



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
AGRÍCOLA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE  
PRODUTOS AGRÍCOLAS**

**SECAGEM DE FOLHA DE BRÓCOLIS PARA OBTENÇÃO DE EXTRATO SECO**

**DOUGLAS VINICIUS PINHEIRO DE FIGUEIREDO**

**Campina Grande – PB**

**Março, 2022**

# **SECAGEM DE FOLHA DE BRÓCOLIS PARA OBTENÇÃO DE EXTRATO SECO**

**DOUGLAS VINICIUS PINHEIRO DE FIGUEIREDO**

Dissertação de mestrado como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE  
PRODUTOS AGRÍCOLAS**

**ORIENTADORA: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ana Paula Trindade Rocha**

**Campina Grande – PB**

**Março, 2022**

F475s

Figueiredo, Douglas Vinicius Pinheiro de.

Secagem de folha de brócolis para obtenção de extrato seco / Douglas Vinicius Pinheiro de Figueiredo – Campina Grande, 2024.  
84 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.

"Orientação: Profª. Dra. Ana Paula Trindade Rocha."

Referências.

1. *Brassica oleracea*. 2. Cinética de Secagem. 3. Extração. I. Rocha, Ana Paula Trindade. II. Título.

CDU 635.356(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA  
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

**ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA AGRÍCOLA, REALIZADA EM 03 DE MARÇO DE 2022.**

CANDIDATO(A): **DOUGLAS VINICIUS PINHEIRO DE FIGUEIREDO**

**COMISSÃO EXAMINADORA:** Ana Paula Trindade Rocha - Orientador(a) - PPGEA/CTRN/UFCG; Josivanda Palmeira Gomes - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG; e Gilmar Trindade de Araújo - Examinador(a) Externo(a) - UAEQ/CCT/UFCG (PORTARIA PPGEA - MS 10/2022)

**TÍTULO: SECAGEM DE FOLHA DE BRÓCOLIS PARA OBTENÇÃO DE EXTRATO SECO**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas

**LOCAL:** Por Videoconferência (plataforma Google Meet) em virtude da suspensão de atividades na UFCG decorrente do corona vírus (COVID-19)

**HORÁRIO:** 14h

Em sessão pública, após exposição de cerca de 50 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, sendo **APROVADO(A)**, com modificações no texto, de acordo com as exigências da Comissão Examinadora, que deverão ser cumpridas no prazo máximo de 30 (trinta) dias. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por ROBERTO ROMAN DOS SANTOS (secretário do PPGEA) e demais membros da Comissão Examinadora presentes. Campina Grande/PB, 03 de março de 2022.

Roberto Roman dos Santos - Secretário do PPGEA/UFCG

Ana Paula Trindade Rocha - Orientador(a) - PPGEA/CTRN/UFCG

Josivanda Palmeira Gomes - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG

Gilmar Trindade de Araújo - Examinador(a) Externo(a) - UAEQ/CCT/UFCG

Douglas Vinicius Pinheiro de Figueiredo - Discente

1. Segue a presente Ata de Defesa de Dissertação do(a) candidato(a) **DOUGLAS VINICIUS PINHEIRO DE FIGUEIREDO**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.
2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários certificam que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da dissertação e tomaram conhecimento do teor deste documento.

### MARÇO DE 2022



Documento assinado eletronicamente por **JOSIVANDA PALMEIRA GOMES, COORDENADOR DE POS-GRADUACAO**, em 10/03/2022, às 14:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Douglas Vinicius Pinheiro de Figueiredo, Usuário Externo**, em 15/03/2022, às 15:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANA PAULA TRINDADE ROCHA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 16/03/2022, às 09:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **GILMAR TRINDADE DE ARAUJO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/03/2022, às 10:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ROBERTO ROMAN DOS SANTOS, SECRETÁRIO (A)**, em 16/03/2022, às 10:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2164935** e o código CRC **B0FA8D39**.

## EPÍGRAFE

*Em tudo dai graças, porque esta é a vontade de Deus,  
em Cristo Jesus,  
para convosco.*

1 Tessalonicenses 5:18

## DEDICATÓRIA

*Dedico essa conquista...*

*Aos meus pais, irmãos, e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.*

*E a ela, minha noiva, e futura esposa, Karina Barbosa.*

*Essa conquista é nossa!*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus. Ele que é a razão de tudo acontecer. Ele que derrama da Sua Graça todos os dias sobre nossas vidas. Ele a quem devemos honrar, glorificar e exaltar o Seu Santo nome. Ele a quem deu Seu filho, Jesus Cristo, para morrer por nós e nos salvar. Obrigado pelo sustento, pela força, pela sabedoria, por não me deixar desistir nunca, afinal, os dois anos de mestrado foram, de longe, os anos mais difíceis da minha vida pessoal, mas Tu nunca me deixasses abalar seja por qualquer circunstância. Obrigado Deus!

A minha família, em especial aos meus pais, irmãos e sogros. Vocês foram fundamentais em cada passo, em cada incentivo, em cada torcida, em cada apoio. Sou e serei eternamente grato a vocês. Os amo muito!

A minha noiva, Karina Barbosa, por ser minha parceira em todas as circunstâncias possíveis. Ela que sempre está me dando forças, me incentivando, me fazendo acreditar mais em mim, sendo forte e paciente, sendo meu apoio emocional muitas vezes, enfim. Obrigado meu amor!

A minha orientadora e amiga, Professora Ana Paula, que traz consigo um coração enorme, uma sensibilidade ímpar e muita sabedoria acadêmica. Ser e continuar sendo seu orientando é uma honra pra mim. Ao Professor Gilmar, que por muitas vezes atuou como professor, amigo, técnico, engenheiro, conselheiro, mecânico, encanador e dentre outras mil capacitações que não tem como citar. Vocês são exemplo! Meu muito obrigado!

Aos meus amigos e companheiros de pós-graduação, que sempre estiveram comigo diretamente, compartilhando de todas as frustrações, no entanto, de todas as conquistas também. Apesar de ter várias outras pessoas, aqui quero citar duas pessoas que, de fato, sem vocês não seria possível concluir esse mestrado. Thais e Henrique. Meu muito obrigado!

A toda pós-graduação de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, todos os professores deste departamento (em especial professora Josivanda, no qual faz parte da minha banca), secretaria e abnegados, pela dedicação. Obrigado a todos!

A CAPES pelo apoio financeiro.

A todos que indiretamente também se fizeram presentes. Meu muito obrigado!



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	iv
LISTA DE TABELAS .....	v
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo geral.....	3
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1 Brócolis ( <i>Brassica oleracea</i> var. <i>Itálica</i> ).....	5
2.1.1 Folha do Brócolis.....	6
2.2 Beneficiamento de Resíduos.....	8
2.3 Extração de fitoquímicos .....	9
2.4 Secagem, Cinética de Secagem e Propriedades Termodinâmicas .....	10
2.5 Leito de Jorro .....	11
2.6 Possíveis aplicações e importância dos extratos com efeito antioxidante .....	12
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1 Materiais .....	14
3.1.1 Locais dos experimentos .....	14
3.1.2 Matéria-prima vegetal .....	14
3.2 Métodos .....	14
3.2.1 Seleção e Sanitização das Folhas de Brócolis.....	14
3.2.2 Caracterização das folhas de brócolis .....	14
3.2.2.1 Teor de Água.....	15
3.2.2.2 Potencial Hidrogeniônico (pH) .....	15

3.2.2.3 Acidez Total Titulável.....	15
3.2.2.4 Sólidos Solúveis Totais .....	15
3.2.2.5 Cinzas .....	15
3.2.2.6 Teor de Extrativos .....	15
3.2.2.7 Determinação de Perda por Dessecação.....	16
3.3 Cinética de Secagem.....	16
3.3.1 Cálculo da difusividade efetiva, energia de ativação e propriedades termodinâmicas .....	18
3.4 Secagem da folha de brócolis .....	19
3.4.1 Distribuição Granulométrica .....	20
3.5 Obtenção do extrato da folha de brócolis .....	20
3.5.1 Extração hidroalcolica.....	20
3.6 Caracterização dos extratos de folha de brócolis.....	20
3.6.1 Quantificação de flavonoides totais .....	21
3.6.2 Quantificação de compostos fenólicos e taninos totais.....	21
3.6.3 Quantificação de antocianinas.....	21
3.6.4 Quantificação de carotenoides e clorofilas totais.....	21
3.7 Obtenção do extrato concentrado .....	22
3.8 Delineamento experimental para o processo de secagem do extrato da folha de brócolis em leito de jorro.....	23
3.9 Variáveis dependentes .....	24
3.9.1 Caracterização físico-química e de bioativos.....	25
3.10 Análise estatística .....	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	26
4.1 ARTIGO I – MODELAGEM MATEMÁTICA E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA CINÉTICA DE FOLHAS DE BRÓCOLIS .....	26
4.2 ARTIGO II – OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DO EXTRATO SECO EM LEITO DE JORRO DE FOLHA DE BRÓCOLIS.....	44

5. CONCLUSÕES GERAIS .....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Brócolis ( <i>Brassica oleracea</i> var. <i>Itálica</i> ).....	5
Figura 2 - Brócolis envolvido pelas folhas.....	7
Figura 3 - Diagrama esquemático do leito de jorro convencional.....	11
Figura 4 - Evaporador rotativo.....	22
Figura 5 - Leito de jorro (modelo FBD 1.0 da marca LabMq do Brasil).....	23

### ARTIGO I

Figura 1 - Representação dos ajustes do modelo de Midilli aos dados de secagem das amostras de folha de brócolis.....	36
---	----

### ARTIGO II

Figura 1 - Distribuição granulométrica obtida por tamisação expressa como porcentagem da fração acumulada de folhas secas e moídas de brócolis.....	56
Figura 2 - Superfície de resposta do teor de flavonoides em relação a concentração de maltodextrina e temperatura de entrada.....	62
Figura 3 - Superfície de resposta do teor de flavonoides em relação a concentração de maltodextrina e vazão de alimentação.....	63
Figura 4 - Superfície de resposta do teor de flavonoides em relação a temperatura de entrada e vazão de alimentação.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para ajustar os dados da cinética de secagem das folhas de brócolis.....	17
Tabela 2 - Resumo dos ensaios de secagem propostos pelo delineamento experimental. ....	24

### ARTIGO I

Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para ajustar os dados da cinética de secagem das folhas de brócolis.....	30
Tabela 2 - Tempos de secagem e teor de umidade das amostras de folha de brócolis obtidas em diferentes temperaturas.....	33
Tabela 3 - Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados de secagem das folhas de brócolis mais os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), Desvio Quadrático Médio (DQM) e valores do qui-quadrado ( $\chi^2$ ). ....	33
Tabela 4 - Difusividade efetiva das amostras de folha de brócolis em diferentes temperaturas.....	36
Tabela 5 - Parâmetros da equação de Arrhenius (ajustado aos dados de difusividade efetiva) das amostras das folhas de brócolis. ....	37
Tabela 6 - Valores para as variações de entalpia ( $\Delta H$ ), entropia ( $\Delta S$ ) e energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) para diferentes condições de secagem das amostras de folha de brócolis.....	38

### ARTIGO II

Tabela 1 - Resumo dos ensaios de secagem propostos pelo delineamento experimental .....	52
Tabela 2 - Caracterização físico-química, física e química das folhas de brócolis in natura.....	53
Tabela 3 - Distribuição granulométrica do pó das folhas de brócolis. ....	55
Tabela 4 Caracterização físico-química e de bioativos do extrato das folhas de brócolis e do extrato concentrado das folhas de brócolis.....	56
Tabela 5 - Resultados obtidos nos ensaios de secagem.....	58

Tabela 6 - Coeficientes de regressão obtidos para rendimento, teor de água e teor de flavonoides.....	59
Tabela 7 - Caracterização físico-químicas e de bioativos do extrato da folha de brócolis em pó.....	64

## RESUMO

Brócolis (*Brassica oleracea* var. *Itálica*) é uma hortaliça cultivada em diversas partes do mundo por ser um alimento com reconhecido potencial nutritivo e rico em antioxidantes naturais. No entanto, observa-se uma destinação imprópria para os resíduos do processamento de brócolis, como as suas folhas, pois diversos estudos destacam que resíduos de origem de alimentos naturais como esse, oriundos de hortaliças, possuem uma quantidade considerável de compostos fitoquímicos que podem ser extraídos e aproveitados como fonte de compostos que possam desempenhar um papel de enriquecedor nutritivo importante. Portanto, é interessante que um número cada vez maior de soluções para o aproveitamento dos mesmos seja proposto. Assim, diante deste contexto, é possível identificar um aumento de pesquisas que busquem o desenvolvimento de processos para viabilizar o uso de diversos produtos existentes em resíduos agrícolas em novas aplicações. Uma etapa importante para viabilizar esse uso é extração desses fitoquímicos e a posterior secagem desse extrato, necessária para a manutenção da qualidade do material extraído propiciando assim o seu potencial uso industrial. Um processo que vem sendo pesquisado é o de secagem em leito fluidodinamicamente ativo e o leito de jorro se mostra como um equipamento com um potencial bastante elevado para ser aplicado nesses processos de secagem. Portanto, o objetivo desse trabalho foi obter o extrato seco da folha de brócolis, com potencial alimentício, por meio do processo de secagem em leito de jorro. Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA), Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA) e Laboratório de Química de Biomassa (LQB), todos da Universidade Federal de Campina Grande. Uma caracterização química e físico-química da folha de brócolis *in natura* foi realizada, após esse processo foi realizada uma cinética de secagem das folhas de brócolis, bem como a aplicação de 10 modelos matemáticos. Além de calcular as principais propriedades termodinâmicas tais quais: difusividade efetiva, entalpia, entropia e energia livre de Gibbs. Foi obtido dois extratos da farinha das folhas de brócolis, um hidroalcólico e outro concentrado através do auxílio de um rotaevaporador. Todos esses processos foram caracterizados físico-quimicamente e foram determinados compostos bioativos, como: flavonoides, antocianinas, compostos fenólicos, taninos, carotenoides e clorofilas totais. As secagens do extrato concentrado foram efetuadas em leito de jorro com as variáveis (concentração de maltodextrina, temperatura de entrada do ar de secagem e vazão de alimentação) variando segundo um delineamento experimental (DOE)  $2^3 + 3$  experimentos no ponto central. Após realização dos ensaios, os pós obtidos foram caracterizados química e físico-quimicamente. Concluiu-se assim que a cinética de secagem

das folhas de brócolis em secador convectivo foi conduzida com êxito. O modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou a cinética de secagem. A média do rendimento dos pós do extrato concentrado de folhas de brócolis após secagem em leito de jorro se encontrou próximo a 50%, o teor de flavonoides foi em média 48,340mg/100g assim sendo possível afirmar que o pó de folhas de brócolis possui propriedades antioxidantes.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Brassica oleracea*, cinética de secagem, extração.



## ABSTRACT

Broccoli (*Brassica oleracea* var. *Itálica*) is a vegetable grown in different parts of the world as it is a food with recognized nutritional potential and rich in natural antioxidants. However, there is an inappropriate destination for residues from broccoli processing, such as its leaves, as several studies highlight that residue of natural food origin such as this, originating from vegetables, contain a considerable amount of phytochemical compounds that can be extracted and used as a source of compounds that can play an important nutritional enrichment role. Therefore, it is interesting that an increasing number of solutions for using them are proposed. Therefore, given this context, it is possible to identify an increase in research that seeks to develop processes to enable the use of various products existing in agricultural waste in new applications. An important step to enable this use is the extraction of these phytochemicals and the subsequent drying of this extract, necessary to maintain the quality of the extracted material, thus providing its potential industrial use. A process that has been researched is drying in a fluid-dynamically active bed and the spouted bed appears to be equipment with a very high potential to be applied in these drying processes. Therefore, the objective of this work was to obtain the dry extract of broccoli leaves, with food potential, through the spouted bed drying process. The experimental tests were carried out at the Agricultural Products Storage and Processing Laboratory (LAPPA), Food Engineering Laboratory (LEA) and Biomass Chemistry Laboratory (LQB), all at the Federal University of Campina Grande. A chemical and physicochemical characterization of the fresh broccoli leaf was carried out, after this process, a drying kinetics of the broccoli leaves was carried out, as well as the application of 10 mathematical models. In addition to calculating the main thermodynamic properties such as: effective diffusivity, enthalpy, entropy and Gibbs free energy. Two extracts from broccoli leaf flour were obtained, one hydroalcoholic and the other concentrated using a rotary evaporator. All these processes were characterized physicochemically and bioactive compounds were determined, such as: flavonoids, anthocyanins, phenolic compounds, tannins, carotenoids and total chlorophylls. The concentrated extract was dried in a spouted bed with the variables (maltodextrin concentration, drying air inlet temperature and feed flow) varying according to an experimental design (DOE)  $2^3 + 3$  experiments at the central point. After carrying out the tests, the powders obtained were chemically and physicochemically characterized. It was concluded that the drying kinetics of broccoli leaves in a convective dryer was successfully conducted. The Midilli model was the one that best adjusted the drying kinetics. The average

yield of powders from concentrated broccoli leaf extract after drying in a spouted bed was close to 50%, the flavonoid content was on average 48,340mg/100g, making it possible to state that broccoli leaf powder has properties antioxidants.

**KEYWORDS:** *Brassica oleracea*, drying kinetics, extraction.

## 1. INTRODUÇÃO

O brócolis (*Brassica oleracea* var. *Itálica*) é uma hortaliça cultivada em diversas partes do mundo, com área estimada em um milhão de hectares e produção anual em torno de 19 milhões de toneladas. No Brasil, é cultivada principalmente nas regiões sul e sudeste, pois desenvolve melhor em regiões com temperaturas mais amenas. Entretanto, o desenvolvimento de cultivares tolerantes a altas temperaturas, permitiu que estas plantas fossem cultivadas também em outras regiões e biomas. No total tem-se uma produção anual de 64,6 mil toneladas, tendo o Estado de São Paulo como o principal produtor desta hortaliça (ANUÁRIO BRASILEIRO DE HORTI & FRUTI, 2019). É um alimento nutritivo reconhecido, rico em antioxidantes naturais, incluindo vitaminas, minerais, glucosinolatos, isotiocianatos e fenólicos (CASTILLEJO et al., 2020). Seu consumo tem aumentado constantemente ano após ano, em parte devido à sua presença de muitos compostos promotores da saúde (KACZMAREK et al., 2019).

O impulso que a cultura de brócolis teve nos últimos anos demonstra que existe um grande potencial de mercado para essa hortaliça. Sua importância econômica no agronegócio tem sido crescente, em razão da apreciação nos diferentes tipos de culinária, suas propriedades nutricionais e o teor de compostos relacionados à saúde. (SCHIAVON et al., 2015). No entanto, a destinação imprópria para os resíduos do processamento de brócolis, cultivados em larga escala em quase todo o Brasil, são bastante expressivas.

As tecnologias de secagem são operações unitárias muito importantes para a redução do teor de umidade com grande aplicação no setor de fabricação de alimentos. Os produtos finais são tipicamente na forma de pó, flocos, grânulos, folhas ou partículas em várias formas, dependendo da exigência do fabricante e do tipo de tecnologias de secagem usadas no processo. Esses processos normalmente facilitam o armazenamento a longo prazo, previnem a contaminação microbiana e outras reações químicas prejudiciais nos materiais alimentícios, como escurecimento enzimático e não enzimático, e retenção de nutrientes, como macronutrientes (proteínas, açúcares, fibras, vitaminas e minerais) ou compostos bioativos (compostos fenólicos, carotenóides, isoflavonas) (MENON; STOJCESKA, 2020).

Os métodos de extração destes compostos variam, e os mais convencionais incluem a necessidade de processos como maceração e extrações líquido-líquido, o que implica na utilização de solventes orgânicos como metanol e acetona. Por este motivo, técnicas inovadoras para extração de compostos bioativos têm sido exploradas a fim de possibilitar alternativas

verdes, em que solventes ambientalmente amigáveis (como óleos vegetais) podem ser usados (GOULA et al., 2017). Extratos de brócolis contendo glucosinolatos e compostos fenólicos podem ser usados para enriquecer diversas matrizes alimentares. Devido à relativa instabilidade desses compostos, sua encapsulação pode garantir a manutenção de seu potencial bioativo (RADŮNZ et al., 2020). Apesar destes processos estarem cada vez mais eficientes, uma grande quantidade de resíduos ainda é gerada (TONINI et al., 2018). Assim, há também um grande interesse pelo aproveitamento e valorização de resíduos e subprodutos gerados pela agroindústria.

O leito de jorro tem sido um equipamento bastante aplicado em processos de secagem e recobrimento de partículas. Ele tem como diferencial permitir que a secagem e o revestimento ocorram simultaneamente em uma única operação unitária, ao passo que o ar quente é injetado na base da câmara contendo as amostras, o revestimento é aspergido por um bocal de atomização posicionado também na base do leito, sendo impulsionado para dentro da câmara de secagem pelo fluxo de ar resultando no pó de interesse (CARTER; BRIENS, 2018)

Diversos estudos destacam que resíduos de origem de alimentos naturais, como as hortaliças, possuem uma quantidade considerável de compostos fitoquímicos que podem ser extraídos. Estudos mais recentes envolvem a extração de compostos fenólicos, flavonoides e carotenoides como nos resíduos de tomate (NINČEVIĆ GRASSINO et al., 2020), romã (GOULA et al., 2017), cenouras (ESPOSTO, 2021), café (MANASA et al., 2021) e dentre outras hortaliças com potencial. Depois de extraídos, estes compostos podem ainda ser utilizados na indústria alimentícia, como por exemplo na produção de alimentos funcionais (COMUNIAN et al., 2021).

Assim, diante deste contexto, é possível identificar um aumento no interesse de pesquisadores em comprovar o uso de diversos subprodutos existentes em novas aplicações, promovendo o desenvolvimento de novos produtos e garantindo uma utilização racional e segura dos compostos extraíveis de plantas. A escolha da secagem em leito jorro partiu do pressuposto que a partir desse método obtêm-se um pó com granulometria fina e uniforme, utilizando tempos de contato curtos durante o processo, além de apresentar menor inativação pelo calor pelo fato de utilizar temperaturas de ar de secagem baixas, elucidando o interesse à utilização dessa técnica, já que se trata de um produto com compostos termolábeis (FERREIRA et al., 2015; BROECKX et al., 2016).

