, avaliando os efeitos do tamanho da partícula da fruta sobre a eficiência do processo e a qualidade do extrato obtido.

## MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido conforme metodologia experimental apresentada na Figura 1.

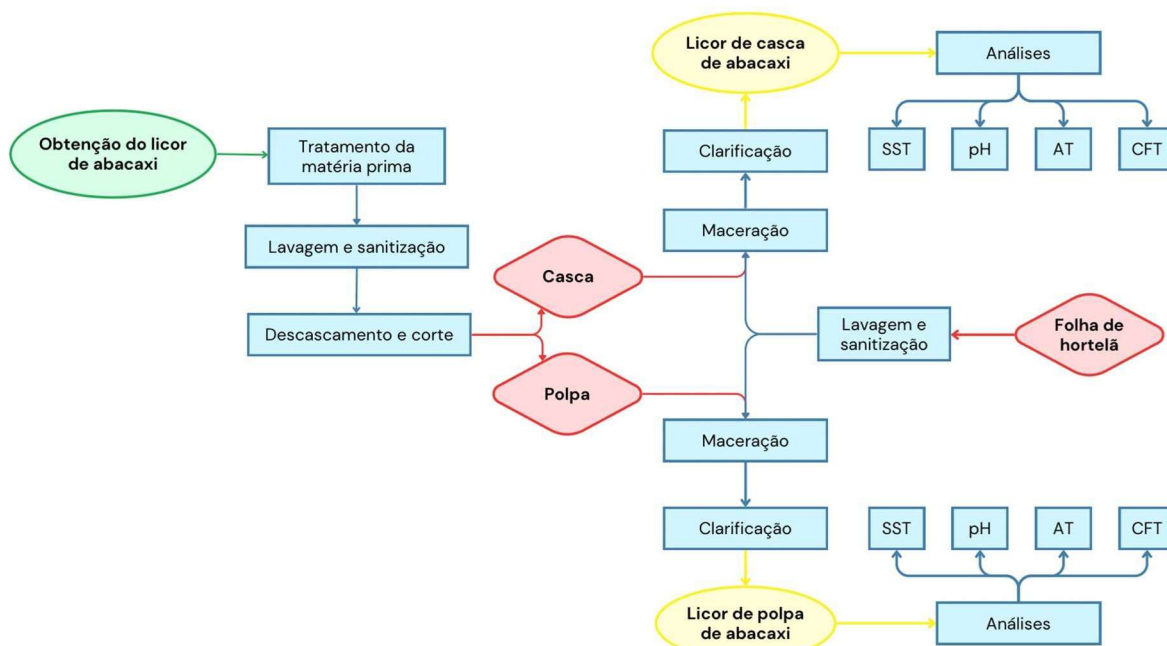


Figura 1 – Fluxograma da metodologia experimental

### *Matéria-prima e preparo*

Frutos maduros e íntegros de abacaxi (*Ananas comosus* L.), e folhas de hortelã foram adquiridos em feiras livres na cidade de Feira de Santana, BA (12°15'20.912"S 38°57'41.123"O). Após seleção, os frutos e as folhas foram lavados por aspersão com água corrente e sanitizados por imersão em solução de hipoclorito de sódio a 150 ppm, por 10

minutos, sendo posteriormente escorridos. Os abacaxis foram descascados manualmente com facas de aço inoxidável higienizadas e cortados conforme os tratamentos propostos, utilizando polpa ou casca com diferentes dimensões:

- Polpa Grande (PG): 91 cm<sup>2</sup>
- Polpa Pequena (PP): 32 cm<sup>2</sup>
- Casca Grande (CG): 170 cm<sup>2</sup>
- Casca Pequena (CP): 13 cm<sup>2</sup>

### ***Extração por maceração alcoólica***

A extração sólido-líquido foi realizada por maceração estática direta, com infusão em etanol por 180 dias. Foram utilizados 750 g de matéria-prima para cada 500 mL de cachaça (18% v/v), com base na metodologia de Teixeira *et al.* (8). Foram avaliados oito tratamentos (Quadro 1), com e sem adição de folhas frescas de hortelã:

Quadro 1 – Tratamentos

<b>Tratamento</b>	<b>Descrição</b>
PG SH	Polpa grande, sem hortelã
PG CH	Polpa grande, com hortelã
PP SH	Polpa pequena, sem hortelã
PP CH	Polpa pequena, com hortelã
CG SH	Casca grande, sem hortelã
CG CH	Casca grande, com hortelã
CP SH	Casca pequena, sem hortelã
CP CH	Casca pequena, com hortelã

### ***Análises físico-químicas***

Após o período de maceração, os extratos foram analisados quanto aos seguintes parâmetros: Sólidos solúveis totais (°Brix) medidos em refratômetro digital (Reichert, AR200), pH determinado com pHmetro digital (Nova Instruments, NI PHM), e Acidez titulável titulada com NaOH 0,1 N, utilizando fenolftaleína como indicador, e os resultados foram expressos em g de ácido cítrico por 100 mL conforme metodologia descrita em IAL - Instituto Adolfo Lutz (9). Compostos fenólicos totais foram determinados pelo método de Folin-Ciocalteu (10), com leitura da absorbância a 760 nm. Os resultados foram expressos em mg de equivalentes de ácido gálico por 100 g de amostra (mg·EAG·100 g<sup>-1</sup>), utilizando curva padrão de ácido gálico (11).

### ***Análise Estatística***

Os dados experimentais foram submetidos à análise estatística para avaliar a significância dos fatores estudados. Para verificar a homogeneidade das variâncias entre as triplicatas de cada condição experimental, foi aplicado o Teste de Levene, amplamente utilizado para verificar a suposição de igualdade de variâncias, pré-requisito para diversos testes paramétricos, como a Análise de Variância (ANOVA). O Teste de Levene é robusto a desvios da normalidade e é preferível ao teste de Bartlett quando a distribuição dos dados não é normal (12,13). A hipótese nula (H<sub>0</sub>) define que as variâncias dos grupos são iguais, enquanto a hipótese alternativa (H<sub>1</sub>) define que pelo menos uma variância é diferente. Um valor de p > 0,05 indica que não há evidências suficientes para rejeitar H<sub>0</sub>, ou seja, as variâncias podem ser consideradas homogêneas. As análises foram realizadas utilizando o software Python com a biblioteca SciPy.

## ***Modelagem Matemática***

O tratamento dos dados foi realizado com uso do Software Cadmo, estruturado em Matlab 2016a, cuja significância foi  $p \leq 0,05$ , seguindo a proposta de Bispo et al. (14).

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### ***A estatística de Levene***

Os resultados do Teste de Levene, apresentados na Tabela 1, são importantes para validar a consistência dos dados experimentais obtidos para a extração de compostos fenólicos. Para todos os oito tratamentos avaliados (polpa grande/pequena, com/sem hortelã; casca grande/pequena, com/sem hortelã), os valores de  $p$  foram significativamente superiores a 0,05 (nível de significância adotado de 5%).

Tabela 1 - Valores calculados para o Teste de Levene, relativo à análise de variância para a concentração de fenólicos, obtida em triplicata.

<b>Tratamento</b>	<b>Estatística de Levene</b>	<b>Valor p</b>	<b>Homogeneidade de Variâncias (<math>p &gt; 0,05</math>)</b>
PGSH	0,0151	0,9850	Sim
PGCH	0,0287	0,9718	Sim
PPSH	0,3316	0,7210	Sim
PPCH	0,0258	0,9745	Sim
CGSH	0,0044	0,9956	Sim
CGCH	0,0089	0,9911	Sim
CPSH	0,0411	0,9598	Sim
CPCH	0,1916	0,8269	Sim

Os valores de  $p$  variaram de 0,7210 (PP SH) a 0,9956 (CG SH). Estes resultados indicam que não há evidências estatísticas para rejeitar a hipótese nula de que as variâncias entre as triplicatas são homogêneas para cada condição experimental. Portanto, a dispersão dos dados dentro de cada conjunto de triplicatas é estatisticamente similar, confirmando a baixa variabilidade e a alta precisão das medições realizadas.

A homogeneidade das variâncias é um pressuposto fundamental para a aplicação de testes estatísticos paramétricos, como a Análise de Variância (ANOVA), que podem ser utilizados para comparar as médias dos diferentes tratamentos. A confirmação da homogeneidade das variâncias pelo Teste de Levene reforça a confiabilidade dos dados e a validade das conclusões tiradas a partir das análises subsequentes, garantindo que as diferenças observadas entre os tratamentos são atribuíveis aos fatores experimentais (tipo de matriz, tamanho da partícula, presença de hortelã) e não a uma variabilidade intrínseca e inconsistente das medições.

### ***Varição dos sólidos solúveis totais (°Brix)***

Durante os 180 dias de infusão alcoólica, observou-se um aumento gradual no teor de sólidos solúveis (°Brix) nos extratos obtidos de todas as combinações de matéria-prima (polpa e casca) e tratamentos. Esse aumento indica a transferência eficiente de açúcares e solutos da fruta para o meio hidroalcoólico. Os tratamentos com cortes menores (PP e CP) apresentaram valores mais elevados de °Brix em menor tempo (Figura 2), o que confirma a influência positiva da redução do tamanho de partícula na taxa de difusão dos solutos, conforme observado também por Simões *et al.* (2). Ao final do período, os valores tenderam à estabilização, sugerindo o equilíbrio da extração.

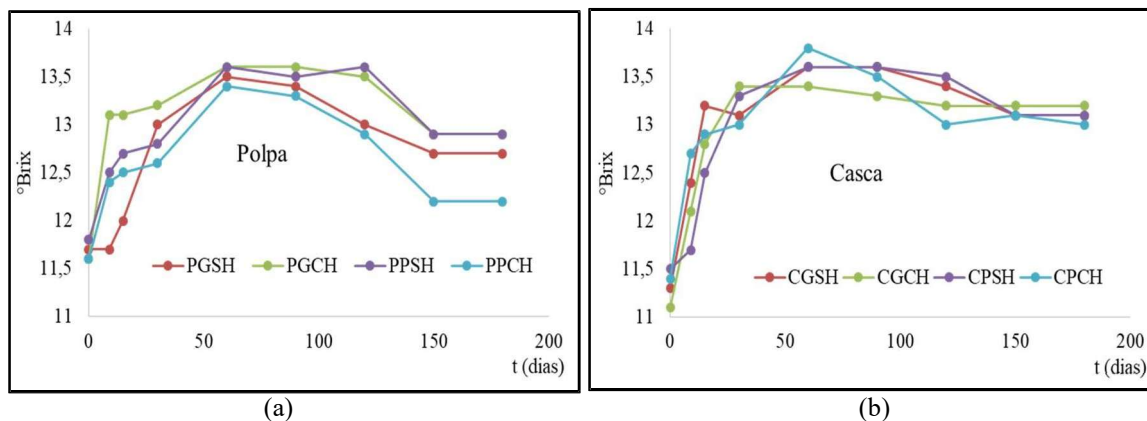


Figura 2 - Variação da concentração de sólidos solúveis (°Brix) durante a extração de fenólicos para: (a) polpa e (b) casca.

### Comportamento do pH nos diferentes tratamentos

O pH dos extratos manteve-se relativamente estável durante todo o processo, apresentando apenas pequenas variações entre os diferentes tratamentos. Inicialmente, os valores oscilaram entre 4,3 e 4,5, mantendo-se próximos a essa faixa até o término dos 180 dias de armazenamento. Comportamento semelhante foi descrito por Simões *et al.* (2) durante a maceração, em que a variação do pH foi atribuída à extração sólido-líquido de ácidos orgânicos naturalmente presentes na amostra. A manutenção do pH em uma faixa levemente ácida contribui para a estabilidade microbiológica do produto final, efeito associado à presença de compostos como os ácidos cítrico, málico e ascórbico, característicos do abacaxi. Esses resultados corroboram as observações de Jesus Filho *et al.* (5), que também relataram discretas alterações no pH ao longo da maceração alcoólica de frutas.

### Teor de compostos fenólicos (absorbância média)

Os compostos fenólicos extraídos foram avaliados e suas cinéticas de extração são apresentadas nas Figuras 3 e 4. A Figura 3 exibe os dados experimentais brutos, enquanto a Figura 4 mostra os dados ajustados pelo modelo. Ambas as figuras permitem uma análise comparativa aprofundada entre a polpa e a casca, com e sem hortelã, e em diferentes tamanhos de partícula.

Observa-se em ambas as Figuras a cinética bifásica típica da extração sólido-líquido: uma fase inicial rápida, impulsionada por um alto gradiente de concentração e pela solubilização de compostos superficiais, seguida por uma fase mais lenta, controlada pela difusão interna dos solutos através da matriz vegetal (15).

Os dados revelam que a casca do abacaxi possui um potencial significativamente maior para a extração de compostos fenólicos em comparação com a polpa. A polpa finamente cortada (PP, 32 cm<sup>2</sup>) sem hortelã (Figuras 3a e 4a) atingiu um pico de 970,19 mg EAG/100 g aos 30 dias. Em contraste, a casca grande (CG, 170 cm<sup>2</sup>) sem hortelã (Figuras 3c e 4c) alcançou 1.045,51 mg EAG/100 g no mesmo período, e a casca pequena (CP, 13 cm<sup>2</sup>) sem hortelã apresentou o maior rendimento, com 1.300,32 mg EAG/100 g. Estes dados ganham relevância ao passo que a casca é frequentemente descartada como resíduo agroindustrial, e seu reaproveitamento pode resultar em vantagens econômicas e ambientais ao processo (16). A maior concentração de fenólicos na casca pode ser atribuída à sua função protetora na planta, acumulando compostos secundários para defesa contra estresses ambientais (17).

Em ambos os casos (polpa e casca), a redução do tamanho da partícula (aumento da área superficial) resultou em maior eficiência de extração. Para a polpa, a PP (32 cm<sup>2</sup>) superou a PG (91 cm<sup>2</sup>). Para a casca, a CP (13 cm<sup>2</sup>) superou a CG (170 cm<sup>2</sup>). Este resultado está em total conformidade com a Lei de Fick de difusão, que estabelece que a taxa de transferência de massa é diretamente proporcional à área de contato entre o sólido e o solvente (18). Partículas menores expõem uma maior área superficial para o solvente, encurtam o caminho de difusão dos solutos e facilitam a liberação dos compostos fenólicos da matriz celular (19, 20).

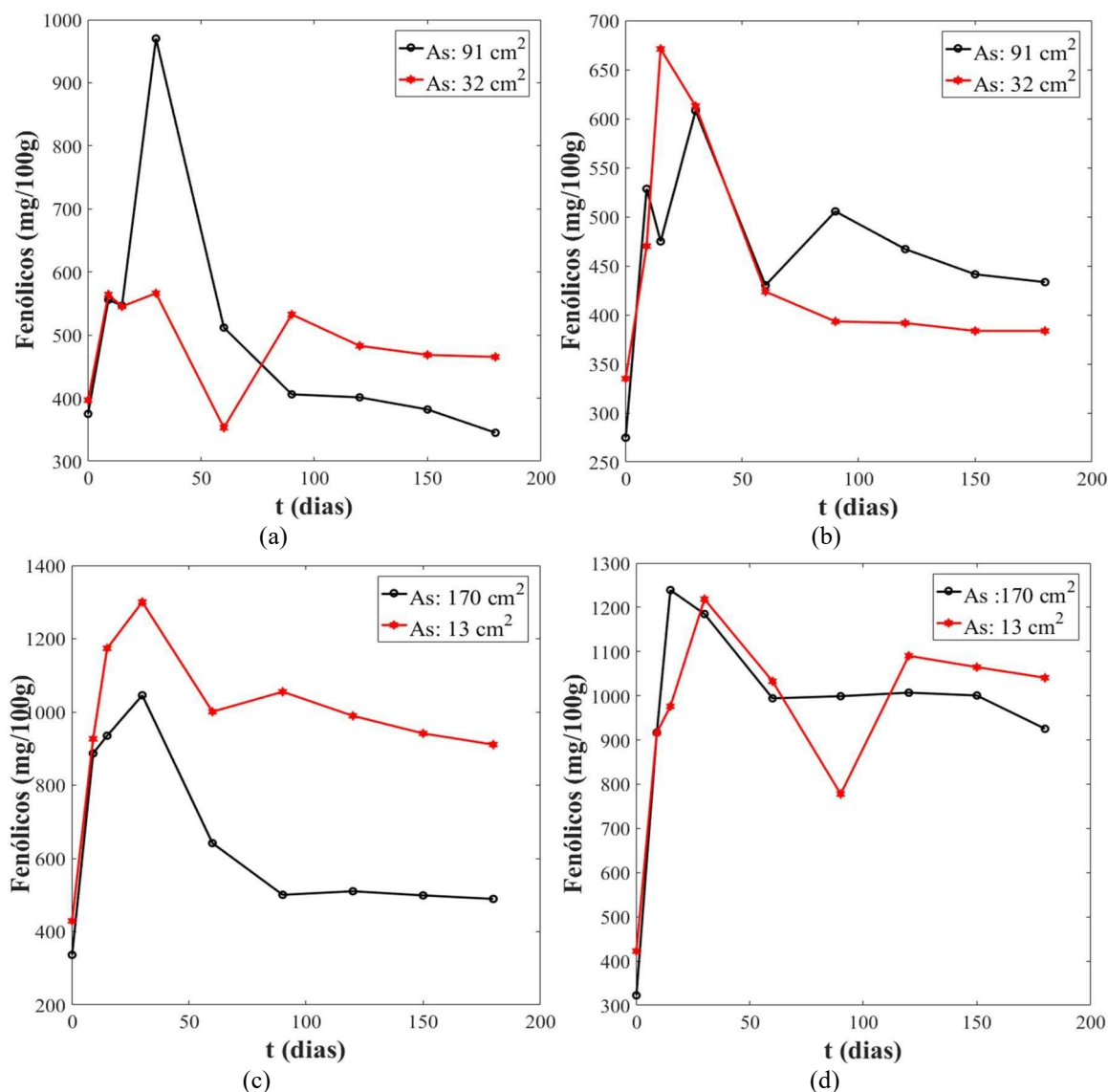


Figura 3 – Dados experimentais obtidos para os fenólicos extraídos da: (a) polpa sem hortelã; (b) polpa com hortelã; (c) casca sem hortelã; e (d) casca com hortelã