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Obter extrato seco alimentício da folha de brócolis por meio do processo de secagem em leito de jorro.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

a) Obter, selecionar e caracterizar (teor de água, potencial hidrogeniônico, acidez total titulável, sólidos solúveis totais, cinzas, teor de extrativos e determinação de perda por dessecação) as folhas de brócolis *in natura*;

b) Realizar cinética de secagem das folhas de brócolis, em secador convectivo, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C com velocidade do ar de secagem de 1m/s, ajustando diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais e calcular as propriedades termodinâmicas para determinação do melhor pó a ser utilizado em posteriores análises;

c) Obter folhas secas em pó através de secagem e moagem para obtenção dos extratos;

d) Realizar extração hidroalcolica das folhas de brócolis em pó através de uma maceração dinâmica proporção 1:10 (pó:solvente) a uma temperatura de 50°C por 60 minutos;

e) Caracterizar físico-quimicamente (teor de água, potencial hidrogeniônico, acidez total titulável e sólidos solúveis totais) e os bioativos (flavonoides totais, compostos fenólicos totais, taninos totais, antocianinas, clorofila e carotenoides) do extrato obtido;

f) Obter extrato concentrado através de um rotaevaporador, sob vácuo, a temperatura máxima de 50°C;

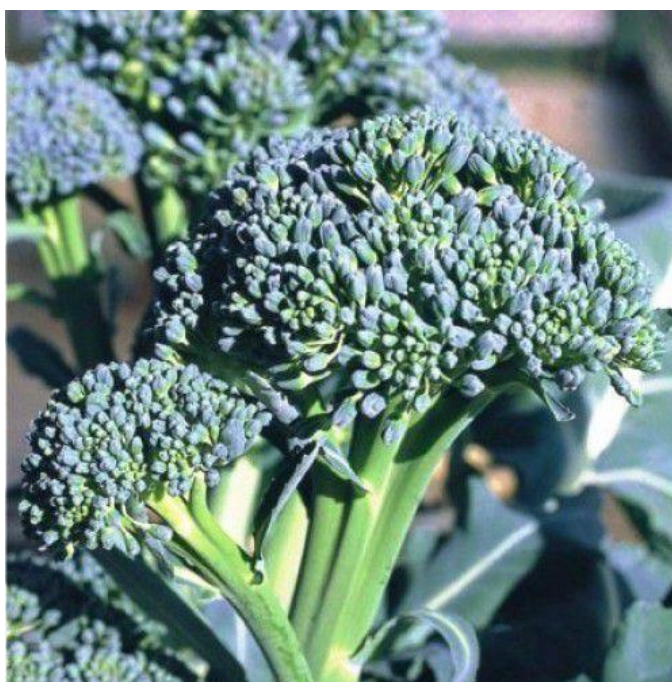
g) Caracterizar físico-quimicamente (teor de água, potencial hidrogeniônico, acidez total titulável e sólidos solúveis totais) e quanto aos compostos bioativos (flavonoides totais, compostos fenólicos totais, taninos totais, antocianinas, clorofila e carotenoides) o extrato concentrado obtido;

- h) Avaliar por meio do delineamento experimental (DOE) a influência das três variáveis independentes (concentração de maltodextrina (%), temperatura de entrada (°C) e vazão de alimentação (g/min)) em relação as variáveis dependentes (rendimento e teor de água e flavonoides), no processo de secagem;
- i) Caracterizar os 11 experimentos do extrato concentrado das folhas de brócolis em pó produzidos em leito de jorro quanto aos parâmetros físico-químicos e bioativos.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Brócolis (*Brassica oleracea* var. *Itálica*)

Os brócolis (*Brassica oleracea* var. *Itálica*) são uma das hortaliças mais produzidas e consumidas no mundo. Esta espécie é resultado da seleção e acúmulo de mutações durante o processo de domesticação de *B. sylvestris*, seu centro de origem é a região do Mediterrâneo (STANSELL; BJÖRKMAN, 2020). O germoplasma de brócolis é dividido em dois grupos comerciais principais: ramoso, que apresenta várias pequenas inflorescências laterais, e brócolis de cabeça única, apresentando inflorescências concentradas na ponta do broto, também conhecido como brócolis japonês (ORDIALES et al., 2017). Segundo Thomas e seus colaboradores (2017), o consumo de brócolis vem aumentando no Brasil nos últimos anos, não apenas pelo seu preço razoável, tornando-o acessível para diferentes classes sociais, mas também pelo seu alto valor nutricional. É uma importante fonte de cálcio, magnésio e aminoácidos essenciais. Além disso, esta hortaliça apresenta antioxidantes, principalmente compostos fenólicos, que contribuem para a prevenção do envelhecimento precoce e diversos tipos de câncer e doenças neurodegenerativas (LIU et al., 2018). Na Figura 1 está sendo representado o brócolis em sua forma *in natura*.



**Figura 1.** Brócolis (*Brassica oleracea* var. *Itálica*).

**Fonte:** LIU et al., 2018.

No mercado brasileiro, há dois tipos de brócolis, o de inflorescência única, também denominado de cabeça-única, calabrês, japonês, americano ou ninja e o ramoso. Os brócolis de inflorescência única apresentam inflorescência terminal (cabeça) de maior diâmetro e botões florais com menor granulometria. Tais características são adequadas à industrialização com o produto congelado comercializado em balcões frigoríficos, e o produto fresco comercializado com ou sem embalagem (PENA, 2018).

O cultivo de brócolis se dá por suas inflorescências que são colhidas antes da abertura da sépala, ou seja, ainda imaturas a colheita prematura de inflorescências acelera a senescência do brócolis, o que leva ao amarelecimento das flores, limitando a vida útil e o valor comercial, no entanto esse cultivo vem ganhando mercado por ser rica em vitaminas e fibras, indispensáveis para a regulação das funções do organismo (FERREIRA et al., 2013; AGHDAM et al., 2021), além do efeito antioxidante e anticancerígenos (ARES et al., 2014). O consumo de brócolis é benéfico para a saúde humana devido à sua alta concentração das altas concentrações de fitoquímicos bioativos encontrados nas diferentes variedades (DUARTE-SIERRA et al., 2019).

Nos brócolis, ainda é possível encontrar os polifenóis, que são antioxidantes naturais produzidos pelas plantas a partir do metabolismo secundário em resposta à influência de fatores abióticos e bióticos (THOMAZ et al., 2018), têm-se como exemplos dessa classe de polifenóis, os flavonoides, quercetina e o kaempferol (VALLEJO et al., 2002).

Outro importante composto com alto poder antioxidante encontrado em brócolis é a vitamina C, representadas pelo ácido ascórbico e dehidroascórbico. Têm como função a capacidade de interromper a reação em cadeia dos radicais livres e ainda apresenta papel importante na síntese de colágeno, absorção gastrointestinal de ferro, redução dos níveis de colesterol no sangue, melhora o sistema imunológico e um poderoso antioxidante (MAZUREK; JAMROZ, 2015).

### **2.1.1 Folha do Brócolis**

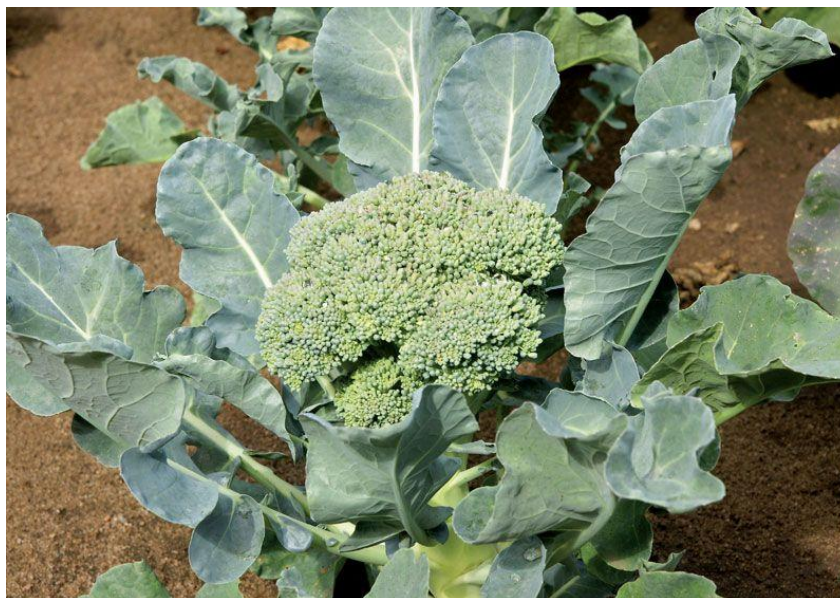
As hortaliças e as frutas são os alimentos que mais acabam perdendo parte de seu valor nutricional, devido ao descarte de cascas, sementes, talos, raízes e folhas, hábito que se tornou comum nas cozinhas domésticas (TEIXEIRA et al., 2015).

Durante o preparo de hortaliças, o descarte de partes consideradas não comestíveis como talos, cascas, entre outras, resultam em outro tipo de perda de minerais e demais nutrientes (DAIUTO et al., 2015). De acordo com Rocha et al. (2008), cascas, talos e folhas são boas



fontes de fibras e lipídios, tendo-se como exemplos as sementes de abóbora; talos de brócolis, de couve, de espinafre; cascas de banana, de laranja, de limão, de rabanete e folhas de brócolis.

A maioria das pessoas consome apenas floretes de brócolis, que representam cerca de 30% da biomassa do vegetal. Por esta razão, os estudos de pesquisa geralmente se concentram em floretes, enquanto as informações sobre as propriedades nutricionais de outras partes de brócolis são geralmente limitadas. Apenas alguns autores descreveram a composição nutricional e a atividade antioxidante dos subprodutos dos brócolis. Os subprodutos de brócolis e os floretes de brócolis têm composição química semelhante e são ricas fontes de GLS, polifenóis, fibra alimentar, proteínas e outros nutrientes (DOMÍNGUEZ-PERLES et al., 2010; SOENGAS et al., 2012, DRABINSKA et al., 2018). A Figura 2 ilustra os brócolis antes de ser colhido ainda envolvido em suas folhas.



**Figura 2.** Brócolis envolvido pelas folhas.

**Fonte:** DRABINSKA et al., 2018

De acordo com Storck et al. (2013), a folha de brócolis é estudada como sendo uma fonte de elevado teor de polifenóis (137,15 mg), que são considerados substâncias reconhecidas cientificamente pelo seu potencial antioxidante. Além disso, as folhas de brócolis mostraram teores de carboidrato de 3,89g, fibra bruta de 1,26g, proteínas de 3,87g, lipídeos de 0,40g e calorias de 34,6kcal, valores esses próximos ou superiores a parte nobre do mesmo, sendo observada a importância de um direcionamento para esse resíduo descartado erroneamente.

Atualmente, há um crescente interesse na recuperação de subprodutos vegetais e sua conversão em produtos de alto valor agregado para a obtenção de compostos funcionais como os antioxidantes. As folhas fornecem vitaminas (C, K e do complexo B), minerais (cálcio, fósforo e potássio) e boas porções de fibras. O diferencial é o sulforafano, fitoquímico que auxilia no controle do açúcar no sangue, beneficia ossos e coração, apresenta ação antioxidante e é comprovadamente inimigo de tumores (NABUCO, 2019).

## **2.2 Beneficiamento de Resíduos**

O desperdício de alimentos é definido como qualquer perda de alimentos comestíveis ou não comestíveis da cadeia de abastecimento alimentar (O'CONNOR et al., 2021). As soluções para o problema do desperdício alimentar são a prevenção da sua produção e a sua valorização. A valorização ou beneficiamento é uma técnica sustentável que converte o desperdício de alimentos em produtos de valor agregado, o que limita o descarte de resíduos de alimentos em aterros sanitários e elimina as emissões de gases de efeito estufa (MAK et al., 2020).

O beneficiamento do desperdício alimentar tem sido adotado lentamente e envolve processos de primeira e segunda geração. As estratégias de valorização de primeira geração visam a utilização de fluxos de materiais completos para a produção de ração animal, energia, composto e/ou aplicações específicas de consumo. As estratégias de valorização de segunda geração compreendem várias formas de utilização fracionada dos fluxos de materiais. Eles contam com a integração de processos adaptados de recuperação e conversão avançada para componentes específicos, a fim de obter diferentes classes de produtos industriais, como química fina, alimentos funcionais e commodities. O processamento avançado de segunda geração refere-se a esses procedimentos avançados de conversão para componentes específicos de resíduos alimentares (XIONG et al., 2019).

A indústria tem como um desafio a transformação destes resíduos em subprodutos de valor agregado, destinando-os ao reprocessamento, visando reduzir impactos negativos causados (CALDAS et al., 2018). A relevância da preocupação com os resíduos alimentares é ilustrada por diversos autores em seus trabalhos publicados (SHEA, 2012; MIRABELLA et al., 2014).

A exploração de subprodutos processados de frutas e vegetais como fonte de compostos funcionais é um campo promissor que requer pesquisa interdisciplinar para que sejam

desenvolvidas tecnologias de processamento otimizadas para minimizar a quantidades de resíduos e utilizar subprodutos em grande escala e em níveis acessíveis (TEDESCO, 2018).

### **2.3 Extração de fitoquímicos**

O processamento de alimentos de origem vegetal, além de produzir o produto principal, que é comercializado, gera grandes quantidades de subprodutos que não são aproveitados pela indústria. Pesquisas ao longo dos últimos 20 anos revelaram que muitos destes subprodutos podem servir como uma fonte potencialmente valiosa de compostos bioativos (WIJNGAARD et al., 2012).

Compostos fitoquímicos, também conhecidos como fitonutrientes, são metabólitos secundários derivados de plantas com uma grande variedade de estruturas químicas que incluem compostos fenólicos, carotenoides, fitoestrogênios e terpenoides (AHMAD et al., 2021). Eles apresentam características interessantes relacionadas à saúde humana, uma vez que são benéficos no controle de doenças cardíacas e cânceres, por exemplo (SHARMA et al., 2012). Tais efeitos positivos e benéficos são decorrentes de alguns mecanismos desencadeados por estes compostos que envolvem principalmente a eliminação direta de radicais livres sendo, portanto, considerados como agentes antioxidantes (AHMAD et al., 2021).

A etapa de extração dos fitoquímicos da massa vegetal é um procedimento muito importante e crucial na obtenção de um produto final de qualidade e com elevados teores de substâncias ativas. O método extrativo e o solvente utilizado têm papel fundamental para obter uma metodologia eficiente e a custo operacional relativamente baixo (MARTINS, 2013). Pachú (2007) define extração como método conveniente para retirar substâncias de órgãos ou de matrizes onde são originadas e localizadas, e relata a respeito do fator solubilidade e afinidade das substâncias para com os solventes.

Na literatura acadêmica são relatadas diversas técnicas para a extração de princípios ativos em produtos vegetais, dentre eles têm: maceração, percolação, decocção, infusão, extração contínua de plantas usando o extrator de Soxhlet, extração por arraste com vapor d'água, capacetes de pressão, extração com ondas ultrassônicas, dentre outras, porém no presente estudo foi utilizado a técnica de infusão.

## 2.4 Secagem, Cinética de Secagem e Propriedades Termodinâmicas

A secagem e o armazenamento são etapas essenciais para a obtenção de produtos de qualidade (MARTINAZZO et al., 2013). De acordo com Diógenes e seus colaboradores (2013), a secagem é uma forma de minimizar perdas, possibilitando o transporte, o armazenamento e aumentando a vida útil, garantindo a viabilidade econômica e segurança microbiológica pela eliminação da água do material, através da evaporação. De acordo com Silva e seus colaboradores (2015), a cinética de secagem consiste na rapidez com que um material perde umidade, e este fator é dependente de suas propriedades específicas; da temperatura; da velocidade do ar de secagem; e da umidade relativa do ar.

A cinética de secagem pode ser descrita por modelos matemáticos semiempíricos ou puramente empíricos (MADAMBA, 2003). Os modelos semiempíricos se baseiam na analogia com a Lei de Newton para o resfriamento, aplicada à transferência de massa, enquanto que os modelos empíricos apresentam uma relação entre teor de água e o tempo de secagem e consideram como mecanismo principal a difusão baseada na segunda Lei de Fick (ZANOELO et al., 2007).

Durante anos, os modelos desenvolvidos foram usados em cálculos que envolviam o projeto e construção de novos sistemas, otimização do processo e a descrição de todo o seu comportamento. A maioria dos estudos relacionados à secagem se referem ao resultado de diversas variáveis externas sobre o produto, como a temperatura, velocidade do ar, umidade relativa, entre outros. Portanto, os modelos matemáticos são utilizados para representar a cinética de secagem referente a estas condições, sendo que estes são fundamentais para as simulações matemáticas de secagem (GONELI et al., 2014; ONWUDE et al., 2016).

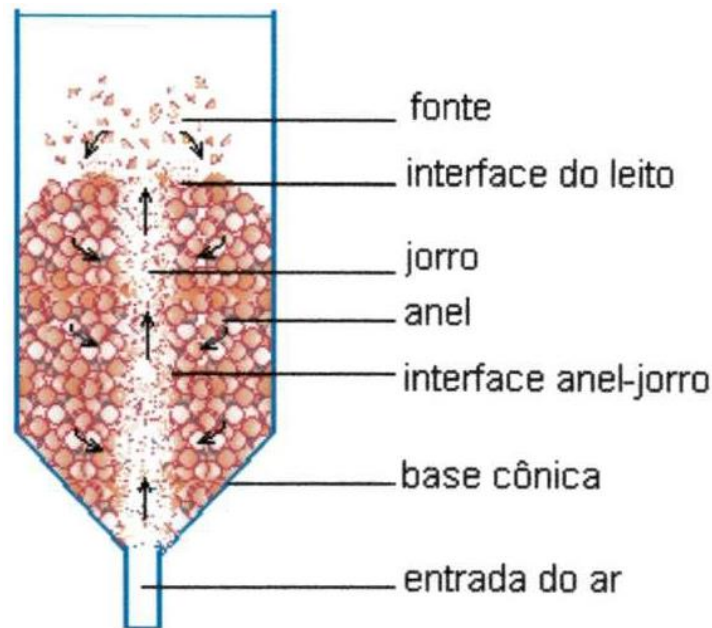
Por meio do estudo da cinética de secagem é possível determinar as propriedades termodinâmicas que proporcionam o conhecimento da afinidade do solvente pela água e da espontaneidade do processo de sorção, sendo importante para projetar equipamentos de secagem (OLIVEIRA et al., 2013a).

O conhecimento das propriedades termodinâmicas nos processos de secagem de produtos agrícolas é importante fonte de informação para projetar equipamentos de secagem, calcular a energia requerida nesse processo, estudar as propriedades da água adsorvida e avaliar a microestrutura dos alimentos e o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos alimentos (CORRÊA et al., 2012).

## 2.5 Leito de Jorro

O leito de jorro foi criado por Mathur e Gishler no século passado, como alternativa de secagem eficiente e economicamente viável. A técnica é aplicada na secagem de materiais granulares, pastas e suspensões, granulação e recobrimento de partículas envolvendo contato entre um fluido e partículas sólidas (ALSINA et al., 1996).

O leito de jorro é constituído por um recipiente cônico cilíndrico, contendo partículas sólidas, em que o fluido é injetado por meio de um orifício localizado na base central da coluna, provocando um canal preferencial de escoamento desse fluido no leito de partículas (CREMASCO, 2012). Três regiões distintas compõem o leito de jorro: região de jorro, anular e fonte, que podem ser visualizadas na Figura 3 abaixo.



**Figura 3:** Diagrama esquemático do leito de jorro convencional.

**Fonte:** Rocha (2006)

O jorro ou região central (fase diluída) apresenta alta porosidade, em torno de 0,90. Nessa região os sólidos possuem um movimento ascendente, concorrente com o do fluido. O ânulo ou região anular corresponde à fase densa, com movimento descendente de sólidos e com percolação contracorrente do fluido, sua porosidade é aproximadamente a da condição de um leito fixo expandido. A fonte é a região superior ao ânulo onde as partículas movimentam-se em regime desacelerado do jorro, caindo no ânulo (DONILDA, 2000).

Esse equipamento gera uma operação em que sólidos particulados são suspensos por uma corrente ascendente de ar, onde o leito de partículas passa a comportar-se como um fluido, principalmente quando referente as suas propriedades de escoamento, adquirindo um comportamento reológico de líquido. A velocidade mínima de fluidização depende dos fatores, como densidade de empacotamento, tamanho e forma dos sólidos a serem secos, viscosidade e velocidade dos meios de fluidização, nesse caso, o ar de secagem (GOSAVI et al., 2018).

Como características, o leito de jorro apresenta altas taxas de circulação de partículas no leito, mistura intensa das partículas, contato íntimo entre as fases fluida e particulada e altas taxas de transferência de calor e de massa (CREMASCO, 2012).

Outro motivo do uso do leito de jorro é a vantagem da formação de uma camada altamente uniforme em curto tempo de processamento, devido, principalmente, às excelentes condições de transferência de calor e de massa no interior do equipamento (SOUZA et al., 2019).

O leito de jorro tem sido aplicado em inúmeros processos, como na granulação, recobrimento, aquecimento e resfriamento de sólidos e na secagem (CREMASCO, 2012). No entanto, tal técnica raramente é aplicada em processos industriais devido a dificuldades de escala (FALEIROS et al., 2014).

## **2.6 Possíveis aplicações e importância dos extratos com efeito antioxidante**

Na rotina da sociedade do século XXI mudanças rápidas nas dietas e estilos de vida devido à industrialização, urbanização e desenvolvimento econômico estão tendo um impacto significativo no estado nutricional e na saúde geral da população em todo o mundo. Com isso, nos últimos anos os alimentos ricos em algum composto bioativo, como os antioxidantes, têm gerado muito interesse e atenção, pois desempenha um papel importante na prevenção de doenças. Antioxidantes são substâncias ou compostos que inibem a oxidação de outras moléculas em nosso corpo e impedem a formação de radicais livres, limpando-os. A maioria dos benefícios para a saúde dos antioxidantes surge de suas propriedades anti-inflamatórias dentro do corpo. O importante papel dos antioxidantes é promover a saúde cardiovascular, inibir o crescimento de tumores cancerígenos, retardar o processo de envelhecimento no cérebro e no sistema nervoso e diminuir o risco e a gravidade de doenças neurodegenerativas, incluindo a doença de Alzheimer e Parkinson (NIMALA et al., 2018).

Atrelado a busca por alimentos que sejam benéficos a saúde temos os produtos alimentícios com rótulos limpos, ou seja, livre de substâncias quimicamente sintetizadas, assim

a preferência dos consumidores por aditivos naturais e sua preocupação com a carcinogenicidade dos compostos sintéticos tem incentivado a indústria alimentícia a considerar algumas alternativas e como resultado, o mercado de ingredientes de rótulos limpos está crescendo continuamente em todo o mundo. Embora muitos extratos vegetais sejam ricos em compostos bioativos, sua aplicabilidade é de particular interesse para o desenvolvimento de alternativas naturais aos conservantes sintéticos em alimentos. Diferentes partes, como sementes, frutas, cascas, folhas, raiz e até madeira são ricas em compostos bioativos (OLSZEWSKA et al., 2020).

Antioxidantes naturais têm sido estudados em uma ampla gama de aplicações, como conservantes em diversos produtos alimentícios em revestimentos comestíveis e em filmes a serem usados em embalagens de alimentos. A gordura da carne apresenta alta suscetibilidade à oxidação, com isso incorporação de antioxidantes naturais, em forma de extratos ou óleos essenciais podem reduzir ou minimizar a formação de toxinas químicas, aumentando o estado nutricional e os benefícios para a saúde desses produtos, bem como sua vida útil. A aplicação também se estende ao aumento da estabilidade de óleos comestíveis que não contêm antioxidantes naturais. Também foram estudados em produtos de padaria, com a incorporação de extratos aquosos em biscoitos, mostrando forte atividade antioxidante. Em sucos de frutas frescas, também foram propostos antioxidantes naturais para melhorar a estabilidade dos pigmentos carotenoides, bem como para a proteção e estabilização do aroma. Além disso, sabendo que os antioxidantes naturais possuem atividade antimicrobiana, a sua aplicação é feita em revestimentos e filmes comestíveis, havendo além da ação antimicrobiana e antioxidante, uma melhora nas propriedades de barreira contra a luz UV e vapor de água (ZAMUZ et al., 2018; LOURENÇO et al., 2019).

Com isso, nota-se a importância da extração de resíduos agroindustriais com o intuito de obter antioxidantes não sintéticos e que podem ser aplicados na indústria alimentícia sem restrições, podendo afetar múltiplos alvos de consumidores.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Materiais**

##### **3.1.1 Locais dos experimentos**

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) pertencente a Unidade Acadêmica de Engenharia de Agrícola, no Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA) pertencente a Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos e no Laboratório de Química de Biomassa (LQB) pertencente a Unidade Acadêmica de Química, ambos na Universidade Federal de Campina Grande.

##### **3.1.2 Matéria-prima vegetal**

As folhas de brócolis (*Brassica oleracea* var. Itálica) foram obtidas através de fornecedores locais que possuem plantação em áreas circunvizinhas da cidade de Campina Grande – PB.

#### **3.2 Métodos**

##### **3.2.1 Seleção e Sanitização das Folhas de Brócolis**

Antes de iniciar o processo de secagem propriamente dito, as folhas de brócolis foram recepcionadas, selecionadas e sanitizadas com objetivo de evitar uma matéria-prima de má qualidade. Portanto, as que apresentavam injúrias mecânicas, queimaduras e contaminações foram devidamente descartadas.

##### **3.2.2 Caracterização das folhas de brócolis**

As folhas de brócolis *in natura* foram caracterizadas, em triplicata, quanto aos seguintes parâmetros físico-químicos, físicos e químicos.



### **3.2.2.1 Teor de Água**

O teor de água foi determinado por secagem de 5 g de amostra à temperatura de 105°C, até peso constante, através da metodologia descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (2008).

### **3.2.2.2 Potencial Hidrogeniônico (pH)**

Para a determinação do pH das amostras foi utilizado um medidor de pH da marca Tecnal, modelo TEC-2, previamente calibrado com soluções tampão de pH 4,0 e 7,0, sendo feita uma diluição da amostra na proporção de 1:5 m/v.

### **3.2.2.3 Acidez Total Titulável**

Para a determinação da acidez total titulável foi utilizado a metodologia descrita no manual do Instituto Adolfo Lutz (2008), pelo método acidimétrico cujas amostras foram tituladas com solução padronizada de NaOH 0,1 M e os resultados expressos em porcentagem de ácido cítrico.

### **3.2.2.4 Sólidos Solúveis Totais**

Os sólidos solúveis totais foram determinados segundo a metodologia descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (2008).

### **3.2.2.5 Cinzas**

As cinzas foram determinadas segundo a metodologia descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (2008), por calcinação em mufla a 600°C sendo o resultado expresso em porcentagem (%).

### **3.2.2.6 Teor de Extrativos**

O teor de extrativos foi realizado de acordo com a metodologia de Oliveira et al., 2013b. Para a extração Etanol/tolueno utilizou-se o auxílio de um extrator Soxhlet, onde 5 gramas das folhas

previamente secas foram deixados em refluxo até a completa extração, por 48 horas, ou até que a solução no interior do Soxhlet não apresentasse mais coloração. A matéria extraída foi calculada como a razão percentual da massa de resíduo seco para a massa de matéria vegetal, com a média de três medidas.

### 3.2.2.7 Determinação de Perda por Dessecação

A determinação da perda por dessecação foi realizada pelo método gravimétrico segundo procedimento descrito por Souza et al. (2007).

## 3.3 Cinética de Secagem

Para a cinética de secagem, as amostras das folhas foram colocadas em cestas teladas, formando uma altura de camada de 0,5 cm.

As amostras, com três repetições, foram submetidas à secagem em secador convectivo com circulação de ar nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e velocidade do ar de 1 m/s. As cinéticas de secagem foram realizadas pesando-se as amostras em intervalos regulares de 5, 10, 15, 30 e 60 min, até atingirem o equilíbrio dinâmico com o ar de secagem. Em seguida, foi determinado o teor de água das amostras em estufa a 105 °C (IAL, 2008), sendo calculadas as razões de umidade (Equação 1) e traçadas as curvas da razão do teor de água em função do tempo de secagem.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (1)$$

Em que:

RX - razão do teor de água do produto (adimensional);

X - teor de água do produto (b.s.);

X<sub>i</sub> - teor de água inicial do produto (b.s.);

X<sub>e</sub> - teor de água de equilíbrio do produto (b.s.).

Os modelos matemáticos descritos na Tabela 1 foram ajustados aos dados experimentais das curvas de secagem através de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, utilizando-se o programa Statistica 7.0.

**Tabela 1-** Modelos matemáticos utilizados para ajustar os dados da cinética de secagem das folhas de brócolis.

Modelo	Equação	
Aproximação da difusão	$RX = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	(2)
Exponencial Dois termos	$RX = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	(3)
Henderson e Pabis	$RX = a \exp(-kt)$	(4)
Lewis	$RX = \exp(-kt)$	(5)
Logarítmico	$RX = a \exp(-kt) + c$	(6)
Midilli	$RX = a \exp(-kt^n) + bt$	(7)
Newton	$RX = \exp(-kt)$	(8)
Page	$RX = \exp(-kt^n)$	(9)
Peleg	$RX = 1 - t/(a + bt)$	(10)
Silva et al.	$RX = \exp(-at - bt^{1/2})$	(11)

Fonte: Autor (2022)

Para seleção do melhor modelo matemático foram avaliados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o desvio quadrático médio - DQM (Equação 12) e o qui-quadrado -  $\chi^2$  (Equação 13). Sendo considerado como ajuste satisfatório o modelo que apresentou os maiores valores de  $R^2$  e os menores valores de DQM e  $\chi^2$ .

$$DQM = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{N - n} \sum_{i=1}^N (RX_{exp,i} - RX_{pred,i})^2 \quad (13)$$

Em que:

DQM - desvio quadrático médio;

$\chi^2$  - qui-quadrado;

$RX_{pred}$  - razão do teor de água predita pelo modelo;

$RX_{exp}$  - razão do teor de água experimental;

N - número de observações.

n - número de constantes do modelo.

### 3.3.1 Cálculo da difusividade efetiva, energia de ativação e propriedades termodinâmicas

O cálculo da difusividade efetiva foi obtido mediante a equação de difusão para sistema de coordenadas retangulares (CRANK, 1975), conforme Equação 14. Considerou-se uma distribuição de teor de água inicial, uniforme e sem a presença de qualquer resistência térmica e a solução analítica da lei de Fick para uma placa plana infinita, foi estudada na forma de séries infinitas (Equação 15).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{ef} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{ef} \frac{\partial Z}{\partial z} \right) \quad (14)$$

$$RX = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp \left[ -(2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{ef}}{L^2} t \right] \quad (15)$$

Em que:

$RX$  – razão do teor de água do produto (adimensional);

$n$  - número de termos

$D_{ef}$  – difusividade efetiva ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ );

$L$  – espessura da camada (m);

$t$  – tempo (s).

Como a Equação 14 representa uma série de termos infinitos, torna-se necessário recorrer a um software de cálculo estatístico para a determinação da difusividade efetiva. Neste caso utilizou-se o programa Statistica 7.0 por meio de regressão não-linear e método Quasi-Newton, com aproximação de quatro termos, a partir de onde não se observou haver mais variação do valor de  $D_{ef}$ .

Foi avaliado o efeito da temperatura de secagem na difusividade efetiva por meio da equação do tipo de Arrhenius (Equação 16), que descreve a relação entre a energia de ativação e a velocidade em que a reação ocorre.

$$D_{ef} = D_0 \exp \left( \frac{E_a}{RT} \right) \quad (16)$$

Em que:

$D_{ef}$  - difusividade efetiva ( $m^2 s^{-1}$ );

$D_0$  - fator pré-exponencial ( $m^2 s^{-1}$ );

$E_a$  - energia de ativação ( $J mol^{-1}$ );

$R$  - constante universal dos gases,  $8,314 J mol^{-1} K^{-1}$ ;

$T$  - temperatura (K).

As propriedades termodinâmicas do processo de secagem (entalpia, entropia e energia livre de Gibbs) foram calculadas a partir das Equações 17, 18 e 19, respectivamente (CORRÊA et al., 2012).

$$\Delta H = E_a - RT \quad (17)$$

$$\Delta S = R \left( \ln D_0 - \ln \frac{k_b}{h\nu} - \ln T \right) \quad (18)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (19)$$

Em que:

$\Delta H$  - variação de entalpia ( $J mol^{-1}$ );

$\Delta S$  - variação de entropia ( $J mol^{-1} K^{-1}$ );

$\Delta G$  - variação de energia livre de Gibbs ( $J mol^{-1}$ );

$E_a$  - energia de ativação ( $J mol^{-1}$ );

$R$  - constante universal dos gases,  $8,314 J mol^{-1} K^{-1}$ ;

$D_0$  - fator pré-exponencial ( $m^2 s^{-1}$ );

$k_B$  - constante de Boltzmann,  $1,38 \times 10^{-23} (J K^{-1})$ ;

$h_P$  - constante de Planck,  $6,626 \times 10^{-34} (J s)$ ;

$T$  - temperatura (K).

### 3.4 Secagem da folha de brócolis

As folhas foram secas em estufa de circulação de ar à  $60^\circ C$  e posteriormente inseridas em um moinho de facas para a obtenção de um pó com granulometria desejada, onde, por conseguinte foram conservadas em recipiente fechado e ao abrigo da luz.

### **3.4.1 Distribuição Granulométrica**

A análise granulométrica foi realizada através do peneiramento de 50g da farinha obtida da folha de brócolis, caracterizado pelas pesagens das peneiras com as frações por medidas diretas utilizando-se uma série de peneiras padronizadas na faixa de 1 a 0,149mm, com agitador eletromagnético, fabricante Bertel, para peneiras redondas; o tempo total de cada análise foi de 10 minutos segundo metodologia descrita por Gusmão et al. (2016).

### **3.5 Obtenção do extrato da folha de brócolis**

De posse do pó devidamente classificado, este foi submetido a um processo de extração hidroalcoólica, e após essa extração, o extrato bruto obtido foi filtrado em filtro de porcelana com o auxílio de um papel de filtro, sem vácuo, sendo mantidos em frascos âmbar ao abrigo da luz e armazenados a temperatura de 4°C para posteriores análises.

#### **3.5.1 Extração hidroalcoólica**

Para o preparo da solução extrativa hidroalcoólica, foi adicionado álcool 70% numa proporção de 1:10 (pó:solvente), com uma temperatura de extração de 50°C, por 60 minutos, sob agitação mecânica com auxílio de um extrator encamisado e um banho de aquecimento com temperatura controlada (FERNANDES et al., 2014).

### **3.6 Caracterização dos extratos de folha de brócolis**

O extrato obtido pelo método hidroalcoólico foi caracterizado quanto aos parâmetros físico-químicos de teor de água, potencial hidrogeniônico, acidez total titulável e sólidos solúveis totais, todas descritas anteriormente respectivamente nos tópicos 3.2.2.1 a 3.2.2.4.

De mesma forma, o extrato foi submetido as caracterizações de bioativos, tais quais: Flavonoides totais, compostos fenólicos totais, taninos totais, antocianinas, clorofilas e carotenoides. Todas descritas posteriormente nos tópicos de 3.6.1 a 3.6.4.

### 3.6.1 Quantificação de flavonoides totais

Para a quantificação do teor de flavonoides totais seguiu-se o método descrito e validado por Bott (2008). O conteúdo de flavonoides totais (FT) foi avaliado por espectrometria (UV/vis) usando uma massa de amostra pré-definida após reação da amostra com o reagente cloreto de alumínio (AlCl<sub>3</sub>), sendo o comprimento de onda para leitura 425nm, com um tempo de reação de 30 minutos.

O teor de flavonoides totais foi expresso como mg quercetina/g de extrato ou por grama de matéria-prima vegetal. Todas as amostras foram analisadas em triplicata.

### 3.6.2 Quantificação de compostos fenólicos e taninos totais

Os compostos fenólicos totais foram estimados a partir do método de FolinCiocalteu, descrito por Waterhouse (2002). Nesta metodologia é utilizado o carbonato de sódio e para a preparação da curva padrão foi utilizado ácido gálico, as leituras foram realizadas em espectrofotômetro em um comprimento de onda de 765nm.

### 3.6.3 Quantificação de antocianinas

Foram determinadas segundo a metodologia descrita por Francis (1982), sendo feita a leitura do extrato filtrado em espectrofotômetro em um comprimento de onda de 535nm. Os resultados expressos em mg/100 g foram calculados através da Equação 20.

$$\text{Antocianinas totais} = \frac{Fd \times Abs}{98,2} \quad (20)$$

Em que:

Fd – Fator de diluição;

Abs – Absorbância lida.

### 3.6.4 Quantificação de carotenoides e clorofilas totais

Os teores de clorofila e carotenoides foram estimados como descrito por Lichtenthaler (1987). Foi utilizado 0,3 g da matéria prima, macerado com 4,5 ml de acetona a 80% acrescida

de 0,3g de carbonato de cálcio, completando-se o volume para 7,5. O extrato foi vertido para um tubo de ensaio e levado a uma centrifuga climatizada a 10°C com rotação de 300 rpm por 10 minutos, o sobrenadante foi coletado e realizado leitura em espectrofotômetro nos comprimentos de onda de 470, 646 e 663nm.

### 3.7 Obtenção do extrato concentrado

O extrato hidroalcolico foi submetido a um evaporador rotativo (Figura 4) para a eliminação total do solvente, sob vácuo a temperatura máxima de 50°C, até atingir o teor de sólidos de 10%. Após esse processo, o extrato obtido foi conservado em incubadora BOD em temperatura de refrigeração (4°C), e acondicionado em recipiente âmbar para as posteriores análises. A caracterização físico-química do extrato bruto obtido ao que se refere a teor de água, potencial hidrogeniônico, acidez total titulável e sólidos solúveis totais foram realizadas de acordo com as metodologias já citadas no itens 3.2.2.1 a 3.2.2.4 e em se tratando de análises de bioativos no que se refere a quantificação de flavonoides totais, quantificação de fenólicos e taninos totais, quantificação de antocianinas e as quantificações de carotenoides e clorofilas foram realizadas de acordo com as metodologias já citadas no itens 3.6.1 ao 3.6.4.



**Figura 4.** Evaporador rotativo. **Fonte:** Autor (2022)



### 3.8 Delineamento experimental para o processo de secagem do extrato da folha de brócolis em leito de jorro

Foram avaliadas a influência das variáveis independentes: concentração de maltodextrina (%), temperatura de entrada do ar de secagem (°C) e vazão de alimentação ( $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ ), em secador do tipo leito de jorro (modelo FBD 1.0 da marca LabMq do Brasil) (Figura 5). Foi realizado um delineamento experimental  $2^3+3$ , com 3 experimentos no ponto central, resultando 11 experimentos, como mostra a Tabela 2.



**Figura 5.** Leito de jorro (modelo FBD 1.0 da marca LabMq do Brasil).

**Fonte:** Autor (2022)

A pressão de atomização foi fixada em 3bar assim como o peso das partículas em 1kg e vazão de ar de secagem em 3,4ml/min. As amostras em pó foram armazenadas em embalagens metálicas flexíveis com zíper (espessura 0,11mm, tamanho 10x17,5cm), vedado a vácuo e armazenado em um dessecador em temperatura ambiente.

**Tabela 2** - Resumo dos ensaios de secagem propostos pelo delineamento experimental

<b>Ensaio</b>	<b>C<sub>MALTO</sub> (%)</b>	<b>T<sub>in</sub> (°C)</b>	<b>V<sub>ALIM</sub> (g.min<sup>-1</sup>)</b>
<b>1</b>	(-) 10	(-) 70	(-) 4,0
<b>2</b>	(+) 20	(-) 70	(-) 4,0
<b>3</b>	(-) 10	(+) 90	(-) 4,0
<b>4</b>	(+) 20	(+) 90	(-) 4,0
<b>5</b>	(-) 10	(-) 70	(+) 6,0
<b>6</b>	(+) 20	(-) 70	(+) 6,0
<b>7</b>	(-) 10	(+) 90	(+) 6,0
<b>8</b>	(+) 20	(+) 90	(+) 6,0
<b>9</b>	(0) 15	(0) 80	(0) 5,0
<b>10</b>	(0) 15	(0) 80	(0) 5,0
<b>11</b>	(0) 15	(0) 80	(0) 5,0

C<sub>MALTO</sub>: Concentração de Maltodextrina; T<sub>in</sub>: Temperatura de entrada do ar de secagem; V<sub>ALIM</sub>: Vazão de alimentação

### 3.9 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes foram o rendimento do processo, o teor de água do pó obtido pós secagem, e o teor de flavonoides.

O rendimento foi calculado conforme Rocha et al. (2018), de acordo com a Equação (21), com resultados expressos em porcentagem.

$$R = \frac{M_c * (1 - X_C)}{M_A * (1 - X_A)} * 100 \quad (21)$$

Em que:

MC é a massa coletada (g);

MA é a massa alimentada (g);

XC é o teor de água da amostra coletada (g);

XA é o teor de água da amostra alimentada (g).

O teor de água e o teor de flavonoides foi quantificado de acordo com as metodologias já descritas nos tópicos 3.2.2.1 e 3.6.1.

### **3.9.1 Caracterização físico-química e de bioativos**

O pó obtido pela secagem em leito de jorro foi caracterizado quanto aos parâmetros físico-químicos de teor de água, potencial hidrogeniônico, acidez total titulável e sólidos solúveis totais, todas descritas anteriormente respectivamente nos tópicos 3.2.2.1 a 3.2.2.4. Em se tratando de análises de bioativos no que se refere a quantificação de fenólicos e taninos totais, quantificação de antocianinas e as quantificações de carotenoides e clorofilas foram realizadas de acordo com as metodologias já citadas nos itens 3.6.2 ao 3.6.4.

### **3.10 Análise estatística**

Os dados das caracterizações foram submetidos ao delineamento inteiramente casualizado e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o programa Assistat versão 7.7 (FRANCISCO; CARLOS, 2016). No planejamento experimental, os efeitos das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes foram avaliados mediante análise estatística utilizando o programa computacional Statistica versão 7.0.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ARTIGO I – MODELAGEM MATEMÁTICA E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA CINÉTICA DE FOLHAS DE BRÓCOLIS

#### RESUMO

Brócolis (*Brassica oleraceae* var. *Itálica*), também chamado de couve-brócolis ou brócolos, é uma espécie de hortaliça pertencente à família *Brassicaceae*, com grande potencial de mercado. As hortaliças são os alimentos que mais acabam perdendo parte de seu valor nutricional, devido ao descarte de cascas, sementes, talos, raízes e folhas. As folhas de brócolis fornecem vitaminas (C, K e do complexo B), minerais (cálcio, fósforo e potássio) e boas porções de fibras, além de compostos bioativos importantes como os flavonoides. O objetivo desse trabalho foi de estudar a cinética de secagem das folhas de brócolis, bem como aplicar modelos matemáticos, observando assim o comportamento das mesmas. Além de calcular as principais propriedades termodinâmicas tais quais: difusividade efetiva, entalpia, entropia e energia livre de Gibbs. Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA), Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA) e Laboratório de Fontes Renováveis de Energia (LABFREN). O modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou a cinética de secagem das folhas de brócolis, com coeficientes de determinação  $R^2 \geq 99,742$ . A difusividade efetiva variou de 4,029 a  $7,253 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ , a energia de ativação obteve um valor de 27,0671  $\text{kJmol}^{-1}$ . A variação da energia livre de Gibbs aumentou com o aumento da temperatura e foi considerada um processo não espontâneo, enquanto a entalpia e a entropia diminuíram.