A adição de hortelã (*Mentha spicata* L.) demonstrou um efeito sinérgico na extração e, principalmente, na estabilidade dos compostos fenólicos. Nos tratamentos com hortelã (CH) (Figuras 3b, 3d, 4b e 4d), embora o pico de extração possa ser ligeiramente menor em alguns casos (e.g., PG CH vs. PG SH), a degradação pós-pico dos fenólicos é visivelmente atenuada, e as concentrações se mantêm mais elevadas por períodos prolongados. Isso sugere que os compostos antioxidantes presentes na hortelã, como ácidos fenólicos e flavonoides, atuam como agentes protetores, inibindo a oxidação e a degradação enzimática dos fenólicos

do abacaxi (21,22). Este efeito é importante para a manutenção da qualidade e bioatividade do licor ao longo do tempo de armazenamento.

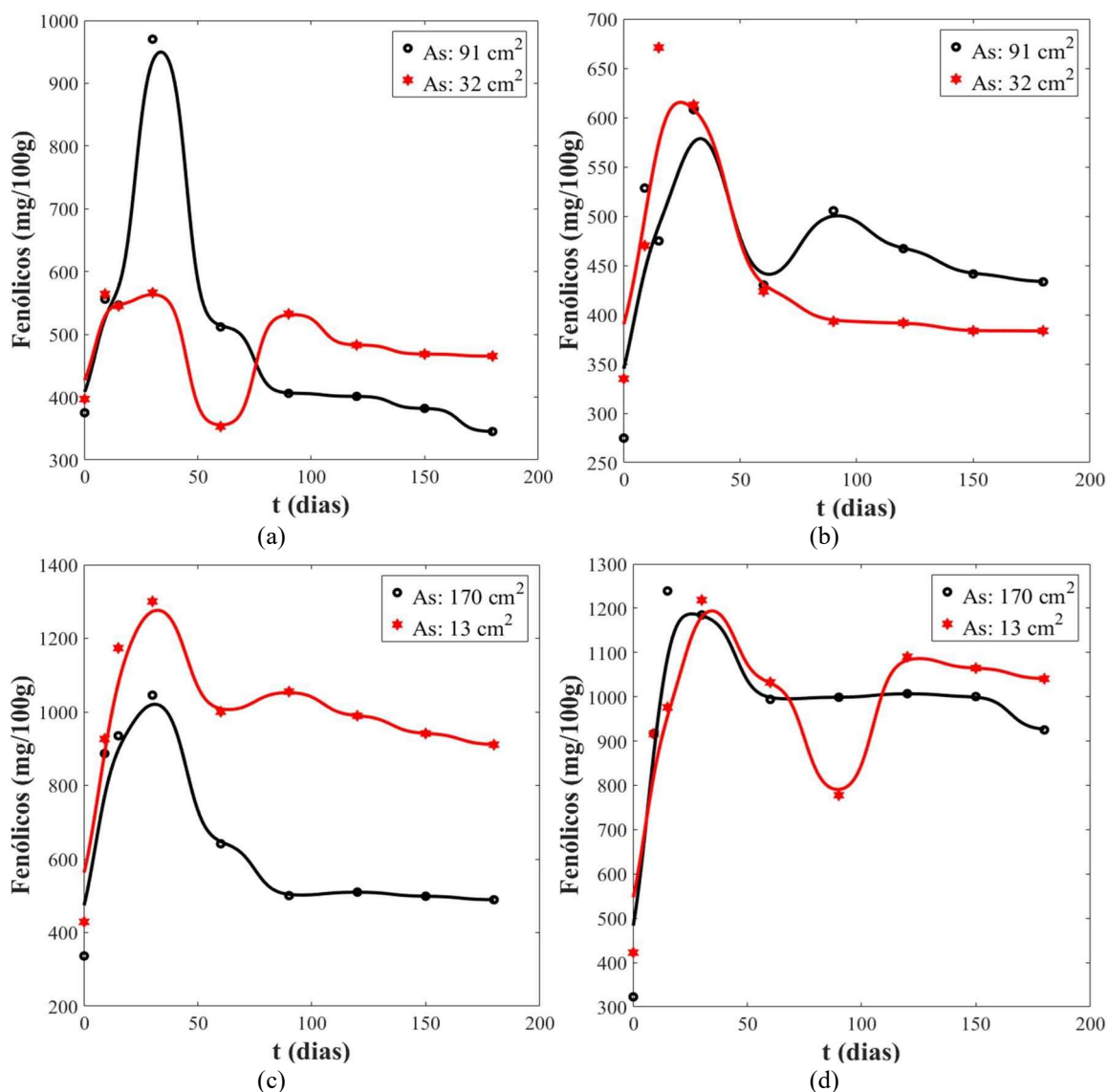


Figura 4 – Dados experimentais ajustados pelo modelo, obtidos para os fenólicos extraídos de: (a) polpa sem hortelã; (b) polpa com hortelã; (c) casca sem hortelã; e (d) casca com hortelã.

A Figura 5 apresenta os resíduos dos modelos ajustados para a polpa e a casca, com e sem hortelã. A análise de resíduos é fundamental para avaliar a adequação do modelo matemático aos dados experimentais.

Um bom ajuste é caracterizado por resíduos distribuídos aleatoriamente em torno de zero, sem padrões visíveis (e.g., forma de funil, curva). A ausência de padrões indica que o modelo capturou a maior parte da variabilidade dos dados e que não há vícios sistemáticos (23). A análise visual das Figuras dos resíduos sugere um ajuste razoável para a maioria dos tratamentos, embora em alguns casos (especialmente para a casca), possa haver alguma tendência, indicando a necessidade de refinar o modelo ou considerar variáveis adicionais. A baixa dispersão entre as triplicatas, confirmada pelo Teste de Levene, reforça a confiabilidade dos dados experimentais utilizados para o ajuste do modelo.