**Palavras-Chave:** Secagem, entalpia, entropia, energia livre de Gibbs.

#### ABSTRACT

Broccoli (*Brassica oleraceae* var. *Itálica*), also called broccoli or broccoli, is a species of vegetable belonging to the *Brassicaceae* family, with great market potential. Vegetables are the foods that most end up losing part of their nutritional value, due to the disposal of peels, seeds, stalks, roots and leaves. Broccoli leaves provide vitamins (C, K and B complex), minerals (calcium, phosphorus and potassium) and good amounts of fiber, in addition to important

bioactive compounds such as flavonoids. The objective of this work was to study the drying kinetics of broccoli leaves, as well as apply mathematical models, thus observing their behavior. In addition to calculating the main thermodynamic properties such as: effective diffusivity, enthalpy, entropy and Gibbs free energy. The experimental tests were carried out at the Laboratory of Storage and Processing of Agricultural Products (LAPPA), Laboratory of Food Engineering (LEA) and Laboratory of Renewable Energy Sources (LABFREN). Midilli's model was the one that best fitted the drying kinetics of broccoli leaves, with determination coefficients  $R^2 \geq 99.742$ . The effective diffusivity ranged from 4.029 to  $7.253 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , the activation energy obtained a value of 27.0671 kJmol<sup>-1</sup>. The change in Gibbs free energy increased with increasing temperature and was considered a non-spontaneous process, while enthalpy and entropy decreased.

**Keywords:** Drying, enthalpy, entropy, Gibbs free energy.

## INTRODUÇÃO

O brócolis (*Brassica oleraceae* var. Itálica), também chamado de couve-brócolis ou brócolos, é uma espécie de hortaliça pertencente à família *Brassicaceae*, com grande potencial de mercado (MELO, 2015). Originário da região do Mediterrâneo, esse vegetal é reconhecido por ser rico em vitaminas e minerais, além de conter propriedades antioxidantes e substância fitoquímicas (MEENA et al, 2017). Entre os fatores que têm aumentado o interesse dos produtores por essa cultura estão o aumento da demanda por alimentos mais saudáveis (HOTZ et al., 2018), e o fato de que a produção de brócolis figura entre as olerícolas mais rentáveis nos últimos anos (RIBEIRO et al. 2019).

As hortaliças e as frutas são os alimentos que mais acabam perdendo parte de seu valor nutricional, devido ao descarte de cascas, sementes, talos, raízes e folhas, hábito que se tornou comum nas cozinhas domésticas (TEIXEIRA et al., 2015). Durante o preparo de hortaliças, o descarte de partes consideradas não comestíveis como talos, cascas, entre outras, resultam em outro tipo de perda de minerais e demais nutrientes (DAIUTO et al., 2015). De acordo com Rocha et al. (2008), cascas, talos e folhas são boas fontes de fibras e lipídios, tendo-se como exemplos as sementes de abóbora; talos de brócolis, de couve, de espinafre; cascas de banana, de laranja, de limão, de rabanete e folhas de brócolis.

As folhas de brócolis fornecem vitaminas (C, K e do complexo B), minerais (cálcio, fósforo e potássio) e boas porções de fibras. O diferencial é o sulforafano, fitoquímico que auxilia no controle do açúcar no sangue, beneficia ossos e coração, apresenta ação antioxidante e é comprovadamente inimigo de tumores (NABUCO, 2019).

Apesar de ainda existir certa resistência à alimentação alternativa, sabe-se que uma parcela significativa da população brasileira, principalmente as classes populares, esteja utilizando resíduos de alimentos em sua dieta cotidiana. Dessa forma, a utilização de cascas, talos e folhas diminui os gastos com alimentação, melhora a qualidade nutricional do cardápio e reduz o desperdício de alimentos (SOUZA et al., 2007).

Neste sentido torna-se necessária a obtenção de informações teóricas sobre o comportamento de cada produto durante a secagem. Essas informações podem ser obtidas através de simulações de secagem, utilizando os modelos matemáticos para descrever o processo de perda de água (GOMES et al., 2020).

Para que as operações de secagem e armazenamento sejam realizadas adequadamente é necessário que seja conhecida a relação entre o produto e o ar que o circunda. As plantas são higroscópicas, ou seja, elas possuem capacidade de ceder ou absorver água do ambiente. O teor de água de equilíbrio de um produto agrícola é atingido quando a pressão parcial de vapor de água deste produto se iguala com a do ar que o envolve (DINCER; ZAMFIRESCU, 2016). Esta característica é prescrita por modelos matemáticas que relacionam temperatura, umidade relativa e atividade de água da planta, sendo estudado por diversos autores na literatura (FERREIRA JÚNIOR et al., 2018; MOUSSAOUI et al., 2019; SILVA et al., 2019).

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho é estudar a cinética de secagem das folhas de brócolis, bem como aplicar modelos matemáticos, observando assim o comportamento das mesmas. Além de calcular as principais propriedades termodinâmicas tais quais: difusividade efetiva, entalpia, entropia e energia livre de Gibbs.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Local dos experimentos**

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) pertencente a Unidade Acadêmica de Engenharia de Agrícola, no Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA) pertencente a Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos e no Laboratório de Química de Biomassa

(LQB) pertencente a Unidade Acadêmica de Química, ambos na Universidade Federal de Campina Grande.

### **Matéria-Prima**

As folhas de brócolis (*Brassica oleracea* var. *Itálica*) foram obtidas através de fornecedores locais que possuem plantação em áreas circunvizinhas da cidade de Campina Grande – PB. Antes de iniciar o processo de secagem propriamente dito, as folhas de brócolis foram recepcionadas, selecionadas e sanitizadas com objetivo de evitar uma matéria-prima de má qualidade. Portanto, as que apresentavam injúrias mecânicas, queimaduras e contaminações foram devidamente descartadas.

### **Cinética de secagem**

Para a secagem, as amostras das folhas foram colocadas em cestas teladas, formando uma altura de camada de 0,5 cm.

As amostras, com três repetições, foram submetidas à secagem em secador convectivo com circulação de ar nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e velocidade do ar de 1 m/s. As cinéticas de secagem foram realizadas pesando-se as amostras em intervalos regulares de 5, 10, 15, 30 e 60 min, até atingirem o equilíbrio dinâmico com o ar de secagem. Em seguida, foi determinado o teor de água das amostras em estufa a 105 °C (IAL, 2008), sendo calculadas as razões de umidade (Equação 1) e traçadas as curvas da razão do teor de água em função do tempo de secagem.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (1)$$

Em que:

RX - razão do teor de água do produto (adimensional);

X - teor de água do produto (b.s.);

X<sub>i</sub> - teor de água inicial do produto (b.s.);

X<sub>e</sub> - teor de água de equilíbrio do produto (b.s.).

Os modelos matemáticos descritos na Tabela 1 foram ajustados aos dados experimentais das curvas de secagem através de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, utilizando-se o programa Statistica 7.0.

**Tabela 1-** Modelos matemáticos utilizados para ajustar os dados da cinética de secagem das folhas de brócolis.

Modelo	Equação	
Aproximação da difusão	$RX = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	(2)
Exponencial Dois termos	$RX = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	(3)
Henderson e Pabis	$RX = a \exp(-kt)$	(4)
Lewis	$RX = \exp(-kt)$	(5)
Logarítmico	$RX = a \exp(-kt) + c$	(6)
Midilli	$RX = a \exp(-kt^n) + bt$	(7)
Newton	$RX = \exp(-kt)$	(8)
Page	$RX = \exp(-kt^n)$	(9)
Peleg	$RX = 1 - t/(a + bt)$	(10)
Silva et al.	$RX = \exp(-at - bt^{1/2})$	(11)

FONTE: Autor (2022)

Para seleção do melhor modelo matemático foram avaliados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o desvio quadrático médio - DQM (Equação 12) e o qui-quadrado -  $\chi^2$  (Equação 13). Sendo considerado como ajuste satisfatório o modelo que apresentou os maiores valores de  $R^2$  e os menores valores de DQM e  $\chi^2$ .

$$DQM = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{N - n} \sum_{i=1}^N (RX_{exp,i} - RX_{pred,i})^2 \quad (13)$$

Em que:

DQM - desvio quadrático médio;

$\chi^2$  - qui-quadrado;

$RX_{pred}$  - razão do teor de água predita pelo modelo;



$RX_{exp}$  - razão do teor de água experimental;

$N$  - número de observações.

$n$  - número de constantes do modelo.

O cálculo da difusividade efetiva foi obtido mediante a equação de difusão para sistema de coordenadas retangulares (CRANK, 1975), conforme Equação 14. Considerou-se uma distribuição de teor de água inicial, uniforme e sem a presença de qualquer resistência térmica e a solução analítica da lei de Fick para uma placa plana infinita, foi estudada na forma de séries infinitas (Equação 15).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{ef} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{ef} \frac{\partial Z}{\partial z} \right) \quad (14)$$

$$RX = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp \left[ -(2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{ef}}{L^2} t \right] \quad (15)$$

Em que:

$RX$  – razão do teor de água do produto (adimensional);

$n$  - número de termos

$D_{ef}$  – difusividade efetiva ( $m^2 s^{-1}$ );

$L$  – espessura da camada (m);

$t$  – tempo (s).

Como a Equação 14 representa uma série de termos infinitos, torna-se necessário recorrer a um software de cálculo estatístico para a determinação da difusividade efetiva. Neste caso utilizou-se o programa Statistica 7.0 por meio de regressão não-linear e método Quasi-Newton, com aproximação de quatro termos, a partir de onde não se observou haver mais variação do valor de  $D_{ef}$ .

Foi avaliado o efeito da temperatura de secagem na difusividade efetiva por meio da equação do tipo de Arrhenius (Equação 16), que descreve a relação entre a energia de ativação e a velocidade em que a reação ocorre.

$$D_{ef} = D_0 \exp \left( \frac{E_a}{RT} \right) \quad (16)$$

Em que:

$D_{ef}$  - difusividade efetiva ( $m^2 s^{-1}$ );

$D_0$  - fator pré-exponencial ( $m^2 s^{-1}$ );

$E_a$  - energia de ativação ( $J mol^{-1}$ );

$R$  - constante universal dos gases,  $8,314 J mol^{-1} K^{-1}$ ;

$T$  - temperatura (K).

As propriedades termodinâmicas do processo de secagem (entalpia, entropia e energia livre de Gibbs) foram calculadas a partir das Equações 17, 18 e 19, respectivamente (CORRÊA *et al.*, 2012).

$$\Delta H = E_a - RT \quad (17)$$

$$\Delta S = R \left( \ln D_0 - \ln \frac{k_b}{h\nu} - \ln T \right) \quad (18)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (19)$$

Em que:

$\Delta H$  - variação de entalpia ( $J mol^{-1}$ );

$\Delta S$  - variação de entropia ( $J mol^{-1} K^{-1}$ );

$\Delta G$  - variação de energia livre de Gibbs ( $J mol^{-1}$ );

$E_a$  - energia de ativação ( $J mol^{-1}$ );

$R$  - constante universal dos gases,  $8,314 J mol^{-1} K^{-1}$ ;

$D_0$  - fator pré-exponencial ( $m^2 s^{-1}$ );

$k_B$  - constante de Boltzmann,  $1,38 \times 10^{-23} (J K^{-1})$ ;

$h_P$  - constante de Planck,  $6,626 \times 10^{-34} (J s)$ ;

$T$  - temperatura (K).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os valores referentes aos tempos de secagem e teor de umidade final das amostras de folha de brócolis. Nos experimentos, o tempo de secagem tendeu a diminuir com o aumento da temperatura e essa diminuição no tempo de secagem com o aumento na temperatura do ar de secagem foi relatada para muitos produtos agrícolas similares

como folhas de hortelã-pimenta (ASHTIANI et al., 2017), feno grego (JAWAKE et al., 2018) açafraão (KARTHIKEYAN; MURUGAVELH, 2018), pariparoba (DORNELES et al., 2019) e marroio marroquino (BAHAMMOU et al., 2019),

**Tabela 2** - Tempos de secagem e teor de umidade das amostras de folha de brócolis obtidas em diferentes temperaturas.

<b>Temperatura</b> (°C)	<b>Tempo de secagem</b> (min)	<b>Teor de umidade</b> (%b.u.)	<b>Teor de umidade</b> (%b.s.)
50	540	7,01 <sup>a</sup> ± 0,126	8,49 <sup>a</sup> ± 0,112
60	480	6,94 <sup>a</sup> ± 0,184	8,12 <sup>a</sup> ± 0,122
70	240	6,26 <sup>a</sup> ± 0,155	7,32 <sup>a</sup> ± 0,098

As médias com letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente ( $p \leq 0,05$ ). Média ± Desvio Padrão.

As amostras das folhas de brócolis possuíram um valor final de teor de umidade entre 7,32 e 8,49% b.s. Bahammou e seus colaboradores (2019) encontraram valores entre 6,16 e 6,99 b.s. para as folhas do marroio marroquino e Jawake e seus colaboradores (2018) obtiveram um teor de umidade final nas folhas de feno grego nos valores de 6,31 a 7,54% b.s.

Na Tabela 3 estão descritos os parâmetros de ajuste dos modelos de secagem aos dados obtidos na cinética da folha de brócolis nas temperaturas analisadas.

**Tabela 3** - Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados de secagem das folhas de brócolis mais os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), Desvio Quadrático Médio (DQM) e valores do qui-quadrado ( $\chi^2$ ).

<b>Modelo</b>	<b>T (°C)</b>	<b>Parâmetros</b>			<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	<b>DQM</b>	<b><math>\chi^2</math></b>
		<b>a</b>	<b>k</b>	<b>b</b>			
<b>Aproximação da difusão</b>	50	-58,8808	0,0132	0,9933	99,8750	0,0208	0,0002
	60	-42,8715	0,0173	0,9904	99,8960	0,0139	0,0001
	70	-135,4965	0,0283	0,9951	98,8980	0,0223	0,0004
<b>Exponencial de dois termos</b>		<b>a</b>	<b>k</b>				
	50	0,0039	2,2990		99,6820	0,0168	0,0004
	60	0,0029	4,0121		99,7060	0,0115	0,0004
	70	0,0022	7,2620		98,6080	0,0083	0,0019
		<b>a</b>	<b>k</b>				
	50	1,0051	0,0090		99,6940	0,0216	0,0004

<b>Henderson e Pabis</b>	60	1,0145		0,0119	99,7500	0,0207	0,0003		
	70	1,0459		0,0166	98,9420	0,0371	0,0014		
<b>k</b>									
	50			0,0090	99,6900	0,0179	0,0004		
<b>Lewis</b>	60			0,0116	99,7200	0,0118	0,0004		
	70			0,0157	98,6380	0,0092	0,0018		
<b>a                      k                      c</b>									
	50	1,0287		0,0084	-0,0306	99,8060	2,09E-7	0,0003	
<b>Logarítmico</b>	60	1,0328		0,0112	-0,0246	99,8380	2,13E-7	0,0002	
	70	1,1053		0,0140	-0,0777	99,4540	4,2xE-16	0,0008	
<b>a                      k                      n                      b</b>									
	50	0,9716	0,0048	1,1265	-0,0001	99,8520	0,0020	0,0001	
<b>Midilli</b>	60	0,9827	0,0069	1,1119	-0,0001	99,9040	0,0027	0,0001	
	70	0,5181	0,1242	0,0001	-0,0022	99,7420	0,0031	0,0001	
<b>k</b>									
	50			0,0090	99,6900	0,0178	0,0004		
<b>Newton</b>	60			0,0117	99,7190	0,0117	0,0003		
	70			0,0157	98,6380	0,0092	0,0017		
<b>k    n</b>									
	50			0,0065	1,0691	99,7940	0,0247	0,0003	
<b>Page</b>	60			0,0081	1,0823	99,8640	0,0178	0,0002	
	70			0,0060	1,2338	99,7060	0,0250	0,0004	
<b>a    b</b>									
	50	95,5814			0,7611	99,0820	0,0151	0,0012	
<b>Peleg</b>	60	71,8557			0,7799	98,8170	0,0233	0,0015	
	70	61,6597			0,6680	98,5600	0,0242	0,0019	
<b>a    b</b>									
	50				-0,0214	0,0607	99,6900	0,0178	0,0004
<b>Silva et al.</b>	60				-0,1660	0,3551	99,7190	0,0117	0,0003
	70				-0,1283	0,2880	98,6380	0,0092	0,0018

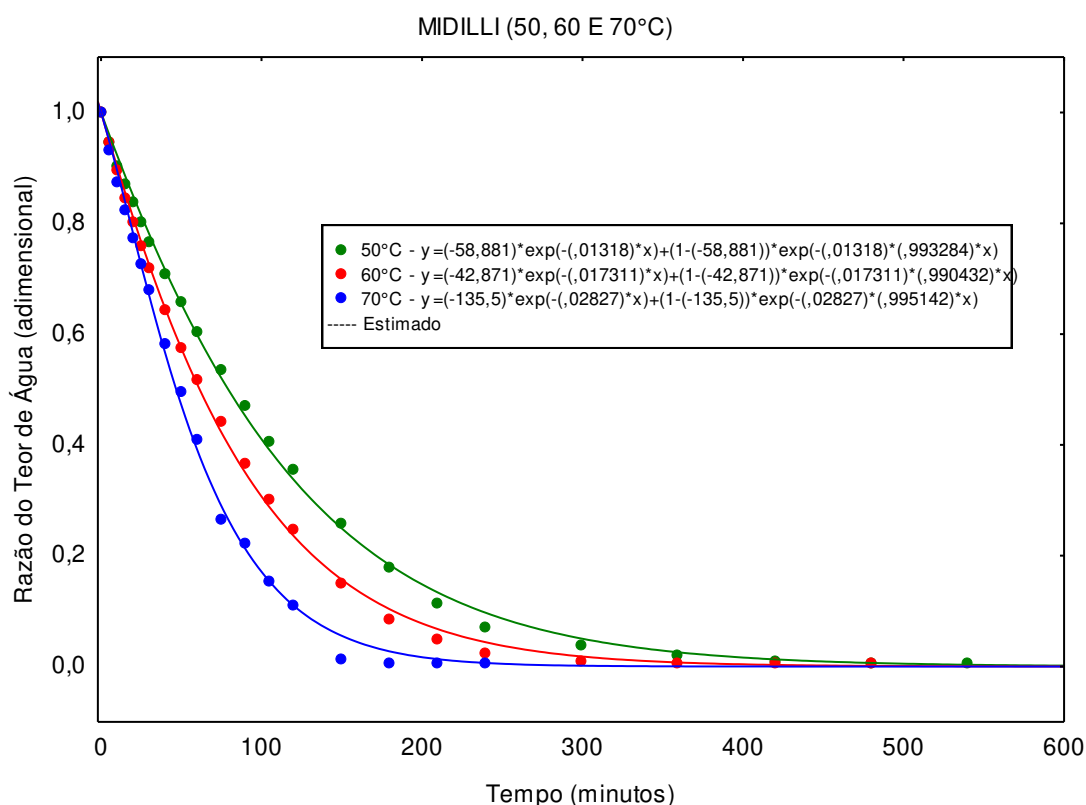
A partir da Tabela 3 nota-se que o parâmetro k de todos os modelos apresentados cresceram com o aumento da temperatura empregada na cinética. De acordo com Corrêa et al. (2012) o parâmetro “k” tende a aumentar visto que maiores temperaturas acarretam maiores taxas de secagem chegando ao teor de água de equilíbrio em menor tempo de submissão do produto ao ar de secagem. Adicionalmente, valores de DQM < 0,03 e  $\chi^2$  < 0,002 confirmam

que, de maneira geral, todos os modelos se mostraram capazes de prever com boa precisão as cinéticas de secagem das folhas de brócolis, no domínio experimental.

É possível observar de igual maneira que as variações do Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) variaram de 99,682 à 99,852%, de 98,817 à 99,904% e de 98,56 à 99,742, para as temperaturas de 50, 60 e 70°C, respectivamente, indicando que os modelos descrevem bem os processos de secagem estudados. Araújo e seus colaboradores (2017), afirmam em seus estudos que valores de  $R^2$  superiores a 98,0% indicam que os modelos matemáticos representam de maneira satisfatória o comportamento de secagem.

Os critérios utilizados para a escolha do modelo que mais se adequou aos dados foram os maiores valores do Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e os menores valores do Desvio Quadrático Médio (DQM) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ). A partir da análise dos parâmetros, foi decidido que o modelo mais satisfatório para os dados encontrados foi o modelo de Midilli com  $R^2 \geq 99,7420$ ,  $DQM \leq 0,0020$  e  $\chi^2 \leq 0,0001$ .

Na Figura 1 encontra-se os dados experimentais e preditos com ajustes pelo melhor modelo (Midilli) das folhas de brócolis, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C. Essas curvas são uma relação entre a razão do teor de água (adimensional) e o tempo de secagem (minutos). Pode-se observar que a temperatura teve influência sobre a secagem das amostras com as curvas em posições distantes umas das outras, havendo, no entanto, diferenças no tempo final de secagem, até que o equilíbrio fosse alcançado. Tendências semelhantes foram relatadas para a secagem em leite fluidizado de espinafre, acelga e alho-poró (GONELI et al., 2014).



**Figura 1:** Representação dos ajustes do modelo de Midilli aos dados de secagem das amostras de folha de brócolis.

A difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) é um dos índices mais importantes para avaliar a cinética de secagem de produtos agrícolas, visto que permite uma avaliação e comparação da velocidade de secagem e sua dependência da temperatura (BOTELHO et al., 2018). As variações nesta propriedade implicam em alterações durante a difusão da água nos capilares dos produtos agrícolas que, juntamente com a vibração mais intensa das moléculas de água, contribuem para uma difusão mais rápida (GONELI et al., 2014).

A Tabela 4 exibe os valores de difusividade efetiva para as temperaturas de 50, 60 e 70°C das amostras de folhas de brócolis.

**Tabela 4** – Difusividade efetiva das amostras de folha de brócolis em diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Difusividade efetiva ( $m^2s^{-1}$ )	R <sup>2</sup> (%)
50	4,029E-10	93,5180
60	5,269E-10	96,3710
70	7,253E-10	96,3650

Os valores de  $D_{ef}$  indicaram que o aumento da temperatura interfere fortemente no aumento da perda de água das folhas, reduzindo o tempo de secagem. Fenômeno observado por Martins e colaboradores (2015), trabalhando com folhas de timbó (*Serjania marginata* C.) cujo o  $D_{ef}$  elevou de  $0,6630 \times 10^{-11}$  para  $12,0712 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Silva et al. (2017) explicam que este aumento do  $D_{ef}$  ocorre de acordo com a temperatura, concentração, vibração das moléculas de água e volume do produto.