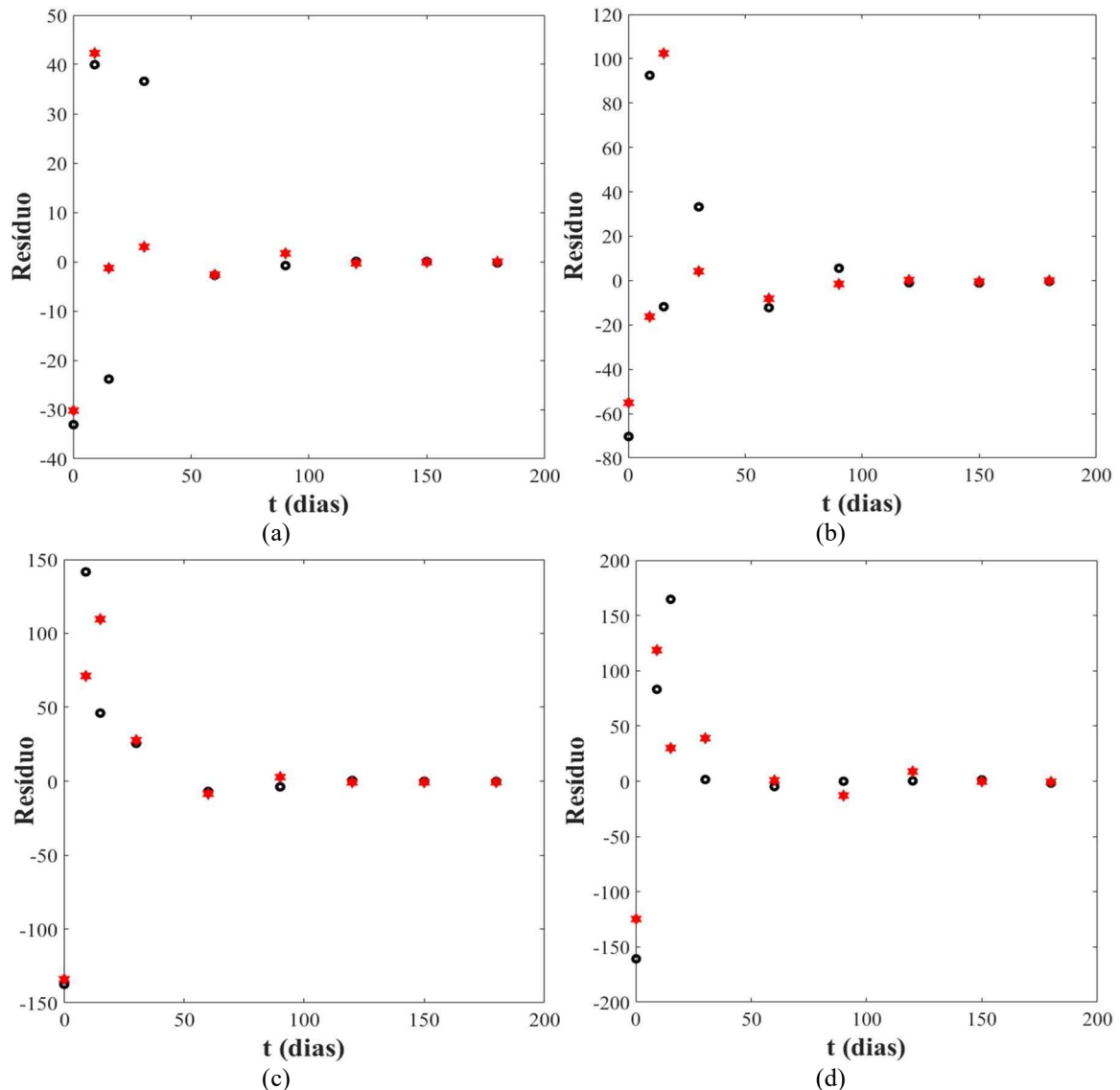


Figura 5 – Resíduos dos modelos utilizados para o ajuste, obtidos para os fenólicos extraídos de: (a) polpa sem hortelã; (b) polpa com hortelã; (c) casca sem hortelã; e (d) casca com hortelã.

As Figuras 6 (superfícies de resposta) e 7 (curvas de contorno) fornecem uma visão multidimensional da relação entre a concentração de fenólicos, o tempo de extração e a área superficial.

As superfícies de resposta mostram os picos de extração e as regiões de degradação, enquanto os contornos são projeções bidimensionais que permitem identificar as combinações de tempo e área superficial que resultam em concentrações específicas de fenólicos. Essas ferramentas são importantes no contexto da otimização do processo, permitindo a identificação de condições ideais para maximizar o rendimento de fenólicos (24).

As superfícies de resposta para a casca (Figuras 6c e 6d) demonstram picos de concentração de fenólicos significativamente mais elevados e, em alguns casos, uma maior estabilidade em comparação com a polpa (Figuras 6a e 6b). Isso reforça o potencial da casca como fonte rica em compostos bioativos. A análise dessas superfícies permite visualizar as interações complexas entre o tempo de maceração e a área superficial, e como essas interações afetam o rendimento de fenólicos em cada matriz.

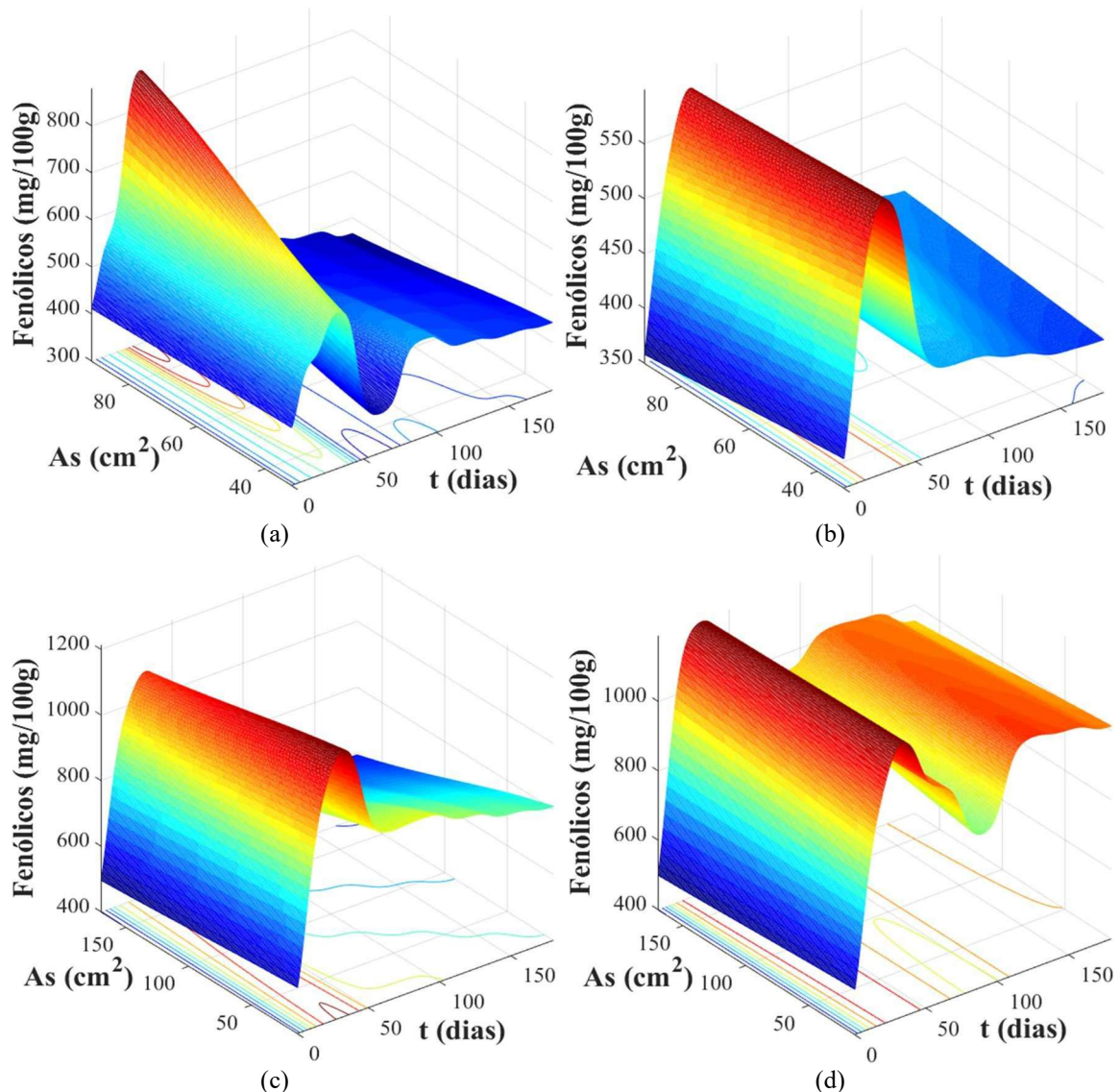


Figura 6 - Superfícies de resposta para os dados experimentais ajustados pelo modelo obtidos para os fenólicos extraídos de: (a) polpa sem hortelã; (b) polpa com hortelã; (c) casca sem hortelã; e (d) casca com hortelã.

Para a polpa, as superfícies de resposta e as curvas de contorno indicam que a concentração de fenólicos atinge um pico em tempos intermediários (aproximadamente entre 15 e 30 dias) e com áreas superficiais menores (correspondentes a partículas menores). Para a polpa sem hortelã (Figuras 6a e 7a), o pico de extração para a polpa pequena (32 cm<sup>2</sup>) foi de aproximadamente 970 mg EAG/100 g aos 30 dias. A polpa grande (91 cm<sup>2</sup>) apresentou valores de pico inferiores, confirmando que a redução da área superficial é um fator limitante. As curvas de contorno para a polpa (Figuras 7a e 7b) mostram regiões de alta concentração de fenólicos que se concentram em torno desses tempos e áreas superficiais, com declínios acentuados após o pico, indicando degradação ou saturação.

Em contraste, as Figuras para a casca revelam um potencial de extração significativamente maior. A casca pequena (13 cm<sup>2</sup>) sem hortelã (Figuras 6c e 7c) atingiu concentrações de fenólicos que superam 1.300 mg EAG/100 g, um valor notavelmente superior ao da polpa. Mesmo a casca grande (170 cm<sup>2</sup>) sem hortelã alcançou valores próximos de 1.045 mg EAG/100 g, superando o pico da polpa pequena. As superfícies de resposta para a casca são mais elevadas e as curvas de contorno mostram concentrações semelhantes que se estendem para valores mais altos, indicando uma maior capacidade de

liberação de fenólicos e, em alguns casos, uma maior estabilidade em tempos prolongados, especialmente com a adição de hortelã. A presença de hortelã (Figuras 7b e 7d), em ambos os casos (polpa e casca), tende a alargar as regiões de alta concentração nas curvas de contorno, sugerindo um efeito protetor contra a degradação dos fenólicos, permitindo que concentrações elevadas sejam mantidas por mais tempo.

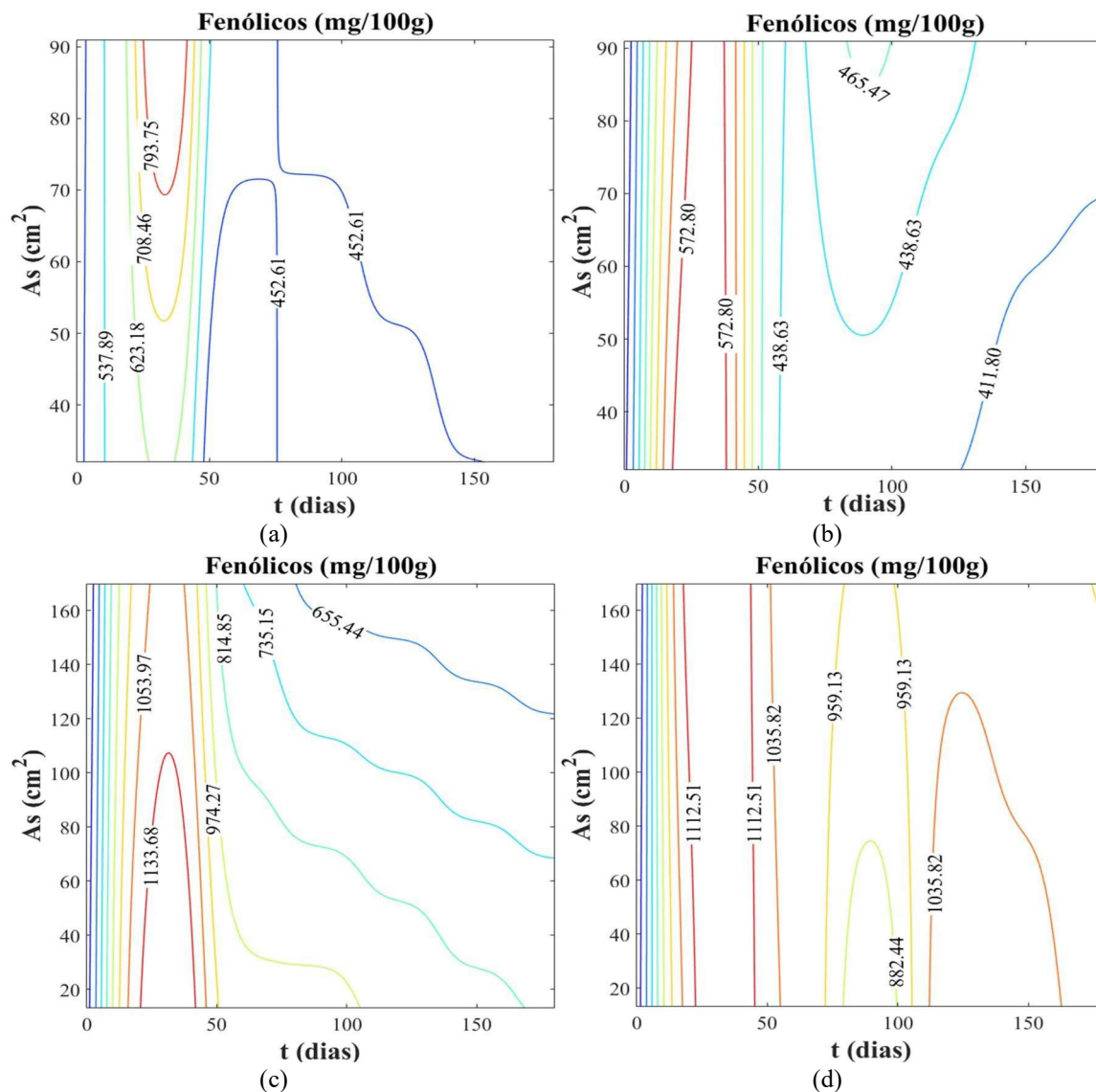


Figura 7 - Curvas de contorno para os dados experimentais ajustados pelo modelo obtidos para os fenólicos extraídos de: (a) polpa sem hortelã; (b) polpa com hortelã; (c) casca sem hortelã; e (d) casca com hortelã.

As Figuras 8 e 9 (produtividade) e 10 e 11 (produtividade relativa à variação de área superficial) fornecem inferências sobre a eficiência do processo de extração em termos de quantidade de fenólicos extraídos por unidade de tempo e por unidade de área superficial. A produtividade é um parâmetro fundamental para a otimização de processos em escala industrial, pois relaciona o rendimento com o tempo de processo (25).

As superfícies e contornos de produtividade (Figuras 8 e 9) confirmam que a casca, especialmente a casca pequena, apresenta maior produtividade na extração de fenólicos. Isso significa que, além de um maior rendimento total, a casca permite uma extração mais rápida e eficiente dos compostos bioativos. Este dado é fundamental para a viabilidade econômica da utilização da casca em larga escala.

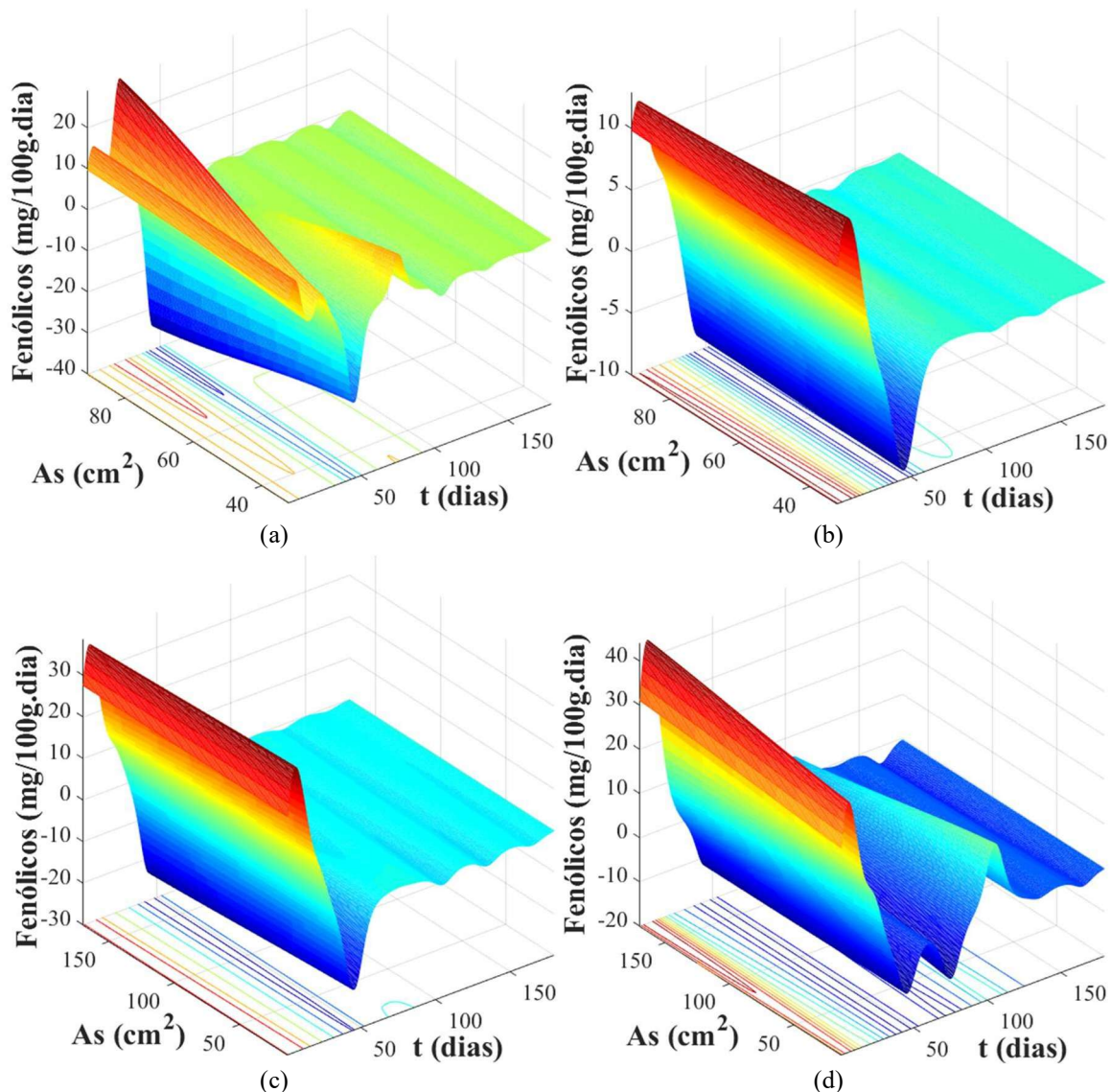


Figura 8 - Superfícies de resposta da produtividade obtida para os fenólicos extraídos de: (a) polpa sem hortelã; (b) polpa com hortelã; (c) casca sem hortelã; e (d) casca com hortelã.