A energia de ativação consiste na facilidade das moléculas de água em superar a barreira de energia durante a migração no interior do produto (MORAIS et al., 2013). Por meio da energia de ativação é possível determinar as propriedades termodinâmicas que fornecem informações sobre o mecanismo de controle de sorção de vapor d'água (VIGANÓ et al., 2012).

Na Tabela 5 estão exibidos os parâmetros da equação de Arrhenius (ajustado aos dados de difusividade efetiva) das amostras das folhas de brócolis.

**Tabela 5** - Parâmetros da equação de Arrhenius (ajustado aos dados de difusividade efetiva) das amostras das folhas de brócolis.

$D_0 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$	$E_a \text{ (kJmol}^{-1}\text{)}$	$R^2$
9,46E-6	27,0671	99,0800

A energia de ativação ( $E_a$ ) foi obtida pelo ajuste do modelo de Arrhenius e seu valor foi de  $27,0671 \text{ kJmol}^{-1}$ , conforme a Equação 12. Este resultado foi semelhante ao de Silva et al. (2015) trabalhando com folhas de jenipapo (*Genipa americana* L.), no qual obteve  $E_a$  de  $33,87 \text{ kJmol}^{-1}$  e inferior ao de Martins et al. (2018) com folhas de amora preta (*Morus nigra* L.) de  $66,08 \text{ kJmol}^{-1}$ . O valor de  $E_a$  inferior para as folhas de brócolis evidenciou a necessidade de menos energia para desencadear o processo de difusão líquida quando comparado com as folhas de amora preta. Os diferentes valores de energia de ativação para diferentes produtos agrícolas podem ser atribuídos a características físicas e biológicas dos produtos (MARTINS et al., 2015).

O conhecimento das propriedades termodinâmicas nos processos de secagem de produtos agrícolas é importante fonte de informação para projetar equipamentos de secagem, calcular a energia requerida nesse processo, estudar as propriedades da água adsorvida e avaliar a microestrutura dos alimentos e o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos alimentos (CORRÊA et al., 2012).

Na Tabela 6 verifica-se as propriedades termodinâmicas, em que, a entalpia ( $\Delta H$ ) reduziu de  $24,3804$  para  $24,2141 \text{ kJmol}^{-1}$  com o incremento da temperatura ( $50, 60$  e  $70^\circ\text{C}$ ).

Este fato indica que é necessária uma quantidade menor de energia para que a secagem ocorra em temperaturas mais elevadas (MARTINS et al., 2015).

**Tabela 6** - Valores para as variações de entalpia ( $\Delta H$ ), entropia ( $\Delta S$ ) e energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) para diferentes condições de secagem das amostras de folha de brócolis.

Temperatura (°C)	$\Delta H$ (kJmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\Delta S$ (kJmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\Delta G$ (kJmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
50	24,3804	-0,3418	134,8199
60	24,2973	-0,3420	138,2388
70	24,2141	-0,3423	141,6602

O valor de entropia ( $\Delta S$ ) foi reduzido de -0,3418 para -0,3423 kJmol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> com o aumento da temperatura. Corrêa et al. (2012) relatam que este comportamento é esperado, pois a redução da temperatura acarreta em menor excitação das moléculas de água resultando em um aumento da ordem do sistema água e folha. Os valores negativos de entropia são atribuídos à existência de adsorção química e/ou modificações estruturais do adsorvente (MOREIRA et al., 2008).

Ainda na tabela 6, nota-se que os valores da energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) aumentaram com a elevação da temperatura dos métodos de secagem (134,8199 a 141,6602). Neste caso, o processo de secagem não foi espontâneo, sendo necessária a adição de energia proveniente do ar em que as folhas de brócolis estivessem envoltas para que ocorresse a redução do teor de água. Conforme esclarece Oliveira et al. (2015), a energia livre de Gibbs busca medir a totalidade de energia associada a um sistema termodinâmico e o seu valor positivo é explicado por uma adição de energia que envolve o produto para a ocorrência da mudança de fase (líquido para vapor).

## CONCLUSÃO

Mediante a realização do presente estudo foi possível concluir que a cinética de secagem das folhas de brócolis em secador convectivo foi conduzida com êxito constando que todos os modelos testados proporcionaram ajustes satisfatórios aos dados experimentais com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superior a 99%.

O modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou a cinética de secagem das folhas de brócolis. A secagem apresentou uma energia de ativação de 27,0671kJ mol<sup>-1</sup>.

A variação da energia livre de Gibbs aumentou com o incremento da temperatura, enquanto que a entalpia e entropia diminuíram.



As variações na entalpia, entropia e energia livre de Gibbs, acarretadas pela utilização de temperaturas de secagem na faixa entre 50 e 70 °C, se situaram em valores aproximados de 0,60, 0,15 e 4,83%, respectivamente.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; FILHO, C. P.H.; MARTINS, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, p. 448-457, 2017.

ASHTIANI, S. H. M.; SALARIKIA, A.; GOLZARIAN, M. R. Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot-air and infrared treatments. **Information Processing in Agriculture**. n. 1, v. 4, p. 128–139, 2017.

BAHAMMOU, Y.; TAGNAMAS, Z.; LAMHARRAR, A.; IDLIMAM, A. Thin-layer solar drying characteristics of Moroccan horehound leaves (*Marrubium vulgare* L.) under natural and forced convection solar drying. **Solar Energy**. n. 1, v. 188, p. 958–969, 2019.

BOTELHO, F. M. et al. Cinética de secagem de grãos de soja: influência varietal. **Engenharia na Agricultura**, v.26, n.1, p. 13-25, 2018.

CORRÊA, P. C., Oliveira, G. H. H., Botelho, F. M., Goneli, A. L. D., & Carvalho, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v.57, n.5, p.595-601, 2012.

CRANK, J. The mathematics of diffusion (2nd ed., p. 414). **Oxford: Clarendon Press**. 1975.

DAIUTO, E. R.; VIEITES, R. L.; PIGOLI, D. R.; CARVALHO, L. R. Estabilidade de minerais em hortaliças submetidas a diferentes métodos de cozimento. **Nativa**, Sinop, v. 03, n. 02, p. 102-108, 2015.

DINCER, İ.; ZAMFIRESCU, C. **Drying phenomena: theory and applications**. West Sussex: John Wiley & Sons. 2016.

DORNELES, L. N. S.; GONELI, A. L. D.; CARDOSO, C. A. L.; SILVA, C. B.; HAUTH, M. R.; OBA, G. C.; SCHOENINGER, V. Effect of air temperature and velocity on drying kinetics and essential oil composition of *Piper umbellatum* L. leaves. **Industrial Crops & Products** 142 111846, 2019.

FERREIRA JÚNIOR, W. N., RESENDE, O., DE OLIVEIRA, D. E., COSTA, L. M. Isotherms and isosteric heat desorption of *Hymenaea stigonocarpa* Mart. seeds. **Journal of Agricultural Science**, v.10, n. 10, p.504-12, 2018.

GOMES, M. E. M.; ALBUQUERQUE, A. P.; RODRIGUES, T. J. A.; WANDERLEY, D. M. A.; ROCHA, A. P. T.; SILVA, O. S. Predição de modelos cinéticos de secagem defolhas daerva cidreira em secador convectivo. **Research, Society and Development**, v. 9, n.2, e86922052, 2020 (CC BY 4.0).

GONELI, A. L. D. et al. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesq. Agropec. Trop.**, v. 44, n. 1, p. 56 -64, 2014.

HOTZ, V. J.; JOHANSSON, P.; KARIMI, A. Parenthood, Family Friendly Workplaces, and the Gender Gaps in Early Work Careers, No. w24173, **National Bureau of Economic Research**, 2018.

Instituto Adolfo Lutz. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos** (1st ed.). São Paulo: IAL. 2008.

JAWAKE, P. D.; MUDGAL, V. D.; RAJPUROHIT, D. Fluidized bed drying kinetics of fenugreek (*Trigonella foenum graecum* L.) leaves. **International J. Seed Spices**. n. 1, v. 8, p. 15-20, 2018.

KARTHIKEYAN, A. K.; MURUGAVELH, S. Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (*Curcuma longa*) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer. **Renewable Energy**. n. 1, v. 128, p. 305-312, 2018.

MARTINS, E. A. S.; GONELI, A. L. D.; GONÇALVES, A. A.; HARTMANN FILHO, SIQUEIRA, V. C.; OBA, G. C. Cinética de secagem de folhas de amora preta. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** 22 (8). Ago 2018

MARTINS, E. A. S.; LAGE, E. Z.; GONELI, A. L. D.; HARTMANN FILHO, C. P.; LOPES, J. G. Cinética de secagem de folhas de timbó (*Serjania marginata* Casar). **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** 19 (3). Mar 2015.

MELO, R. A. C. A cultura dos brócolis. – 153 p. Brasília, DF: **Embrapa**, 2015.

MEENA, V. S.; MEENA, S. K.; VERMA, J. P.; KUMAR, A.; AERON, A.; MISHRA, P. K.; BISHT, J. K.; PATTANAYAK, A.; NAVEED, M.; DOTANIYA, M. L. Plant beneficial rhizospheric microorganism (PBRM) strategies to improve nutrients use efficiency: A review. **Ecological Engineering.** n. 1, v. 107, p. 8-32, 2017.

MORAIS, S. J. S.; DEVILLA, I. A.; FERREIRA, D. A.; TEIXEIRA, I. R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). **Revista Ciência Agronômica**, v.44, p.455-463, 2013.

MOREIRA, S. de A. **Adsorção de íons metálicos de efluente aquoso usando bagaço do pedúnculo de caju: estudo de batelada e coluna de leito fixo.** 2008. 133 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental) - Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

MOUSSAOUI, H.; BAHAMMOU, Y.; IDLIMAM, A.; LAMHARRAR, A.; ABDENOURI, N. Investigation of hygroscopic equilibrium and modeling sorption isotherms of the argan products: A comparative study of leaves, pulps, and fruits. **Food and bioproducts processing**, v.114, n.1, p.12-22. 2019.

NABUCO, Cristina. Benefícios e modos de uso de couve, brócolis e mais vegetais verde-escuros. **Veja Saúde.** 2019. Disponível em: <https://saude.abril.com.br/alimentacao/couve-espinafre-brocolis-saiba-tudo-sobre-os-vegetais-verde-escuros/>>. Acesso em 05 de out. de 2021.

OLIVEIRA, A. D. S.; de FIGUEIRÊDO, R. M.; QUEIROZ, A. J. D. M.; BRITO, J. G. D. Estabilidade da polpa do *Cereus jamacaru* em pó durante o armazenamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 147-153, 2015.

RIBEIRO, C; MORAIS, LCC; MENDES, AR; MARCOMINI, LRS; GONÇALVES, IC. Pequenos mercados, grandes valores! – Ameixa, berinjela, brócolis, couve-flor, mirtilo e 10 pitaia prometem ganhar ainda mais espaço no Brasil. **Brasil Hortifruti**, v.17, n.188, p.10-14, 2019.

ROCHA, S.A. et al. Fibras e lipídios em alimentos vegetais oriundos do cultivo orgânico e convencional. **Revista Simbio-Logias**, v.1, n.2, p.1-9, 2008.

SILVA, F. P. DA; SIQUEIRA, V. C.; MARTINS, E. A. S.; MIRANDA, F. M. N.; MELO, R. M. Thermodynamic properties and drying kinetics of *Bauhinia forficata* Link leaves. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, p.61-67, 2017.

SILVA, L. A.; RESENDE, O. VIRGOLINO, Z. Z.; BESSA, J. F. V.; MORAIS, W. A.; VIDAL, V. M. Cinética de secagem e difusividade efetiva em folhas de jenipapo (*Genipa americana* L.). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.17, p.953-963, 2015.

SILVA, N. C. B.; DOS SANTOS, S. G.; DA SILVA, D. P.; SILVA, I. L.; RODOVALHO, R. S. Drying kinetics and thermodynamic properties of boldo (*Plectranthus barbatus* Andrews) leaves. **Científica**, v. 47, n.1, p.1-7. 2019.

SOUZA, P. J.; NOVELLO, D.; ALMEIDA, J. M.; QUINTILIANO, D. A.. Análise sensorial e nutricional de torta salgada elaborada através do aproveitamento alternativo de talos e cascas de hortaliças. **Alimentos e Nutrição**, v. 18, n. 1, p. 55-60, 2007.

TEIXEIRA, V.; PEREIRA, C.; SAMPAIO, C. Avaliação do Desperdício de Hortaliças e Frutas em um Restaurante comercial de Viçosa, MG. **Anais II SIMPAC**, Viçosa - MG, v. 2, n. 1, p. 287–292, 2015.

VIGANÓ, J.; AZUARA, E.; TELIS, V. R. N.; BERISTAIN, C. I.; JIMÉNEZ, M.; TELIS-ROMERO, J. Role of enthalpy and entropy in moisture sorption behavior of pineapple pulp powder produced by different drying methods. **Thermochimica Acta**, v.528, p.63-71, 2012.

## 4.2 ARTIGO II – OBTENÇÃO DO EXTRATO SECO EM LEITO DE JORRO DE FOLHA DE BRÓCOLIS

### RESUMO

Brócolis (*Brassica oleracea* var. *Itálica*) é uma hortaliça bem produzida no mundo inteiro que possui inúmeros compostos bioativos em sua composição. No entanto, ainda é pouca a destinação dos subprodutos dos brócolis, como as folhas. Elas que possuem, de mesma maneira que a hortaliça, compostos bioativos em sua composição. Extrair esses compostos da composição de subprodutos é agregar valor, tornando interessante que um número cada vez maior de soluções para o aproveitamento dos mesmos seja proposto. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi obter um extrato seco alimentício da folha de brócolis por meio do processo de secagem em leito de jorro para possíveis aplicações em outro aspecto da indústria alimentícia. Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA), Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA) e Laboratório de Fontes Renováveis de Energia (LABFREN). Foram realizadas análises físico-químicas e químicas da folha de brócolis, foram obtidos o extrato hidroalcolólico e o extrato concentrado da folha de brócolis, estas de mesma maneira analisadas e ainda com a adição de análises de bioativos. A secagem do extrato foi efetuada em leito de jorro com auxílio de um delineamento experimental (DOE)  $2^3 + 3$  experimentos no ponto central. Pode-se concluir que a média do rendimento dos pós do extrato concentrado de folhas de brócolis após secagem em leito de jorro se encontrou próximo a 50%, o que é considerado satisfatório. O teor de flavonoides foi em média 48,340mg/100g, sendo esse um valor considerado elevado para as condições. Os flavonoides foi uma variável dependente foi estatisticamente significativa ao processo, portanto, é possível afirmar que o pó de folhas de brócolis possui propriedades antioxidantes.

**Palavras-Chave:** *Brassica oleracea*, extração, secagem.

### ABSTRACT

Broccoli (*Brassica oleracea* var. *Italica*) is a well-produced vegetable worldwide that has numerous bioactive compounds in its composition. However, the destination of broccoli by-

products, such as leaves, is still little. They have, in the same way as vegetables, bioactive compounds in their composition. Extracting these compounds from the composition of by-products is adding value, making it interesting that an increasing number of solutions for their use are proposed. Therefore, the objective of this work was to obtain a dry food extract of broccoli leaf through the spouted bed drying process for possible applications in another aspect of the food industry. The experimental tests were carried out at the Laboratory of Storage and Processing of Agricultural Products (LAPPA), Laboratory of Food Engineering (LEA) and Laboratory of Renewable Energy Sources (LABFREN). Physicochemical and chemical analyzes of the broccoli leaf were performed, the hydroalcoholic extract and the concentrated extract of the broccoli leaf were obtained, these were analyzed in the same way and with the addition of bioactive analyzes. The drying of the extract was carried out in a spouted bed with the aid of an experimental design (DOE)  $2^3 + 3$  experiments at the central point. It can be concluded that the average yield of powders from the concentrated extract of broccoli leaves after drying in a spouted bed was close to 50%, which is considered satisfactory. The flavonoid content was on average 48,340mg/100g, which is considered a high value for the conditions. The flavonoids were a dependent variable and was statistically significant to the process, therefore, it is possible to affirm that the broccoli leaf powder has antioxidant properties.

**Keywords:** *Brassica oleracea*, extraction, drying.

## INTRODUÇÃO

O brócolis (*Brassica oleracea* var. *Itálica*), também chamado de couve-brócolis ou brócolos, é uma espécie de hortaliça pertencente à família *Brassicaceae*, com grande potencial de mercado (RIBEIRO et al. 2019), cultivada em diversas partes do mundo, com uma produção anual em torno de 19 milhões de toneladas. No Brasil, é cultivada principalmente nas regiões sul e sudeste e no total tem-se uma produção anual de 64,6 mil toneladas, tendo o Estado de São Paulo como o principal produtor desta hortaliça (ANUÁRIO BRASILEIRO DE HORTI & FRUTI, 2019). É um alimento nutritivo reconhecido, rico em antioxidantes naturais, incluindo vitaminas, minerais, glucosinolatos, flavonoides e fenólicos (CASTILLEJO et al., 2020). Seu consumo tem aumentado constantemente ano após ano, em parte devido à sua presença de muitos compostos promotores da saúde (KACZMAREK et al., 2019).

No entanto, a destinação imprópria para os resíduos do processamento de brócolis, cultivados em larga escala em quase todo o Brasil, são bastante expressivas. Cerca de um terço da produção global de alimentos não é consumido devido a perdas e desperdícios que representam 1.300 milhões de toneladas, sendo cerca de 40% desse total de perdas sendo frutas e legumes, entre outros alimentos (FAO, 2019). Portanto, é muito importante que um número cada vez maior de soluções para o aproveitamento dos mesmos seja proposto. Assim sendo, as folhas de brócolis também podem ser utilizadas, contudo, ainda não é uma prática comum consumir as folhas desse vegetal (PENA, 2018).

Extratos de folhas de brócolis contendo glucosinolatos, flavonoides e compostos fenólicos podem ser usados para enriquecer diversas matrizes alimentares (RADÜNZ et al., 2020). Os métodos de extração destes compostos variam, e os mais convencionais incluem a necessidade de processos como maceração e extrações líquido-líquido, o que implica na utilização de solventes orgânicos como metanol e acetona. Por este motivo, técnicas inovadoras para extração de compostos bioativos têm sido exploradas a fim de possibilitar alternativas verdes, em que solventes ambientalmente amigáveis (como óleos vegetais) podem ser usados (GOULA et al., 2017).

As tecnologias de secagem são operações unitárias muito importantes para a redução do teor de umidade com grande aplicação no setor de fabricação de alimentos. Os produtos finais são tipicamente na forma de pó, flocos, grânulos, folhas ou partículas em várias formas, dependendo da exigência do fabricante e do tipo de tecnologias de secagem usadas no processo (MENON; STOJCESKA, 2020). Portanto, diante desse contexto o objetivo desse trabalho é de obter um extrato seco alimentício da folha de brócolis por meio do processo de secagem em leito de jorro para possíveis aplicações em outro aspecto da indústria alimentícia.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Locais dos experimentos**

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) pertencente a Unidade Acadêmica de Engenharia de Agrícola, no Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA) pertencente a Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos e no Laboratório de Química de Biomassa



(LQB) pertencente a Unidade Acadêmica de Química, ambos na Universidade Federal de Campina Grande.

## **Materiais**

### **Matéria-Prima**

As folhas de brócolis (*Brassica oleracea* var. *Itálica*) foram obtidas através de fornecedores locais que possuem plantação em áreas circunvizinhas da cidade de Campina Grande – PB. Elas foram recepcionadas, selecionadas e sanitizadas com objetivo de evitar uma matéria-prima de má qualidade. Portanto, as que apresentavam injúrias mecânicas, queimaduras e contaminações foram devidamente descartadas.

## **Métodos**

### **Caracterização da Matéria-Prima**

#### **Caracterização das folhas de brócolis**

As folhas de brócolis *in natura* foram caracterizadas, em triplicata, quanto aos seguintes parâmetros físico-químicos, físicos e químicos.

#### **Teor de água**

O teor de água foi determinado por secagem de 5 g de amostra à temperatura de 105°C, até peso constante, através da metodologia descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (2008).

#### **Potencial hidrogeniônico (pH)**

Para a determinação do pH das amostras foi utilizado um medidor de pH da marca Tecnal, modelo TEC-2, previamente calibrado com soluções tampão de pH 4,0 e 7,0, sendo feita uma diluição da amostra na proporção de 1:5 m/v.

### **Acidez total titulável**

Para a determinação da acidez total titulável foi utilizado a metodologia descrita no manual do Instituto Adolfo Lutz (2008), pelo método acidimétrico cujas amostras foram tituladas com solução padronizada de NaOH 0,1 M e os resultados expressos em porcentagem de ácido cítrico.

### **Sólidos solúveis totais**

Os sólidos solúveis totais foram determinados segundo a metodologia descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (2008).

### **Cinzas**

As cinzas foram determinadas segundo a metodologia descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (2008), por calcinação em mufla a 600°C sendo o resultado expresso em porcentagem (%).

### **Teor de extrativos**

O teor de extrativos foi realizado de acordo com a metodologia de Oliveira et al., (2013). Para a extração Etanol/tolueno utilizou-se o auxílio de um extrator Soxhlet, onde 5 gramas das folhas foram deixados em refluxo até a completa extração, por 48 horas, ou até que a solução no interior do Soxhlet não apresentasse mais coloração. A matéria extraída foi calculada como a razão percentual da massa de resíduo seco para a massa de matéria vegetal, com a média de três medidas.

### **Determinação de perda por dessecação**

A determinação da perda por dessecação foi realizada pelo método gravimétrico segundo procedimento descrito por Souza et al., 2007.

## **Secagem das folhas de brócolis**

As folhas foram secas em estufa de circulação de ar à 60°C e posteriormente inseridas em um moinho de facas para a obtenção de um pó com granulometria desejada, onde, por conseguinte foram conservadas em recipiente fechado e ao abrigo da luz.

## **Distribuição Granulométrica**

A análise granulométrica foi realizada através do peneiramento de 50g da farinha da folha de brócolis obtida, caracterizado pelas pesagens das peneiras com as frações por medidas diretas utilizando-se uma série de peneiras padronizadas na faixa de 18 a 100 Mesh, com agitador eletromagnético, fabricante Bertel, para peneiras redondas; o tempo total de cada análise foi de 10 minutos segundo metodologia descrita por Gusmão et al. (2016).

## **Obtenção do extrato da folha de brócolis**

Em posse da farinha das folhas de brócolis, foi realizada uma extração hidroalcoólica para a obtenção do extrato de farinha de brócolis.

## **Extração hidroalcoólica**

Para o preparo da solução extrativa hidroalcoólica, foi adicionado álcool 70% numa proporção de 1:10 (pó:solvente), com uma temperatura de extração de 50°C por 60 minutos sob agitação mecânica com auxílio de um extrator encamisado e um banho de aquecimento com temperatura controlada (FERNANDES et al., 2014). Em seguida o extrato foi filtrado em filtro de porcelana com o auxílio de um papel de filtro, sem vácuo. Após esse processo, o extrato obtido foi conservado em incubadora BOD em temperatura de refrigeração (4°C), e acondicionado em recipiente âmbar para as posteriores análises.

## **Caracterização dos extratos de folha de brócolis**

O extrato obtido foi caracterizado quanto aos parâmetros físico-químicos de potencial hidrogeniônico e acidez total titulável, ambas descritas anteriormente e submetido as

caracterizações de bioativos, tais quais: Flavonoides totais, compostos fenólicos totais, taninos totais, antocianinas, clorofila e carotenoides.

### **Quantificação de flavonoides totais**

Para a quantificação do teor de flavonoides totais seguiu-se o método descrito e validado por Bott (2008). O conteúdo de flavonoides totais (FT) foi avaliado por espectrometria (UV/vis) usando uma massa de amostra pré-definida após reação da amostra com o reagente cloreto de alumínio (AlCl<sub>3</sub>), sendo o comprimento de onda deslocado para 425nm, com um tempo de reação de 30 minutos.

O teor de flavonoides totais foi expresso como mg quercetina/g de extrato ou por grama de matéria-prima vegetal. Todas as amostras foram analisadas em triplicata.

### **Quantificação de compostos fenólicos e taninos totais**

Os compostos fenólicos totais foram estimados a partir do método de Folin Ciocalteu, descrito por Waterhouse (2002). Nesta metodologia é utilizado o carbonato de sódio e para a preparação da curva padrão foi utilizado ácido gálico, as leituras foram realizadas em espectrofotômetro em um comprimento de onda de 765nm.

### **Quantificação de antocianinas**

Foram determinadas segundo a metodologia descrita por Francis (1982), sendo feita a leitura do extrato filtrado em espectrofotômetro em um comprimento de onda de 535 nm. Os resultados expressos em mg/100 g foram calculados através da Equação 1.

$$\text{Antocianinas totais} = \frac{Fd \times Abs}{98,2} \quad (1)$$

Em que:

Fd – Fator de diluição;

Abs – Absorbância lida.

## **Quantificação de carotenoides e clorofilas totais**

Os teores de clorofila e carotenoides foram estimados como descrito por Lichtenthaler (1987). Foi utilizado 0,3 g da matéria prima, macerado com 4,5 ml de acetona a 80% acrescida de 0,3g de carbonato de cálcio, completando-se o volume para 7,5. O extrato foi vertido para um tubo de ensaio e levado a uma centrífuga climatizada a 10°C com rotação de 300 rpm por 10 minutos, o sobrenadante foi coletado e realizado leitura em espectrofotômetro nos comprimentos de onda de 470, 646 e 663nm.

## **Obtenção do extrato concentrado**

O extrato hidroalcolico foi submetido a um evaporador rotativo para a eliminação total do solvente, sob vácuo a temperatura máxima de 50°C, até atingir o teor de sólidos de 10%. Após esse processo, o extrato obtido foi conservado em incubadora BOD em temperatura de refrigeração (4°C), e acondicionado em recipiente âmbar para as posteriores análises. A caracterização físico-química do extrato concentrado obtido ao que se refere a teor de água, potencial hidrogeniônico, acidez total titulável e sólidos solúveis totais foram realizadas de acordo com as metodologias já citadas anteriormente e em se tratando de análises de bioativos no que se refere a quantificação de flavonoides totais, quantificação de fenólicos e taninos totais, quantificação de antocianinas e as quantificações de carotenoides e clorofilas foram realizadas de acordo com as metodologias também já citadas anteriormente.

## **Delineamento experimental para o processo de secagem do extrato da folha de brócolis em leito de jorro**

Foram avaliadas a influência das variáveis independentes: concentração de maltodextrina (%), temperatura de entrada do ar de secagem (°C) e vazão de alimentação ( $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ ), em secador do tipo leito de jorro (modelo FBD 1.0 da marca LabMaq do Brasil). Foi realizado um delineamento experimental  $2^3+3$ , com 3 experimentos no ponto central, resultando 11 experimentos, como mostra a Tabela 1.

A pressão de atomização foi fixada em 3 bar assim como o peso das partículas em 1 kg e vazão de ar de secagem em 3,4 ml/min. As amostras em pó foram armazenadas em

embalagens metálicas flexíveis com zíper (espessura 0,11mm, tamanho 10x17,5cm), vedado a vácuo e armazenado em um dessecador em temperatura ambiente.

**Tabela 1** - Resumo dos ensaios de secagem propostos pelo delineamento experimental

<b>Ensaio</b>	<b>C<sub>MALTO</sub> (%)</b>	<b>T<sub>in</sub> (°C)</b>	<b>V<sub>ALIM</sub> (g.min<sup>-1</sup>)</b>
<b>1</b>	(-) 10	(-) 70	(-) 4,0
<b>2</b>	(+) 20	(-) 70	(-) 4,0
<b>3</b>	(-) 10	(+) 90	(-) 4,0
<b>4</b>	(+) 20	(+) 90	(-) 4,0
<b>5</b>	(-) 10	(-) 70	(+) 6,0
<b>6</b>	(+) 20	(-) 70	(+) 6,0
<b>7</b>	(-) 10	(+) 90	(+) 6,0
<b>8</b>	(+) 20	(+) 90	(+) 6,0
<b>9</b>	(0) 15	(0) 80	(0) 5,0
<b>10</b>	(0) 15	(0) 80	(0) 5,0
<b>11</b>	(0) 15	(0) 80	(0) 5,0

C<sub>MALTO</sub>: Concentração de Maltodextrina; T<sub>in</sub>: Temperatura de entrada do ar de secagem; V<sub>ALIM</sub>: Vazão de alimentação

### Variáveis dependentes

As variáveis dependentes foram o rendimento do processo, o teor de água do pó obtido pós secagem, e o teor de flavonoides.

O rendimento foi calculado conforme Rocha et al. (2018), de acordo com a equação (X), com resultados expressos em porcentagem.

$$R = \frac{M_c * (1 - X_C)}{M_A * (1 - X_A)} * 100 \quad (20)$$

Em que:

MC é a massa coletada (g);

MA é a massa alimentada (g);

XC é o teor de água da amostra coletada (g);

XA é o teor de água da amostra alimentada (g).

O teor de água e o teor de flavonoides foi quantificado de acordo com as metodologias já descritas acima.

### **Caracterização físico-química e de bioativos**

O pó obtido pela secagem em leito de jorro foi caracterizado quanto aos parâmetros físico-químicos de teor de água, potencial hidrogeniônico, acidez total titulável e sólidos solúveis totais, todas descritas anteriormente. Em se tratando de análises de bioativos no que se refere a quantificação de fenólicos e taninos totais, quantificação de antocianinas e as quantificações de carotenoides e clorofilas foram realizadas de acordo com as metodologias também já supracitadas.

### **Análise estatística**

Os dados da caracterizações físico-química foram submetidos ao delineamento inteiramente casualizado e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o programa Assistat versão 7.7 (FRANCISCO; CARLOS, 2016). No planejamento experimental, os efeitos das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes foram avaliados mediante análise estatística utilizando o programa computacional Statistica versão 7.0.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Caracterização das folhas de brócolis**

Na Tabela 2 estão descritos os valores médios e seus respectivos desvios padrão, dos parâmetros físico-químicos, físicos e químicos realizados das folhas de brócolis *in natura*.

**Tabela 2** – Caracterização físico-química, física e química das folhas de brócolis *in natura*.

<b>Parâmetro</b>	<b>Folhas de brócolis <i>in natura</i></b>
Teor De Água (%)	75,668 ± 0,309

pH (adimensional)		5,930 ± 0,078
Acidez Total Titulável (%Ácido Cítrico)		0,214 ± 0,031
Sólidos Solúveis Totais (°Brix)		24,332 ± 0,255
Cinzas (%)		0,032 ± 0,002
Teor de Extrativos (%)	Água (H <sub>2</sub> O)	33,01 ± 0,003
	Tolueno (C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> )	19,75 ± 0,002
Perda por Dessecação (%)		3,331 ± 0,339

---

Médi±Desvio Padrão.

Considerada uma das análises laboratoriais de extrema importância, a umidade está associada à estabilidade e qualidade da matéria prima. A umidade fora das recomendações técnicas pode causar grandes perdas na estabilidade química, deterioração microbiológica ou alterações na qualidade geral do alimento (IAL, 2008). Passos e colaboradores (2013) encontraram teor de água similar para folhas de acácia-branca (76%) e Câmara (2019) encontrou para folhas de moringa um teor de água de 73,38%. Valores esses bem próximos para o encontrado com as folhas de brócolis. Já o teor de sólidos solúveis totais é o total de todos os sólidos dissolvidos na água, começando por açúcar, sais, proteínas, ácidos. A leitura do valor medido é a soma total desses (PENA, 2018). Os valores encontrados para os sólidos solúveis totais para as folhas de brócolis foram de 24,332%.

Os valores encontrados para pH e acidez total titulável (ATT) foram bem próximos aos de outros autores que trabalharam com folhas análogas visto que Nasser (2018) encontrou nas folhas comerciais de couve-de-folha um valor de pH de 6,24 e valores de ATT em 0,25%. de Sanches et al. (2016) relataram em couve-folha manteiga verde crespa valores mais baixos de pH (5,20), e valores mais altos na ATT (0,31%), o que comprova a coerência nos resultados, ou seja, quanto maior a acidez consequentemente obtém-se menores valores para pH. Sabe-se que a acidez quantifica a presença de ácidos orgânicos nos vegetais, e, de modo geral, a acidez em olerícolas é baixa.

O teor de cinzas totais estabelece a quantidade de substâncias residuais não voláteis, obtidas por incineração, material inorgânico integrante da espécie com as substâncias aderentes de origem terrosa (SIMÕES et al., 2010). Os resultados da determinação de cinzas totais na amostra apresentaram-se abaixo de 14%, conforme os limites estabelecidos nas monografias de diversas drogas vegetais descritas na Farmacopeia Brasileira (BRASIL, 2010).

O teor de extrativos da matéria-prima vegetal é um parâmetro empregado na avaliação da eficiência do processo extrativo (FERNANDES, 2013). Os resultados obtidos deste estudo



mostraram que os compostos inorgânicos estão mais presentes nas folhas de brócolis, visto que a eficiência com a água no processo extrativo se deu em maior quantidade (33,01%). No entanto, uma boa parcela dos compostos encontrados nas folhas (19,75%) são orgânicos e foram evidenciados a partir do processo de extração com o tolueno. Os altos valores observados refletem a alta concentração de teor de extrativos na amostra e conseqüentemente a alta concentração de sólidos solúveis nas matérias-primas vegetais extraídos por este sistema solvente.

A perda por dessecação de uma matéria-prima vegetal é um parâmetro muito importante em se tratando de conservação de produtos com conseqüente manutenção da qualidade. Quanto menor esse valor, menor a possibilidade de proliferação de microrganismos (bacteriano e fúngico) e atividade enzimática (LIST; SCHIMIDT, 1989). O resultado da perda por dessecação apresentado na Tabela 1 encontra-se abaixo do limite máximo recomendado de 14%, portanto, considerado satisfatório

### **Secagem da folha de brócolis**

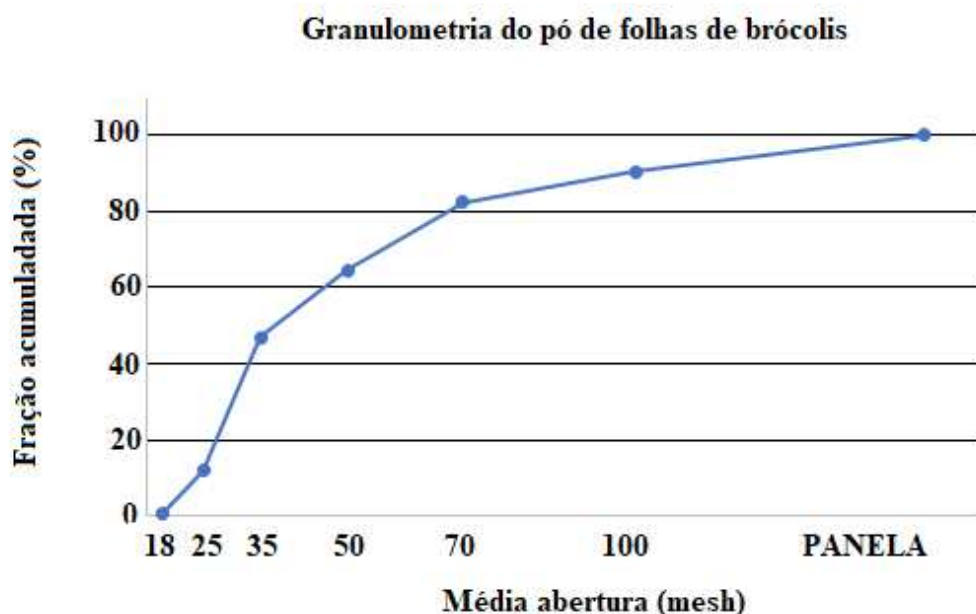
O pó das folhas de brócolis foi submetido a uma análise granulométrica de acordo com a Tabela 3 a seguir:

**Tabela 3** – Distribuição granulométrica do pó das folhas de brócolis.

<b>Peso da peneira (g)</b>	<b>Mesh</b>	<b>Peso final (g)</b>
404,68	18	405,05
381,51	25	387,11
360,37	35	377,77
362,61	50	371,5
363,31	70	372,25
353,32	100	357,38
313,74	-	317,67

De acordo com a classificação da Farmacopeia Brasileira (2010) as matérias-primas vegetais encontram-se classificadas entre pó moderadamente grosso e grosso.

A Figura 1 apresenta o gráfico representativo da distribuição granulométrica das folhas de brócolis.



**Figura 1:** Distribuição granulométrica obtida por tamisação expressa como porcentagem da fração acumulada de folhas secas e moídas de brócolis.

### **Caracterização do extrato de folhas de brócolis e do extrato concentrado das folhas de brócolis**

Nas Tabela 4 estão descritos os valores médios dos parâmetros físico-químicos e bioativos realizados do extrato das folhas de brócolis e do extrato concentrado das folhas de brócolis obtidos.

**Tabela 4** – Caracterização físico-química e de bioativos do extrato das folhas de brócolis e do extrato concentrado das folhas de brócolis.

<b>Parâmetro</b>	<b>Extrato hidroalcolólico de folhas de brócolis</b>	<b>Extrato concentrado de folhas de brócolis</b>
pH (adimensional)	5,293 ± 0,559	5,565 ± 0,201
Acidez (%Ácido Cítrico)	0,214 ± 0,031	0,451 ± 0,036
Flavonoides Totais (mg/100g)	46,029 ± 0,054	51,424 ± 0,048
Antocianinas Totais (mg/100g)	3,14 ± 0,886	6,899 ± 0,302
Compostos fenólicos (mg/100g)	167,00 ± 0,013	1121,64 ± 0,043

Taninos Totais (mg/100g)		251,63 ± 0,013	1912,65 ± 0,043
Carotenoides Totais (mg/100g)		0,072 ± 0,003	0,061 ± 0,001
	A	1,863 ± 0,015	0,155 ± 0,181
Clorofila (mg/100g)	B	0,093 ± 0,006	0,264 ± 0,307
	Totais	1,944 ± 0,009	0,419 ± 0,487

Média ± Desvio Padrão.

Dentre os valores apresentados na Tabela 4, observa-se que os valores de pH e acidez total titulável, e ainda a maior parte dos compostos bioativos (flavonoides, antocianinas, compostos fenólicos e taninos totais) aumentaram com a concentração do extrato, fenômeno esse que pode ser justificado pela retirada do solvente que estava presente no extrato hidroalcolico. De modo inverso os carotenoides e as clorofilas houveram um decréscimo em seu valor que pode ser justificado por meio da degradação dos compostos, visto que, o processo é conduzido em meio a temperatura de no máximo 50°C, e este pode ser um fator preponderante para essa conclusão.

Nota-se que o pH e a acidez total titulável aumentaram com a concentração do extrato, porém observa-se que não é um aumento significativo, visto que as amostras continuaram com as mesmas características.

Em se tratando dos compostos bioativos, valores similares foram encontrados para estes em outros extratos de folhas. Ribeiro (2019) ao analisar folhas de pequi, obteve valores de compostos fenólicos, flavonoides e antocianinas análogos. Dalastra e colaboradores (2019) ao analisar extratos da folha de guabirobeira (*Campomanesia xanthocarpa* Berg) encontrou um teor de flavonoides de 52,64mg/100g, bem próximo ao do extrato das folhas de brócolis.

Portanto, os valores encontrados demonstram que as folhas de brócolis podem ser utilizadas como matéria prima para extração de bioativos, principalmente, no que se refere aos flavonoides, compostos fenólicos e taninos.

## Ensaio de Secagem

Na Tabela 5, pode-se observar os valores obtidos nos 11 experimentos do planejamento experimental para rendimento, teor de água e quantificação de flavonoides, sendo esses valores utilizados para obtenção da estatística obtida no delineamento experimental (DOE) executado.

**Tabela 5** - Resultados obtidos nos ensaios de secagem

<b>Experimento</b>	<b>Rendimento (%)</b>	<b>Teor de água (%)</b>	<b>Flavonoides (mg/100g)</b>
<b>1</b>	32,430	12,13	54,490
<b>2</b>	77,198	6,20	45,597
<b>3</b>	26,305	7,85	76,674
<b>4</b>	82,623	3,39	25,273
<b>5</b>	24,680	11,19	68,925
<b>6</b>	59,375	5,55	33,480
<b>7</b>	26,647	6,39	85,229
<b>8</b>	74,326	3,37	29,609
<b>9</b>	47,869	6,58	35,295
<b>10</b>	43,864	5,68	39,202
<b>11</b>	45,0245	6,07	37,674

Conforme os valores observados na Tabela 5, a discussão dos resultados ocorrerá nas condições de concentração de maltodextrina (10; 15 e 20%), na temperatura de entrada do ar de secagem (60, 70 e 80°C) e na vazão de alimentação (4,0; 5,0 e 6,0g/min).

Para a variável rendimento, os ensaios que obtiveram menor eficiência foram 1, 3, 5 e 7, com porcentagens entre 24,680 e 32,430%, ao observar os valores das variáveis dos processos para esses experimentos (Tabela 1), é possível observar que todos tiveram em comum a menor concentração de maltodextrina (10%). O inverso, pode ser observado nos experimentos com maior concentração de maltodextrina, como o exemplo do número 4, que apresentou maior rendimento dentre todos realizados (82,623%). De fato, pode-se concluir que a adição do adjuvante de secagem, no caso a maltodextrina, aumentou consideravelmente o rendimento total do processo, mostrando sua eficiência nesses casos. Outro fator que justifica a qualidade do processo é o baixíssimo teor de água do experimento número 4 (3,39%), mostrando assim que é um pó seguro para futuras aplicações.

Contudo, pode-se observar que o teor de flavonoides, tem-se uma concentração baixa para o experimento com maior rendimento e bom teor de água, podendo ser explicado pela adição máxima de malto nesse experimento, que por se tratar de um aditivo alimentar pode mascarar a real concentração dos compostos bioativos presentes na amostra. Essa justificativa

se confirma no experimento 7, que traz a maior quantificação de flavonoides (85,229 mg/100g) e trata-se de um experimento com a concentração mínima de malto na sua formulação. Mesmo observando que em alguns pontos a quantificação traz um valor maior, ao fazer comparativo entre os experimentos, mesmo estando com uma alta concentração de malto, sendo esse fenômeno acometido pela junção das três variáveis alteradas durante a secagem (concentração de malto, temperatura de entrada e vazão de alimentação), ou seja, ao trabalhar com valores distintos de cada uma, os valores obtidos e esperados podem sair da curva do raciocínio ao analisar apenas a maltodextrina.

### Coefficientes de regressão

A Tabela 6 demonstra a influência de cada variável em função dos coeficientes utilizados para ajustar a equação polinomial, os valores de F e o coeficiente de determinação  $R^2$ .

**Tabela 6** - Coeficientes de regressão obtidos para rendimento, teor de água e teor de flavonoides

Coeficientes	Variáveis	R (%)	TA (%)	F (g/100g)
$\beta_0$	-	49,140	6,779	48,340
$\beta_1$	C <sub>MALTO</sub>	45,864	-4,764	-37,837
$\beta_2$	T <sub>ENTRADA</sub>	NS	-3,516	NS
$\beta_3$	V <sub>ALIMENTAÇÃO</sub>	-8,381	NS	NS
$\beta_4$	C <sub>MALTO</sub> . T <sub>ENTRADA</sub>	NS	NS	-15,667
$\beta_5$	C <sub>MALTO</sub> . V <sub>ALIMENTAÇÃO</sub>	NS	NS	-7,687
$\beta_6$	T <sub>ENTRADA</sub> . V <sub>ALIMENTAÇÃO</sub>	NS	NS	NS
$\beta_7$	C <sub>MALTO</sub> . T <sub>ENTRADA</sub> . V <sub>ALIMENTAÇÃO</sub>	NS	NS	NS
$R^2$	-	98,728	97,377	87,968
F	-	4,03	2,52	40,22

$\beta_0$ -  $\beta_7$ : Coeficientes de regressão;  $R^2$ : Coeficiente de determinação; C<sub>MALTO</sub>: Concentração de maltodextrina; T<sub>ENTRADA</sub>: Temperatura de entrada; V<sub>ALIMENTAÇÃO</sub>: Vazão de alimentação; NS: Não Significativo; R: Rendimento; TA: Teor de água; F: Teor de Flavonoides.