Para a polpa (Figuras 8a e 8b), as superfícies de produtividade mostram que os maiores valores são alcançados em tempos iniciais e intermediários, e com partículas menores (maior área superficial). Embora os valores exatos de produtividade não estejam explicitamente rotulados em todas as superfícies, as regiões de pico indicam que a polpa pequena (32 cm<sup>2</sup>) sem hortelã, por exemplo, atinge sua máxima produtividade em torno de 15 a 30 dias. Após esse período, a produtividade tende a diminuir, refletindo a desaceleração da extração e, posteriormente, a degradação dos compostos fenólicos. As curvas de contorno da polpa (Figuras 9a e 9b) ilustram as combinações de tempo e área superficial que resultam em níveis específicos de produtividade, com as regiões mais densas indicando maior eficiência.

Em uma comparação direta, as Figuras 8c e 8d, de produtividade para a casca, demonstram um desempenho superior em relação à polpa. A casca, especialmente a casca pequena (13 cm<sup>2</sup>), exibe superfícies de produtividade mais elevadas e mais amplas, indicando que não apenas uma maior quantidade de fenólicos é extraída, mas também que essa extração ocorre de forma mais rápida e eficiente. A casca pequena sem hortelã (Figuras 8c e 9c) pode apresentar picos de produtividade que superam significativamente os da polpa sem hortelã (Figuras 8a e 9a), atingindo e mantendo altas taxas de extração por períodos

mais prolongados. As curvas de contorno para a casca (Figuras 9c e 9d) mostram concentrações semelhantes de produtividade que se estendem para valores mais altos, confirmando a maior eficiência da casca como matriz de extração.

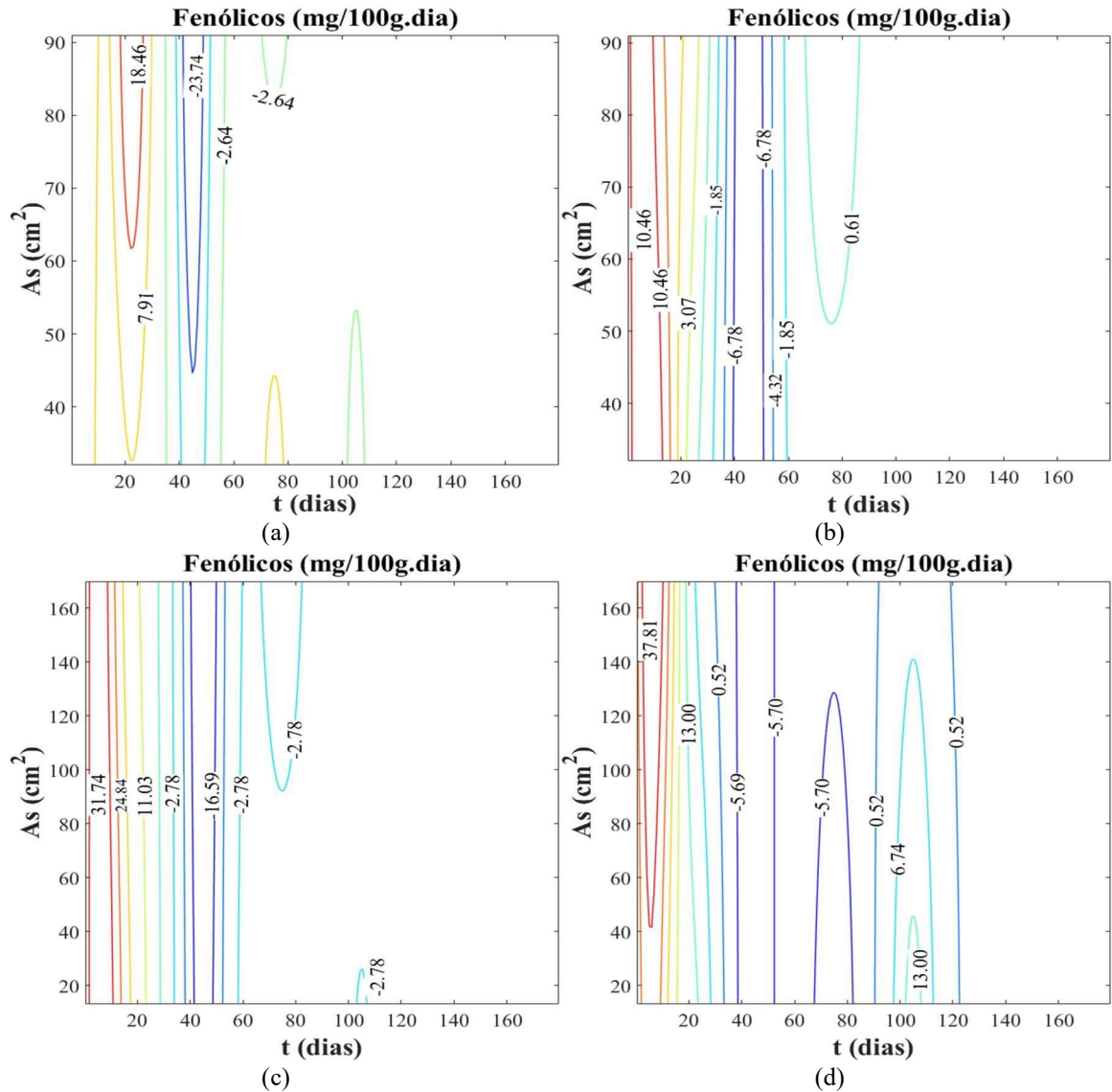


Figura 9 - Curvas de contorno da produtividade obtidas para os fenólicos extraídos de: (a) polpa sem hortelã; (b) polpa com hortelã; (c) casca sem hortelã; e (d) casca com hortelã.

As Figuras 10 e 11, que mostram a produtividade relativa à variação de área superficial, são particularmente importantes para entender a contribuição de cada unidade de área superficial para a extração de fenólicos. Essas Figuras podem revelar se há um ponto de saturação ou se a eficiência da extração por área superficial diminui após um certo ponto. A análise dessas curvas permite otimizar não apenas o tamanho da partícula, mas também a quantidade de matéria-prima utilizada para maximizar a extração de fenólicos

(20).

Para a polpa, as superfícies e curvas de contorno da produtividade relativa à área superficial (Figuras 10a, 10b, 11a e 11b) demonstram que a eficiência por unidade de área é maior em tempos iniciais e com partículas menores (maior área superficial específica). Embora os valores numéricos exatos da produtividade relativa não estejam explicitamente rotulados nas superfícies, as regiões de pico indicam que a polpa pequena (32 cm<sup>2</sup>) sem hortelã, por exemplo, apresenta uma maior contribuição por cm<sup>2</sup> de área superficial nos

primeiros 15 a 30 dias. Após esse período, a eficiência por área superficial tende a diminuir, sugerindo que a saturação do solvente ou a degradação dos compostos fenólicos começa a impactar a taxa de extração por unidade de área. As curvas de contorno da polpa mostram as combinações de tempo e área superficial que otimizam a produtividade relativa, com as regiões mais concentradas indicando a máxima eficiência.