Sendo  $\beta_0$  o coeficiente que representa a média para rendimento, teor de água e de flavonoides, observamos valores representativos. A média do rendimento encontra-se próximo a 50%, sendo esse um resultado satisfatório e de elevado aproveitamento ao processo de secagem. O teor de água observado na média foi baixo (6,779%), tendo em vista que segundo Oliveira et al. (2015) quanto menor a dextrose equivalente (DE) utilizada na secagem menor o teor de água e nos experimentos em questão utilizou-se maltodextrina com DE20, ou seja, ainda havia a possibilidade de se obter um pó com menor teor de água caso a DE da maltodextrina fosse 10 ou 14. O teor de flavonoides foi em média 48,340mg/100g, sendo esse um valor considerado elevado para a condição encontrada, pois Costa et al. (2020) mostraram que ao aumentar o tempo de contato das folhas de brócolis com temperaturas elevadas havia uma redução dos compostos bioativos presentes nelas, com isso, os experimentos utilizaram temperaturas entre 60 e 80°C com tempos de secagem entre 35 e 45min, mas conservando esse bioativo no extrato da folha de brócolis. Os flavonoides possuem várias atividades biológicas, como ação anti-inflamatória, antiviral, antibacteriana, antialérgica e vasodilatadora, e estão associados à prevenção de doenças crônicas, como o câncer e as doenças cardiovasculares (OLIVEIRA et al., 2019). Portanto, esse é um fator interessante ao passo que atribui ao pó de folhas de brócolis propriedades antioxidantes que podem ser agregadas em outros produtos alimentícios de interesse.

A concentração de maltodextrina ( $C_{MALTO}$ ) representada por  $\beta_1$  apresentou coeficientes com resultados significativos em ambas as variáveis dependentes estudadas. No rendimento o efeito observado foi positivo, ou seja, ao aumentar a concentração de maltodextrina no processo haverá um aumento esperado na média da variável rendimento, contudo, o gasto com insumos aumentaria e poderia mascarar a real composição do extrato em pó obtido. O teor de água e de flavonoides teve efeito negativo, sendo nesse caso o aumento da concentração de maltodextrina resultante de uma diminuição das médias dessas variáveis dependentes, onde no teor de água resultaria no aumento de sólidos e conseqüentemente redução do teor de água e no teor de flavonoides haveria uma camuflagem da real composição bioativa do produto final.

O coeficiente  $\beta_2$  ou temperatura de entrada ( $T_{ENTRADA}$ ) só teve efeito significativo para o teor de água e de forma negativa mostrando que ao aumentar a temperatura de entrada ocorrerá uma redução do teor de água na amostra, pois haverá maior evaporação de água no processo e conseqüentemente menor quantidade dela no produto final obtido. Na vazão de alimentação ( $V_{ALIMENTAÇÃO}$ ) representada pelo coeficiente  $\beta_3$  podemos observar que apenas o rendimento teve efeito significativo e negativo, ou seja, se houver um aumento da vazão de

alimentação no processo acarretará em uma redução do rendimento, isso porque haverá mais produto sendo alimentado por minuto e o secador poderá não dar conta desse volume.

A partir da interação dupla ( $\beta_4$ ,  $\beta_5$ ,  $\beta_6$ ) e tripla ( $\beta_7$ ) das variáveis observamos que a interação da concentração de maltodextrina ( $\beta_4$ ) com a temperatura e da concentração de maltodextrina com a vazão de alimentação ( $\beta_5$ ) resultou em efeitos significativos negativos para o teor de flavonoides, onde se houver o aumento em conjunto dessas variáveis independentes teremos uma redução do composto bioativo em questão. As demais interações não apresentaram efeitos significativos ao processo.

O coeficiente de determinação,  $R^2$ , é considerado uma quantificação em relação a qualidade do ajustamento, variando de 0 a 100% (RODRIGUES & IEMMA, 2014). Os coeficientes de determinação do rendimento e teor de água demonstram que há elevado ajuste aos modelos, tendo em vista que ambos estão próximos a 100%. Para o teor de flavonoides observamos um  $R^2$  de 87,968% mais por se tratar de um composto bioativo que sofre alterações de acordo com o ambiente, composição, temperatura e outros fatores intrínsecos e extrínsecos, logo o coeficiente é aceito como um bom coeficiente para ajuste dos modelos.

Por se tratar de um teste, utilizado para comprovar quais os fatores e interações são realmente significantes no processo, o teste F é de fundamental importância para entender o comportamento da variável dependente, relacionando o F calculado através da ANOVA e o F tabelado através dos graus de liberdade observados em cada variável dependente. Os graus de liberdade foram os mesmos para ambas variáveis dependentes 6 e 4, resultando em um valor de F tabelado de 6,16, onde para haver significância o F calculado na ANOVA deve ser superior ao tabelado. Para o rendimento o F calculado obtido foi 4,03 e para o teor de água 2,52, decorrendo uma não significância no processo para essas duas variáveis dependentes. Para o teor de flavonoides obtivemos um F calculado de 40,22, ou seja, é possível afirmar que essa variável dependente foi estatisticamente significativa ao processo.

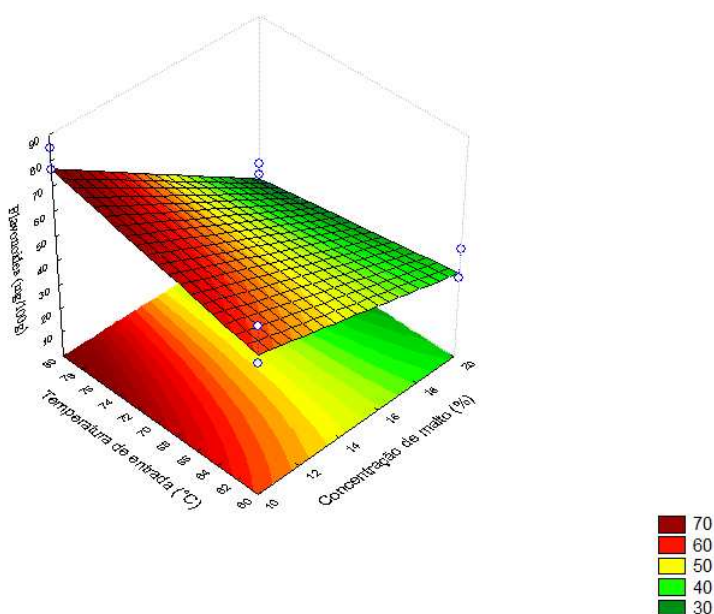
### **Superfícies de resposta**

As superfícies de resposta são capazes de realizar uma predição das condições ideais a serem empregadas durante o processo, Rodrigues e Iemma (2014) afirmam que para um planejamento do tipo delineamento experimental (DOE) as superfícies de resposta devem ser geradas se a análise de variância (ANOVA) for significativa, sendo esse estado observado do teste F, com valores expostos na Tabela 6. Como discutido anteriormente, o teste F foi

estatisticamente significativo para o teor de flavonoides, com isso, as superfícies de reposta foram geradas para análise de tendências e de regiões de interesse ao processo, realizando as interações entre as variáveis independentes para essa variável dependente.

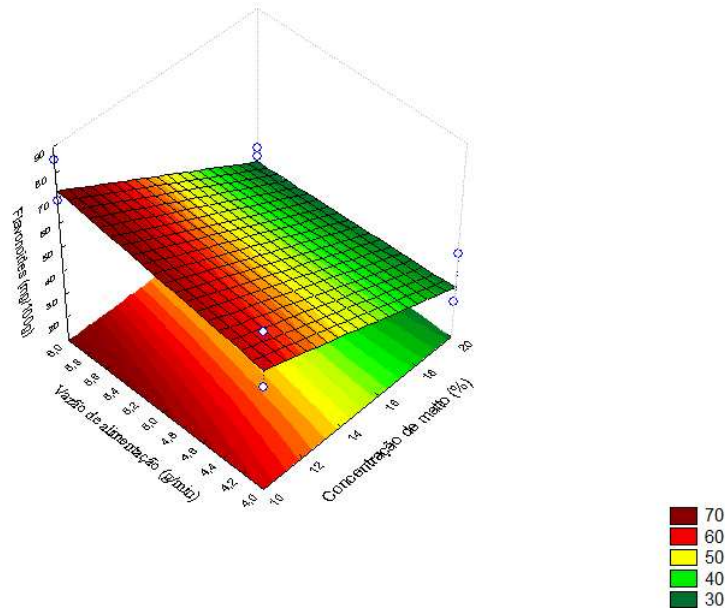
Se observarmos o comportamento do teor de flavonoides podemos observar que apenas a concentração de maltodextrina e suas interações apresentaram coeficientes com efeitos significativos. Os valores obtidos variaram entre 25,277mg/100g no experimento 4 (20%,90°C,6g/min) e 85,277mg/100g no experimento 7 (10%, 90°C, 6g/min).

Na Figura 2, confirmamos o que foi dito anteriormente, onde a concentração de maltodextrina tem maior significância no processo, pois podemos observar que independente da temperatura utilizada no processo conseguimos manter valores elevados de teor de flavonoides mais se a concentração de maltodextrina for acima de aproximadamente 12% ocorre uma redução nos flavonoides presentes no produto final. Sendo esse mesmo comportamento analisado na Figura 3 com a vazão de alimentação e a concentração de maltodextrina. A análise na Figura 4 mostra que se for mantida a temperatura até aproximadamente 62°C pode-se utilizar qualquer faixa de vazão de alimentação que o teor de flavonoides será baixo, em torno de 48 g/100g. E para obtenção de um teor de flavonoide mais elevado deve-se manter a temperatura mais elevada e a vazão de alimentação também, comportamento esse similar ao encontrado no experimento 7 que utilizou 90°C e 6g/min como parâmetro para variável independente.

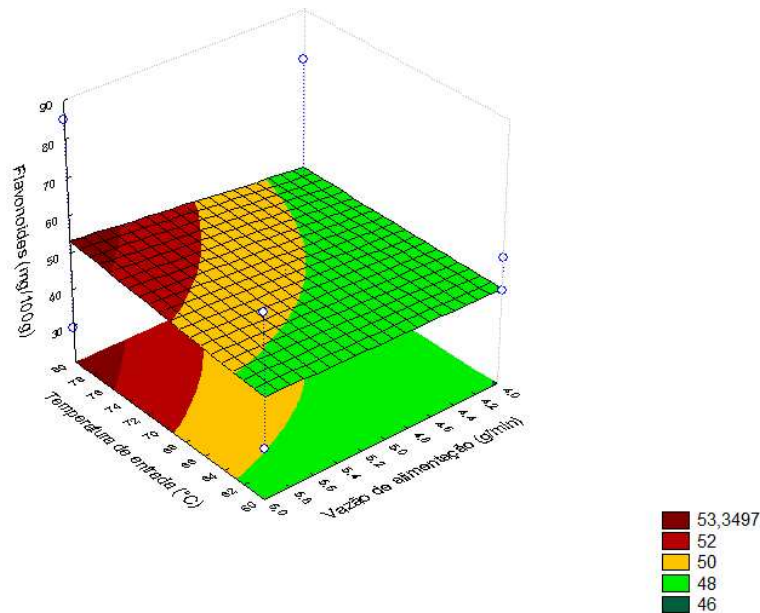


**Figura 2** – Superfície de resposta do teor de flavonoides em relação a concentração de maltodextrina e temperatura de entrada.





**Figura 3** – Superfície de resposta do teor de flavonoides em relação a concentração de maltodextrina e vazão de alimentação.



**Figura 4** – Superfície de resposta do teor de flavonoides em relação a temperatura de entrada e vazão de alimentação.

### Caracterização físico-química e de bioativos do extrato de folha de brócolis em pó

Na Tabela 7 estão descritos a caracterização físico-química e de bioativos do extrato da folha de brócolis em pó.

**Tabela 7** - Caracterização físico-químicas e de bioativos do extrato da folha de brócolis em pó

EXP.	pH	AT (%C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> )	TA (%)	TS (%)	ANT (mg/100g)	CF (mg/100g)	TT (mg/100g)	CT (mg/100g)	CL (mg/100g)
<b>1</b>	5,334 <sup>a</sup>	0,421 <sup>a</sup> ±	12,133 <sup>a</sup>	87,867 <sup>b</sup>	2,163 <sup>c</sup> ±	4340,3 <sup>c</sup> ±	4825,1 <sup>b</sup> ±	0,09 <sup>b</sup> ±	0,0038 <sup>c</sup> ±
	± 0,022	0,087	± 0,310	± 0,398	0,04	0,084	0,002	0,00008	0,0001
<b>2</b>	5,397 <sup>a</sup>	0,487 <sup>a</sup> ±	6,195 <sup>b</sup> ±	93,805 <sup>a</sup>	1,906 <sup>d</sup> ±	2137,1 <sup>j</sup> ±	2193,7 <sup>j</sup> ±	0,11 <sup>a</sup> ±	0,0139 <sup>b</sup> ±
	± 0,072	0,059	0,294	± 0,374	0,02	0,109	0,008	0,00004	0,0001
<b>3</b>	5,344 <sup>a</sup>	0,449 <sup>a</sup> ±	7,852 <sup>b</sup> ±	92,148 <sup>ab</sup>	2,586 <sup>b</sup> ±	4732,7 <sup>a</sup> ±	5050,1 <sup>a</sup> ±	0,11 <sup>a</sup> ±	0,0205 <sup>ab</sup> ±
	± 0,087	0,049	0,222	± 0,312	0,04	0,065	0,005	0,00006	0,0001
<b>4</b>	5,311 <sup>a</sup>	0,432 <sup>a</sup> ±	3,389 <sup>c</sup> ±	96,611 <sup>a</sup>	0,970 <sup>g</sup> ±	2930,9 <sup>f</sup> ±	3124,9 <sup>f</sup> ±	0,12 <sup>a</sup> ±	0,0243 <sup>a</sup> ±
	± 0,045	0,047	0,301	± 0,299	0,01	0,033	0,002	0,00003	0,0001
<b>5</b>	5,401 <sup>a</sup>	0,436 <sup>a</sup> ±	11,195 <sup>a</sup>	88,805 <sup>b</sup>	2,190 <sup>c</sup> ±	4191,8 <sup>d</sup> ±	4502,0 <sup>d</sup> ±	0,11 <sup>a</sup> ±	0,0181 <sup>ab</sup> ±
	± 0,038	0,055	± 0,298	± 0,318	0,04	0,054	0,003	0,00003	0,0001
<b>6</b>	5,398 <sup>a</sup>	0,487 <sup>a</sup> ±	5,554 <sup>bc</sup>	94,446 <sup>a</sup>	1,420 <sup>e</sup> ±	2691,3 <sup>h</sup> ±	2850,2 <sup>h</sup> ±	0,09 <sup>b</sup> ±	0,0135 <sup>b</sup> ±
	± 0,026	0,066	± 0,277	± 0,394	0,02	0,102	0,003	0,00003	0,0001
<b>7</b>	5,377 <sup>a</sup>	0,466 <sup>a</sup> ±	6,394 <sup>b</sup> ±	93,606 <sup>a</sup>	2,866 <sup>a</sup> ±	4446,5 <sup>b</sup> ±	4792,9 <sup>c</sup> ±	0,12 <sup>a</sup> ±	0,0159 <sup>ab</sup> ±
	± 0,087	0,067	0,254	± 0,401	0,05	0,099	0,005	0,00007	0,0001
<b>8</b>	5,314 <sup>a</sup>	0,441 <sup>a</sup> ±	3,374 <sup>c</sup> ±	96,626 <sup>a</sup>	1,270 <sup>f</sup> ±	2319,9 <sup>i</sup> ±	2470,7 <sup>i</sup> ±	0,12 <sup>a</sup> ±	0,0203 <sup>ab</sup> ±
	± 0,042	0,047	0,302	± 0,511	0,02	0,068	0,005	0,00002	0,0001
<b>9</b>	5,379 <sup>a</sup>	0,422 <sup>a</sup> ±	6,580 <sup>b</sup> ±	93,420 <sup>ab</sup>	1,270 <sup>f</sup> ±	2900,8 <sup>g</sup> ±	3074,0 <sup>g</sup> ±	0,11 <sup>a</sup> ±	0,0160 <sup>ab</sup> ±
	± 0,085	0,012	0,211	± 0,322	0,02	0,065	0,006	0,00006	0,0001
<b>10</b>	5,401 <sup>a</sup>	0,425 <sup>a</sup> ±	5,676 <sup>b</sup> ±	94,324 <sup>a</sup>	1,950 <sup>d</sup> ±	3502,8 <sup>e</sup> ±	3660,5 <sup>e</sup> ±	0,13 <sup>a</sup> ±	0,0173 <sup>ab</sup> ±
	± 0,021	0,019	0,265	± 0,350	0,02	0,105	0,005	0,00006	0,0001
<b>11</b>	5,398 <sup>a</sup>	0,429 <sup>a</sup> ±	6,085 <sup>b</sup> ±	93,915 <sup>a</sup>	1,654 <sup>f</sup> ±	3321,2 <sup>e</sup> ±	3311,8 <sup>e</sup> ±	0,11 <sup>a</sup> ±	0,0168 <sup>ab</sup> ±
	± 0,061	0,033	0,218	± 0,299	0,03	0,115	0,007	0,00004	0,0001

T<sub>in</sub>: Temperatura de entrada; C<sub>MALTO</sub>: Concentração de maltodextrina; V<sub>ALIM</sub>: Vazão de alimentação. AT: Acidez titulável; TA: Teor de água; TS: Teor de sólidos; CF: Compostos fenólicos totais; ANT: Antocianinas totais; CT: Carotenoides totais. CL: Clorofilas totais. C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>: ácido cítrico. Média ± Desvio padrão. Letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente (P ≤ 0,05) do padrão segundo teste de Tukey a 5% de significância.

Ao analisar os valores de pH e acidez total titulável, nota-se que não houve uma grande diferença entre os valores obtidos no extrato concentrado e na amostra seca em pó, visto que os valores são bem aproximados ao comparar os dados da Tabela 4 e Tabela 7. Quanto ao comportamento estatístico não houveram diferença significativa a 5% de significância segundo teste de Tukey entre os 11 experimentos analisados.

Em relação ao teor de água e ao teor de sólidos solúveis totais observa-se que ao comparar o extrato concentrado e o pó obtido após a secagem em leito de jorro houve uma

discrepante queda no teor de água e um aumento no teor de sólidos solúveis totais, porém esse fenômeno já era esperado, visto que foi utilizada uma operação de secagem para tal feito. Destaca-se que os pós tiveram um teor de água considerado satisfatório ao passo que segundo a RDC 263 (BRASIL, 2005) estão dentro dos limites máximos estabelecidos que estipula um limite máximo de 15%, para garantir a qualidade de pós.

Os valores de antocianinas apresentados na Tabela 7 mostram que houve uma queda em relação ao extrato concentrado (Tabela 4), podendo ser justificado através da degradação desse composto a partir das altas temperaturas utilizadas no leito de jorro para o delineamento experimental. Outro fator ainda a ser considerado é que quanto maior a porcentagem de maltodextrina adicionada, houve um decréscimo ainda maior dos valores das antocianinas.

Em relação aos compostos fenólicos totais e aos taninos totais observou-se que houve um aumento considerável nos teores desses compostos após o extrato concentrado ser seco em pó. É interessante esse fato ao passo que o pó pode ser considerado rico nessas substâncias bioativas e ainda concluir que apesar do processo do leito de jorro esses componentes não foram degradados pelas variantes do processo. Substâncias fenólicas são reconhecidamente detentoras de pronunciada atividade antioxidante, atuando como sequestradores de radicais livres e como quelantes de metais, despertando, assim, interesse face à possibilidade de serem utilizadas em várias doenças degenerativas, como envelhecimento prematuro, processos inflamatórios, cicatrização, câncer, entre outras (PESSUTO et al, 2009). O efeito protetor exercido por estes compostos atua retardando a velocidade da reação de oxidação, por ação sinérgica ou não, protegendo o organismo, contra as espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (MELO et al., 2009). Portanto, o pó do extrato da folha de brócolis pode ser considerado um pó com propriedades antioxidantes.

Os carotenoides e as clorofilas, no entanto, houveram mais uma queda de valores quando se comparam o extrato hidroalcolico, extrato concentrado e o pó do extrato concentrado. Mais uma vez esse fator se justifica pela degradação que a temperatura causa nesse composto.

## **CONCLUSÃO**

Pode-se concluir que a média do rendimento dos pós do extrato concentrado de folhas de brócolis após secagem em leito de jorro se encontrou próximo a 50%, sendo esse um resultado de elevado aproveitamento.

O teor de flavonoides foi em média 48,340mg/100g, sendo esse um valor considerado elevado para as condições em que o delineamento experimental foi conduzido.

No rendimento o efeito observado foi positivo, ou seja, ao aumentar a concentração de maltodextrina no processo haverá um aumento esperado na média da variável rendimento, contudo, o gasto com insumos aumentaria e poderia mascarar a real composição do extrato em pó obtido. Para o rendimento o F calculado obtido foi 4,03 e para o teor de água 2,52, decorrendo uma não significância no processo para essas duas variáveis dependentes.

Para o teor de flavonoides obtivemos um F calculado de 40,22, ou seja, é possível encontrar que essa variável dependente foi estatisticamente significativa ao processo. Portanto, é possível reafirmar que o pó de folhas de brócolis possui propriedades antioxidantes que podem ser agregadas em outros produtos alimentícios de interesse para aproveitamento desta qualidade.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANUÁRIO BRASILEIRO DE HORTI & FRUTI. KIST, B. B. et al. **Horticultura – Brasil**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 96p. 2019.