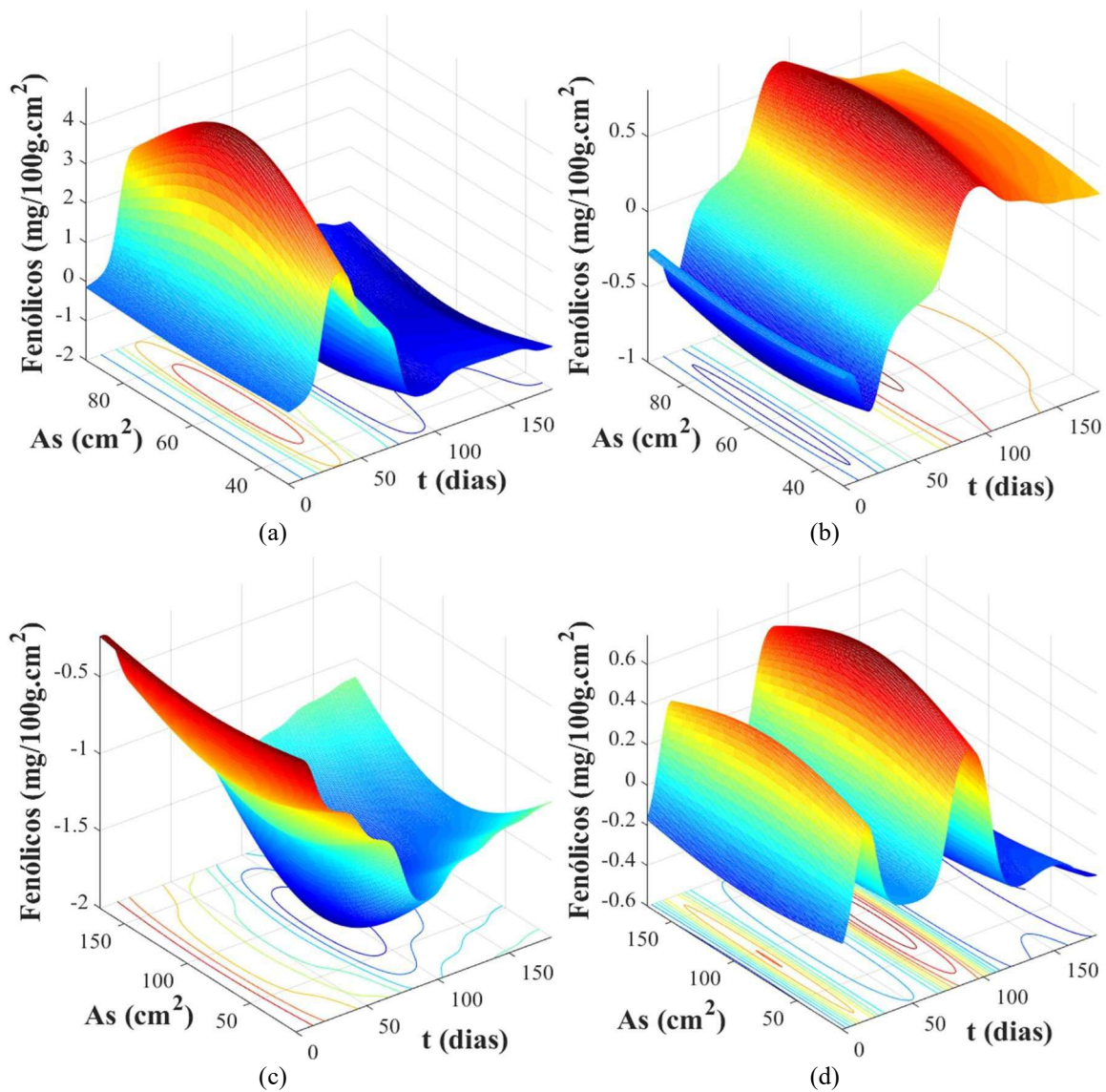


Figura 10 - Superfícies de resposta da produtividade relativa à variação de área superficial obtida para os fenólicos extraídos de: (a) polpa sem hortelã; (b) polpa com hortelã; (c) casca sem hortelã; e (d) casca com hortelã.

Em comparação com a polpa, as Figuras 10c, 10d, 11c e 11d, para a casca, revelam uma produtividade relativa à área superficial significativamente superior. A casca pequena (13 cm<sup>2</sup>) exibe as maiores eficiências por unidade de área, indicando que cada centímetro quadrado de sua superfície contribui de forma mais expressiva para a extração de fenólicos. Isso é particularmente notável, pois a casca pequena tem a menor área superficial total, mas a maior eficiência relativa. Mesmo a casca grande (170 cm<sup>2</sup>) demonstra uma produtividade relativa por área superficial competitiva ou superior à da polpa, reforçando o seu potencial como fonte de fenólicos. As superfícies de resposta para a casca são mais elevadas e as curvas de contorno mostram isoconcentrações de produtividade relativa que se estendem

para valores mais altos, indicando uma maior capacidade de liberação de fenólicos por unidade de área e, em alguns casos, uma maior estabilidade em tempos prolongados.

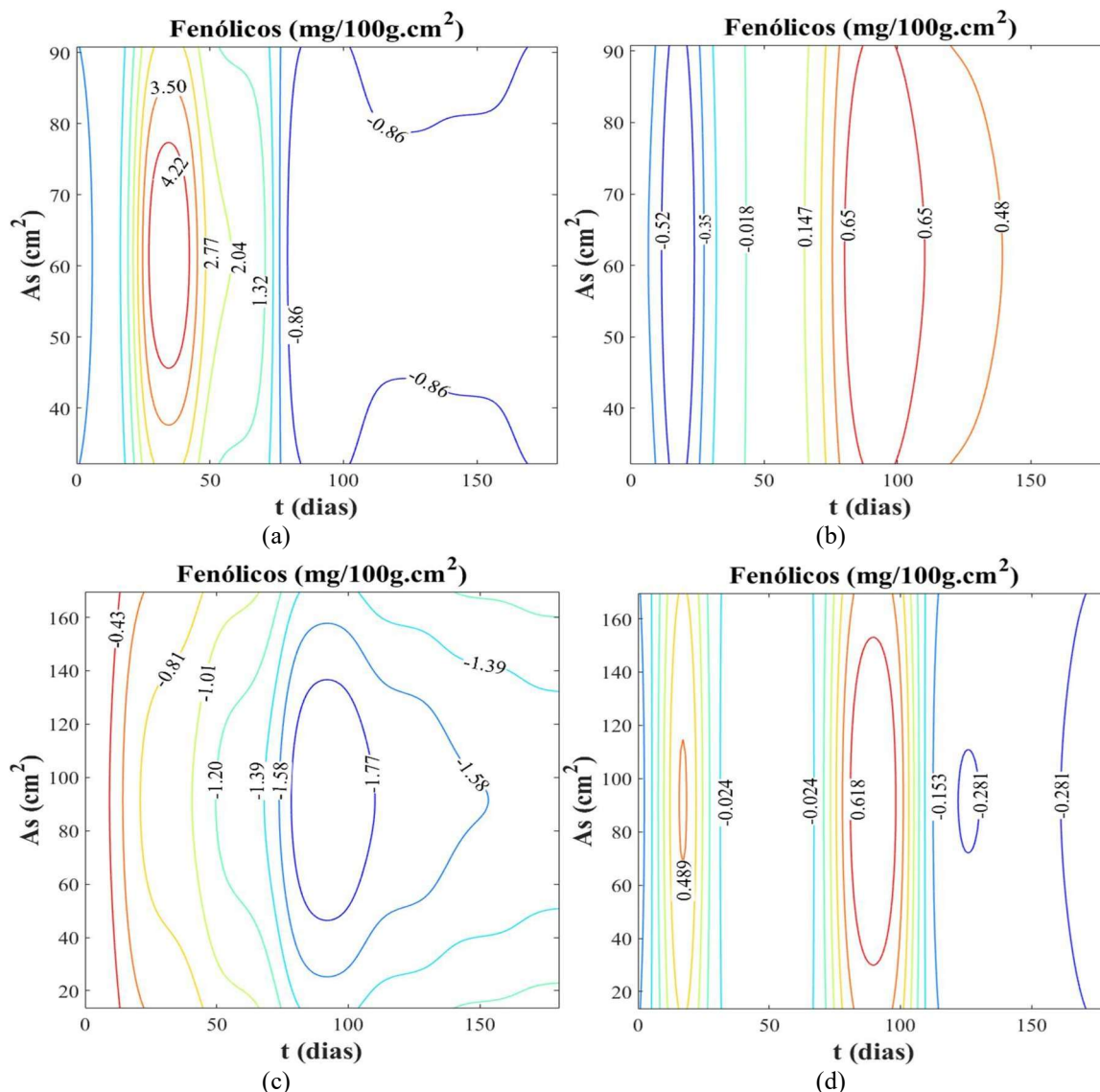


Figura 11 - Curvas de contorno da produtividade relativa à variação de área superficial obtida para os fenólicos extraídos da: (a) polpa sem hortelã; (b) polpa com hortelã; (c) casca sem hortelã; e (d) casca com hortelã.

Os resultados deste estudo têm implicações tecnológicas significativas para a indústria de alimentos e bebidas. A otimização da extração de fenólicos do abacaxi, incluindo a valorização da casca, um subproduto abundante da indústria de processamento de frutas, contribui para a redução de resíduos agroindustriais e para o desenvolvimento de produtos com maior valor agregado. A incorporação de hortelã como um agente estabilizador natural representa uma estratégia inovadora para aumentar a vida útil e a qualidade nutricional de bebidas funcionais.

Do ponto de vista científico, este trabalho aprofunda o conhecimento sobre a cinética de extração de fenólicos em sistemas complexos, considerando a interação entre o tamanho da partícula e a presença de uma segunda matriz vegetal com propriedades antioxidantes. A análise detalhada das curvas de extração, superfícies de resposta e derivadas fornece inferências valiosas sobre os mecanismos de transferência de massa e as reações de degradação. A metodologia empregada, combinando experimentação, modelagem

matemática e análise de superfície de resposta, pode ser replicada para otimizar a extração de outros compostos bioativos de diferentes matrizes alimentícias.

## CONCLUSÕES

A extração sólido-líquido de compostos fenólicos do abacaxi é significativamente influenciada pela área superficial da matriz vegetal e pela presença de hortelã. A casca do abacaxi demonstrou ser uma fonte promissora de fenólicos, superando a polpa em rendimento e produtividade, especialmente em partículas menores. A adição de hortelã atuou como um agente estabilizador, mitigando a degradação dos fenólicos ao longo do tempo. O Teste de Levene confirmou a homogeneidade das variâncias entre as triplicatas, validando a precisão dos dados. A otimização do processo, com base na área superficial e no tempo de maceração, é importante para maximizar a recuperação de compostos bioativos. Estes cenários promovem a valorização integral do abacaxi, oferecendo subsídios para o desenvolvimento de bebidas funcionais e a redução de resíduos agroindustriais, com implicações diretas para a sustentabilidade e a economia circular.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelas bolsas de iniciação científica concedidas; Auxílio Financeiro a Projetos de Pesquisa e Inovação (FINAPESQ - UEFS) pelo financiamento de pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- (1) WU, W.; XIAO, G.; YU, Y.; XU, Y.; WU, J.; PENG, J.; LI, L. Effects of high pressure and thermal processing on quality properties and volatile compounds of pineapple fruit juice. **Food Control**, v. 130, 108293, 2021. DOI: [10.1016/j.foodcont.2021.108293](https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108293)
- (2) SIMÕES, L. de S.; TEIXEIRA, L. J. Q.; SARAIVA, S. H.; JUNQUEIRA, M. da S. Estudo da extração dos componentes do abacaxi em função do teor alcoólico e do tamanho da partícula para a produção de licor. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 16, n. 3, p. 239-246, 2014.
- (3) SÁ, A. A. de; MESSIAS, C. M. B. de O. Desenvolvimento de produtos alimentícios a partir do aproveitamento integral dos alimentos com destaque para manga e banana: revisão de literatura. In: VERRUCK, S. (org.). **Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v. 6. Guarujá, SP: Editora Científica Digital, 2022. cap. 7, p. 85-101. DOI: [10.37885/220207735](https://doi.org/10.37885/220207735)
- (4) TEIXEIRA, L. J. Q.; SIMÕES, L. de S.; ROCHA, C. T. da; SARAIVA, S. H.; JUNQUEIRA, M. da S. Tecnologia e processamento de licor de frutas. **Enciclopédia Biosfera**, v.7, n.12, 2011.
- (5) DE JESUS FILHO, M.; DO CARMO, L. B.; MACIEL, K. S.; TEIXEIRA, L. J. Q.; SARAIVA, S. H. Tecnologia do processamento de licor: da extração ao envelhecimento. In: **Tópicos especiais em ciência e tecnologia de alimentos**. v. 1. Vitória: EDUFES, 2020. 334 p. Cap. 15.
- (6) FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. ISBN 85-363-0652-1

- (7) CHANIOTI, S.; LIADAKIS, G.; TZIA, C. Solid-liquid extraction. *In: Varzakas, T., Tzia, C. Food Engineering Handbook*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, p. 253, 2014. Cap. 6, p. 253-286.
- (8) TEIXEIRA, L. J. Q.; SIMÕES, L. de S.; SARAIVA, S. H.; JUNQUEIRA, M. da S.; SARTORI, M. A. Determinação da proporção de açúcar e fruta necessários para conferir os atributos ideais ao licor de abacaxi. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 14, p. 1883-2012, 2012.
- (9) INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz**. v. 4: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos. 3. ed. São Paulo: IMESP, 2008.
- (10) SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdc-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 16, p. 144-158, 1965. DOI: [10.5344/ajev.1965.16.3.144](https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144)
- (11) BRANDÃO, T. S. O.; PINHO, L. S.; TESHIMA, E.; DAVID, J. M.; RODRIGUES, M. I. Optimization of a technique to quantify the total phenolic compounds in jambolan (*Syzygium cumini* Lamark) pulp. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 22, e2018158, 2019. DOI: [10.1590/1981-6723.15818](https://doi.org/10.1590/1981-6723.15818)
- (12) LEVENE, H. Robust tests for equality of variances. *In: OLKIN, I. Contributions to probability and statistics*. Stanford University Press, p. 278-292, 1960.
- (13) BROWN, M. B.; FORSYTHE, A. B. Robust tests for the equality of variances. **Journal of the American Statistical Association**, v. 69, n. 346, p. 364-367, 1974. DOI: [10.1080/01621459.1974.10482955](https://doi.org/10.1080/01621459.1974.10482955)
- (14) BISPO, J. A. C.; BONAFE, C. F. S.; SANTANA, K. M. O. V.; SANTOS, E. C. A. A comparison of drying kinetics based on the degree of hydration and moisture ratio. **LWT - Food Science and Technology**, v. 60, n. 1, p. 192-198, 2015. DOI: 10.1016/j.lwt.2014.07.014.
- (15) AZMIR, J.; ZAIDUL, I. S. M.; RAHMAN, M. M.; SHARIF, K. M.; MOHAMED, A.; SAHENA, F.; JAHURUL, M. H. A.; GHAFOR, K.; NORULAINI, N. A. N.; OMAR, A. K. M. Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 117, n. 4, p. 506-516, 2013. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014)
- (16) POLANÍA, A. M.; LONDOÑO, L.; RAMÍREZ, C.; BOLÍVAR, G.; AGUILAR, C. N. Valorization of pineapple waste as novel source of nutraceuticals and biofunctional compounds. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, p. 3593–3618, 2023. DOI: [10.1007/s13399-022-02811-8](https://doi.org/10.1007/s13399-022-02811-8)
- (17) SANAHUJA, A. B.; GARCÍA, A. V.; BAENAS, N.; FERRANDO, B. O.; PERIAGO, M. J.; ALONSO, N. C.; SÁNCHEZ, R.; TODOLÍ, J. L. Valorization of pineapple core waste for sequential extraction of phenolic compounds and carotenoids: optimization through ultrasound-assisted method and Box–Behnken design. **Food and Bioprocess Technology**, v. 18, p. 2618–2631, 2025. DOI: [10.1007/s11947-024-03620-9](https://doi.org/10.1007/s11947-024-03620-9)
- (18) CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. ed. Oxford: Clarendon Press, 1975.

- (19) CHEMAT, F.; ROMBAUT, N.; SICAIRE, A. G.; MEULLEMIESTRE, A.; FABIANO-TIXIER, A. S.; ABERT-VIAN, M. Ultrasound assisted extraction of food and natural products: mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 34, p. 540-560, 2017. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2016.06.035](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035)
- (20) PRASEDYA, E. S.; FREDIANSYAH, A.; MARTYASARI, N. W. R.; ILHAMI, B. K.; ABIDIN, A. S.; PADMI, H.; FAHRURROZI; JUANSILFERO, A. B.; WIDYASTUTI, S.; SUNARWIDHI, A. L. Effect of particle size on phytochemical composition and antioxidant properties of *Sargassum cristaefolium* ethanol extract. **Scientific Reports**, v. 11, p. 17876, 2021. DOI: [10.1038/s41598-021-95769-y](https://doi.org/10.1038/s41598-021-95769-y)
- (21) BARDAWEEL, S. K.; BAKCHICHE, B.; ALSALAMAT, H. A.; REZZOUG, M.; GHERIB, A.; FLAMINI, G. Chemical composition, antioxidant, antimicrobial and antiproliferative activities of essential oil of *Mentha spicata* L. (Lamiaceae) from Algerian Saharan Atlas. **BMC Complementary and Alternative Medicine**, v. 18, n. 1, p. 201, 2018. DOI: [10.1186/s12906-018-2274-x](https://doi.org/10.1186/s12906-018-2274-x)
- (22) MIMICA-DUKIĆ, N.; BOZIN, B.; SOKOVIĆ, M.; MIHAJLOVIĆ, B.; MATAVULJ, M. Antimicrobial and antioxidant activities of three *Mentha* species essential oils. **Planta Medica**, v. 69, n. 5, p. 413-419, 2003. DOI: [10.1055/s-2003-39704](https://doi.org/10.1055/s-2003-39704)
- (23) MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 7. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.
- (24) SANTANA, F. C. de; OLIVEIRA TORRES, L. R. de; SHINAGAWA, F. B.; OLIVEIRA E SILVA, A. M. de; YOSHIME, L. T.; MELO, I. L. P. de; MARCELLINI, P. S.; MANCINI-FILHO, J. Optimization of the antioxidant polyphenolic compounds extraction of yellow passion fruit seeds (*Passiflora edulis* Sims) by response surface methodology. **Journal of Food Science and Technology**, v. 54, n. 11, p. 3552-3561, 2017. DOI: [10.1007/s13197-017-2813-3](https://doi.org/10.1007/s13197-017-2813-3)
- (25) ANDRADE, A. C.; BORSOI, F. T.; SALIBA, A. S. M. C.; DE ALENCAR, S. M.; PASTORE, G. M.; ARRUDA, H. S. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of phenolic compounds and antioxidant activity from araticum peel using response surface methodology. **Plants**, v. 13, n. 18, p. 2560, 2024. DOI: [10.3390/plants13182560](https://doi.org/10.3390/plants13182560).