BOTT, R.F. **Influência do processo de obtenção, das condições de armazenagem e das propriedades físico-químicas sobre a estabilidade de extratos secos padronizados de plantas medicinais**. 182p. Ribeirão Preto, Tese de Doutorado - Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, 2008.

BRASIL. **Farmacopeia Brasileira**, 5. ed. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Brasília: ANVISA, p. 91-199. v. 1. 2010.

BRASIL. Ministério da Saúde. Resolução RDC nº 272 de 22 de setembro de 2005 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Regulamento Técnico Para Produtos de Vegetais, Produtos de Frutas e Cogumelos Comestíveis**. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 23 set. 2005.

CAMARA, B. et al., Caracterização físico-química, toxicológica e nutricional das folhas da *Moringa oleifera* Lam secas e *in natura*. **Research, Society and Development**. vol. 8, núm. 11. 2019.

DALASTRA, V.; SOUTHER, N.; ANAISSI, F. J.; DALASTRA, J.; YAMAZAKY, R. K. Flavonoides presentes nos extratos da campomanesia xanthocarpa Berg. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 5, n. 7, p. 8983-8991 jul. 2019.

FERNANDES, M. R. V.; DIAS, A. L. T.; CARVALHO, R. R.; SOUZA, C. R. F.; OLIVEIRA, W. P. Antioxidant and antimicrobial activities of *Psidium guajava* L. spray dried extracts. *Industrial Crops and Products*, v. 60, p. 39-44, 2014.

FRANCIS, F. J. Análises of anthocyanins. In: Markakis, P. (Ed). *Anthocyanins as food colors*. **New York: Academic**, p. 181-207, 1992.

FRANCISCO, De A. S. E S.; CARLOS, A. V. De A. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 39, p. 3733–3740, 2016.

FERNANDES, M. R. V. **Padronização e avaliação biológica de extratos secos de *Psidium guajava* L. obtidos por spray drying**. Tese de Doutorado, apresentada à Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto/USP – Área de concentração: Medicamentos e Cosméticos. 2013.

GOULA, A. M. et al. Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids from pomegranate wastes using vegetable oils. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 34, p. 821–830, 2017.

GUSMÃO, R.P.; CAVALCANTI-MATA, M. E. R. M.; DUARTE, M. E. M.; GUSMÃO, T.A.S. Particle size, morphological, rheological, physicochemical characterization and designation of minerals in mesquite flour (*Prosopis juliflora*). **Journal of Cereal Science**. v.69, p.119-124, 2016.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos** (1st ed.). São Paulo: IAL. 2008.

KACZMAREK, J. L.; LIU, X.; CHARRON, C. S.; NOVOTNY, J. A.; JEFFERY, E. H.; ...; HOLSCHER, H. D. Broccoli consumption affects the human gastrointestinal microbiota. **Journal of Nutritional Biochemistry**, v. 63, p. 27-34, 2019.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls e carotenoides pigments of photosynthetic biomembranes: in Racker, L; Douce. R (eds) **Methods in enzymology**, London, v.148, p. 350 -382, 1987.

MELO, E.A.; MACIEL, M.I.S.; LIMA, V.L.A.G.; SANTANA, A.P.M. Capacidade antioxidante de hortaliças submetidas a tratamento térmico. *Nutrire: J. Braz. Soc. Food Nutr.*, São Paulo, SP, 34(1): 85-95, 2009.

MENON, A.; STOJCESKA, V. A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. **Trends in Food Science & Technology**, v.100, p. 67-76, 2020.

LIST, P. H.; SCHIMIDT, P. C. **Phytopharmaceutical technology**. Boca Raton: CRC, 1989.

NASSER, M. D. **Gesso e composto orgânico no preparo de solo, enxofre em cobertura, na nutrição, produção e características físico-químicas da couve-de-folha**. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. 2018.

OLIVEIRA, H. A.; VAREJÃO, M. J. C.; CRUZ, I. A. Determinação de constituintes químicos e extrativos das madeiras de espécies florestais amazônicas. **II Congresso de Iniciação Científica PIBIC/CNPq - PAIC/FAPEAM**. Manaus. 2013b.

OLIVEIRA, V. P.; ESPECHIT, A. C. R.; PELUZIO, M. C. G. Flavonóides e doenças cardiovasculares: Ação antioxidante. **Revista Médica de Minas Gerais**. v. 16. e. 4. p.1-10. 2019.

PASSOS, M., DA CONCEIÇÃO SANTOS, D. M., DOS SANTOS, B. S., SOUZA, D. C. L., DOS SANTOS, J. A. B., & DA SILVA, G. F. Qualidade pós-colheita da moringa (*Moringa*

oleifera lam) utilizada na forma in natura e seca. **Revista GEINTEC-Gestão, Inovação e Tecnologias**, 3(1), 113-120. 2013.

PESSUTO, M. B. et al., Antioxidant activity of extracts and condensed tannins from leaves of *Maytenus ilicifolia* Mart. ex Reiss. **Quím. Nova** 32 (2). 2009.

RADÜNS, M. et al. Glucosinolates and phenolic compounds rich broccoli extract: Encapsulation by electrospraying and antitumor activity against glial tumor cells. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**. v. 192, 111020, 2020.

RIBEIRO, C; MORAIS, LCC; MENDES, AR; MARCOMINI, LRS; GONÇALVES, IC. Pequenos mercados, grandes valores! – Ameixa, berinjela, brócolis, couve-flor, mirtilo e 10 pitaita prometem ganhar ainda mais espaço no Brasil. **Brasil Hortifruti**, v.17, n.188, p.10-14, 2019.

RIBEIRO, P. S. **Determinação do teor de compostos fenólicos, flavonoides, antocianinas e atividade antioxidante de extratos brutos metanólico para folha e etanólico para casca de *Caryocar brasiliense***. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Uberlândia Campus Patos de Minas. 2019.

ROCHA, A. P. T., LISBOA, H. M., ALSINA, O. L. S., & SILVA, O. S. Coating process of *Phyllanthus niruri* Linn granules using spouted bed - **Powder technology**, v. 336, p. 85-91, 2018.

SANCHES, A. G.; COSTA, J. M.; SILVA, M. B.; MOREIRA, E. G. S. Utilização de radiação gama e amido de milho no armazenamento pós-colheita das folhas de couve manteiga. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 3, n. 4, p. 2431, 2016.

SIMÕES, C.M.O. et al. **Farmagnosia da planta ao medicamento**. 6. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2010.

SOUZA, P. J.; NOVELLO, D.; ALMEIDA, J. M.; QUINTILIANO, D. A. Análise sensorial e nutricional de torta salgada elaborada através do aproveitamento alternativo de talos e cascas de hortaliças. **Alimentos e Nutrição**. Araraquara v. 18, n. 1, p. 55-60, 2007.

WATERHOUSE, A. L. Determination of total phenolics. **Current protocols in food analytical chemistry**, v. 6, n. 1, New York: John Wiley & Sons, 2002.



## 5. CONCLUSÕES GERAIS

Pode-se inferir que a cinética de secagem das folhas de brócolis em secador convectivo foi conduzida com êxito, visto que todos os modelos testados proporcionaram ajustes satisfatórios aos dados experimentais com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superior a 99%. O modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou a cinética de secagem das folhas de brócolis. A secagem apresentou uma energia de ativação de  $27,0671 \text{ kJ mol}^{-1}$ . A variação da energia livre de Gibbs aumentou com o incremento da temperatura, enquanto que a entalpia e entropia diminuíram. As variações na entalpia, entropia e energia livre de Gibbs, acarretadas pela utilização de temperaturas de secagem na faixa entre 50 e 70 °C, se situaram em valores aproximados de 0,60, 0,15 e 4,83%, respectivamente.

A média do rendimento dos pós do extrato concentrado de folhas de brócolis após secagem em leito de jorro se encontrou próximo a 50%, sendo esse um resultado satisfatório e de elevado aproveitamento. O teor de flavonoides foi em média  $48,340 \text{ mg}/100\text{g}$ , sendo esse um valor considerado elevado para as condições em que o delineamento experimental foi conduzido. No rendimento o efeito observado foi positivo, ou seja, ao aumentar a concentração de maltodextrina no processo haverá um aumento esperado na média da variável rendimento, contudo, o gasto com insumos aumentaria e poderia mascarar a real composição do extrato em pó obtido. Para o rendimento o F calculado obtido foi 4,03 e para o teor de água 2,52, decorrendo uma não significância no processo para essas duas variáveis dependentes. Para o teor de flavonoides obtivemos um F calculado de 40,22, ou seja, é possível afirmar que essa variável dependente foi estatisticamente significativa ao processo. Portanto, é possível reafirmar que o pó de folhas de brócolis possui propriedades antioxidantes que podem ser agregadas em outros produtos alimentícios de interesse para aproveitamento desta qualidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, R. et al. Phytochemical delivery through nanocarriers: a review. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 197, p. 111389, 2021.

ALSINA, O.L.S., SILVA, O.S & CAVALCANTE, J. A., "**Fluidodinâmica em leito de jorro de mistura de partículas na tecnologia de alimentos**", I Congresso Ibero-Americano de Engenharia de Alimentos, Campinas, 1996.

ANUÁRIO BRASILEIRO DE HORTI & FRUTI. KIST, B. B. et al. **Horticultura – Brasil**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 96p., 2019.

AGHDAM, M.S., FLORES, F.B. SEDAGHATI, B. Exogenous phytosulfokine  $\alpha$  (PSK $\alpha$ ) application delays senescence and relieves decay in strawberry fruit during cold storage by triggering extracellular ATP signaling and improving ROS scavenging system activity. **Scientia Horticulturae**, v.279, p. 109906, 2021.

AOAC. Association of Official Analytical Chemists. **Official Methods of Analysis**. 18th ed, 3th review, Washington, USA: AOAC, 1094 p., 2010.

ARES, A. M. Optimized extraction, separation and quantification of twelve intact glucosinolates in broccoli leaves. **Food Chemistry**, Barking, v. 152, p. 66-74, 2014.

BOBBIO, F. O., EL DASH, A. A., BOBBIO, P. A., & RODRIGUES, L. R. (1978). Isolation and characterization of the physicochemical properties of the starch of jackfruit seeds (*Artocarpus heterophyllus*). **Cereal Chemistry**. v. 55, p. 505–511, 1978.

BOTT, R.F. **Influência do processo de obtenção, das condições de armazenagem e das propriedades físico-químicas sobre a estabilidade de extratos secos padronizados de plantas medicinais**. 182p. Ribeirão Preto, Tese de Doutorado - Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, 2008.

BORTOLIN, R. C CAREGNATO, F. F., JUNIOR, A. M. D., ZANOTTO-FILHO, A., MORESCO, K. S., DE OLIVEIRA RIOS, A., GELAIN, D. P "Chronic ozone exposure alters the secondary metabolite profile, antioxidant potential, anti-inflammatory property, and quality of red pepper fruit from *Capsicum baccatum*." **Ecotoxicology and environmental safety**, v.129, p. 16-24, 2016.

BRADFORD, M. M.; Anal. **Biochem**, v.72, n.248. 1976.

BROECKX, G.; VANDENHEUVEL, D.; CLAES, I. J. J.; LEBEER, S.; KIEKENS, F. Drying techniques of probiotic bacteria as an important step towards the development of novel pharmabiotics. **International Journal of Pharmaceutics**, v.505, n.1-2, p.303 - 318, 2016.

CALDAS, T. W., MAZZA, K. E. L., TELES, A. S. C., MATTOS, G. N., BRIGIDA, A. I. S., CONTE-JUNIOR, C. A., BORGUINI, R. G., GODOY, R. L. O., CABRAL, L. M. C., & TONON, R. V. Phenolic compounds recovery from grape skin using conventional and non-conventional extraction methods. **Industrial Crops and Products**, v. 111, p. 86-91, 2018.

CARTER, A.; BRIENS, L. Inline acoustic monitoring to determine fluidized bed performance during pharmaceutical coating. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 549, n. 1-2, p. 293-298, 2018.

CASTILLEJO, N. et al. Postharvest LED lighting: effect of red, blue and far red on quality of minimally processed broccoli sprouts. **Science of Food and Agriculture**, v. 101, n. 1, p. 44-53, 2020.

CAVALCANTE, C. E. B., RODRIGUES, S., AFONSO, M. R. A.; COSTA, J. M. C. Avaliação dos parâmetros de secagem da polpa de graviola em pó obtida por secagem em spray dryer. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.20, 2017.

CHANDRA, S.; MEJÍA, E. G. Polyphenolic Compounds, Antioxidant Capacity, and Quinone Reductase Activity of an Aqueous Extract of *Ardisia compressa* in Comparison to Mate (*Ilex paraguariensis*) and Green (*Camellia sinensis*) Teas. **J. Agric. Food Chem.**, v.52, p.3583-3589, 2004.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Monitoramento agrícola.** Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Brasília, v. 3, n. 9, p. 43-62, 2016.

COMUNIAN, T. A.; SILVA, M. P.; SOUZA, C. J. F. The use of food by-products as a novel for functional foods: Their use as ingredients and for the encapsulation process. **Trends in Food Science and Technology**, v. 108, p. 269–280, 1 fev. 2021.

CORRÊA, P. C., Oliveira, G. H. H., Botelho, F. M., Goneli, A. L. D., & Carvalho, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, n.5,p. 595-601, 2012.

COSTA, J. C. F. D., & HOSCHEID, J. Perfil fitoquímico e avaliação da atividade antimicrobiana de extratos aquoso e etanólico de folhas de *Cecropia pachystachya*. **Revista Fitos**. v. 12, n. 2, p.175-185, 2018.

COSTA, T. P.; ZORZI, B.; NORA, F. B. D.; WESTPHALEN, G. F.; ROSA, G. S. Otimização experimental do recobrimento de partículas de uréia em leite de jorro. **Anais**. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos, 2015.

CRANK, J. The mathematics of diffusion (2nd ed., p. 414). **Oxford: Clarendon Press**. 1975.

CREMASCO, Marco Aurélio. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos**. São Paulo: Blucher, 2012.

DA FROTA, M. L. C., BRAGANHOL, E., CANEDO, A. D., KLAMT, F., APEL, M. A., MOTHE, B., ... & MOREIRA, J. C. F. "Brazilian marine sponge *Polymastia janeirensis* induces apoptotic cell death in human U138MG glioma cell line, but not in a normal cell culture." **Investigational new drugs**, v. 27, n. 1, p. 13-20, 2009.

DAIUTO, E. R.; VIEITES, R. L.; PIGOLI, D. R.; CARVALHO, L. R. Estabilidade de minerais em hortaliças submetidas a diferentes métodos de cozimento. **Nativa**, Sinop, v. 03, n. 02, p. 102-108, 2015.

DIÓGENES AMG, QUEIROZ AJM, FIGUEIRÊDO RMF, SANTOS DC. Cinética de secagem de grãos de abóbora. **Revista Caatinga**, v. 26, n.1, p.71-80, 2013.

DOMÍNGUEZ-PERLES, R.; MARTÍNEZ-BALLESTA, M.C; CARVAJAL, M; GARCÍA-VIGUERA, C.; MORENO, D. A. Broccoli-derived by-products – A promising source of bioactive ingredients. **Journal of Food Science**, v.75, n.4, p. C383-C392, 2010.

DONIDA, M. W. **Recobrimento polimérico de ureia em leite de jorro bidimensional**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

DRABINSKA, N.; CISKA, E.; SZMATOWICZ, B.; KRUPA-KOZAK, U. Broccoli by-products improve the nutraceutical potential of gluten-free mini sponge cakes. **Food Chemistry**, v. 267, p. 170-177, 2018.

DRAPER, H. H., SQUIRES, E. J., MAHMOODI, H., WU, J., AGARWAL, S., & HADLEY, M. "A comparative evaluation of thiobarbituric acid methods for the determination of malondialdehyde in biological materials." **Free Radic Biol Med**, v. 15, n. 4, p. 353-363, 1993.

DUARTE-SIERRA, A. NADEAU, F. ANGERS, P. MICHAUD, D. ARUL, J. UV-C hormesis in broccoli florets: Preservation, phyto-compounds and gene expression. **Postharvest Biology and Technology**, v.157, p. 110965, 2019.

EXPOSTO, B. S. **Aproveitamento de subproduto obtido após processamento de cenouras: extração de compostos fitoquímicos, encapsulação e aplicação em filmes biodegradáveis**. Dissertação de Mestrado, apresentada à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto/USP – Área de concentração: Química. Ribeirão Preto, 2021.

FALEIROS, M. F. et al. Estudo da Fluidodinâmica em um Leito de Jorro Bidimensional com Alimentação não Convencional. In: **Anais XIX Jornada de Engenharia Química**. Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

FARMACOPÉIA brasileira, 4. Ed., São Paulo: Atheneu, 1988. pte. 1, 526p.

FERNANDES, M. R. V.; DIAS, A. L. T.; CARVALHO, R. R.; SOUZA, C. R. F.; OLIVEIRA, W. P. Antioxidant and antimicrobial activities of *Psidium guajava* L. spray dried extracts. *Industrial Crops and Products*, v. 60, p. 39-44, 2014.

FERREIRA, A.; SOUSA, S.; LIMA, D.; COSTA, J. Caracterização de polpa de cajá em pó obtida pelo método de secagem em leito de jorro. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v.1, n.2, p.3997-4004, 2015.

FERREIRA, S.; SOUZA, R. J.; GOMES, L. A. A. Produtividade de brócolis de verão com diferentes doses de bokashi. **Revista Agrogeoambiental**, v. 5, n. 2, caderno II, p.31-38, 2013.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **The state of food and agriculture, 2019: moving forward on food loss and waste reduction**. FAO, Rome 2– 13. 2019.

FRANCIS, F. J. Analysis of anthocyanins. In: MARKAKIS, P. (Ed.). *Anthocyanins as food colors*. **New York: Academic Press**, p.181-207. 1982.

FRANCISCO, De A. S. E S.; CARLOS, A. V. De A. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 39, p. 3733–3740, 2016.

GONELI, A. L. D. et al. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesq. Agropec. Trop.**, v. 44, n. 1, p. 56 -64, 2014.

GOSAVI, S.; KULKARNI, N.; MATHPATI, C. S.; MANDAL, D. CFD modeling to determine the minimum fluidization velocity of particles in gas-solid fluidized bed at different temperatures. **Powder Technology**, v. 327, p. 109-119, 2018.

GOULA, A. M. et al. Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids from pomegranate wastes using vegetable oils. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 34, p. 821–830, 2017.

GRÃOS. Polímeros proporcionam maior uniformidade no plantio. **Campo e Negócios**. 2014. Disponível em: <http://www.revistacampoenegocios.com.br/polimeros-proporcionam-maioruniformidade-no-plantio/>. Acesso em: 08 de ago. de 2020.

GUSMÃO, R.P.; CAVALCANTI-MATA, M. E. R. M.; DUARTE, M. E. M.; GUSMÃO, T.A.S. Particle size, morphological, rheological, physicochemical characterization and designation of minerals in mesquite flour (*Prosopis juliflora*). **Journal of Cereal Science**. v.69, p.119-124, 2016.

KACZMAREK, J. L.; LIU, X.; CHARRON, C. S.; NOVOTNY, J. A.; JEFFERY, E. H.; ...; HOLSCHER, H. D. Broccoli consumption affects the human gastrointestinal microbiota. **Journal of Nutritional Biochemistry**, p. 27-34, 63, 2019.

LELIS, R.C.C. Zur **Bedeutung der Kerninhaltsstoffe obligatorisch verkernter Nadelbaumarten bei der Herstellung von feuchtebeständigen und biologisch resistenten Holzspanplatten, am Beispiel der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco)**. Dissertation an der Forstlichen Fakultät de Universität Göttingen, Tese de Doutorado, 1995.

LICHTENTHALER, H.K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, v.148, p.349-382, 1987.

LIU, M; ZHANG, L; SER, SL; CUMMING, JR; KU, KM. Comparative phytonutrient analysis of broccoli by-products: The potentials for broccoli by-product utilization. **Molecules**, v.23, p. 900, 2018.

LOURENÇO, S. C.; MOLDÃO-MARTINS, M.; ALVES, V. D. Antioxidants of natural plant origins: From sources to food industry applications. **Molecules**, v. 24, n. 22, p. 4132, 2020.

LUDWIG, M. P. et al. QUALIDADE DE SEMENTES DE SOJA ARMAZENADAS APÓS RECOBRIMENTO COM AMINOÁCIDO, POLÍMERO, FUNGICIDA E INSETICIDA. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, n. 3 p. 395 - 406, 2011.

MADAMBA, P. S. Thin layer drying models for osmotically pré-dried young coconut. **Drying technology**, v.21, n.9, p.1759-1780, 2003.

MAK, M.; XIONG, X.; TSANG, D. C.; IRIS, K.; POON, C. S. Gestão sustentável de resíduos alimentares para a bioeconomia circular: revisão de políticas, limitações e oportunidades. **Biorecurso. Tecnol**, v.297, p. 122497, 2020.

MANASA, V.; PADMANABHAN, A.; ANU APPAIAH, K. A. Utilization of coffee pulp waste for rapid recovery of pectin and polyphenols for sustainable material recycle. **Waste Management**, v. 120, p. 762–771, 1 fev. 2021.

MARTINAZZO AP, MELO EC, DEMUNER AJ, BERBET PA. Avaliação do óleo essencial folhas de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf após o processo de secagem. **Boletim Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas**, v. 12, n.1, p.115-122, 2013.

MARTINEZ, C., CUEVAS, F. Evaluación de localidad culinaria y molinería del arroz. **Guia de estudo CIAT**, p. 75, 1989.

MARTINS, J. N. **Obtenção de extrato seco de cumaru pelo processo de secagem em leite de jorro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2013.

MAZUREK, A., JAMROZ, J. Precision of dehydroascorbic acid quantitation with the use of the subtraction method – Validation of HPLC–DAD method for determination of total vitamin C in food. **Food Chemistry**, v. 173, p. 543–550, 2015.

MENON, A.; STOJCESKA, V. A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. **Trends in Food Science & Technology**. v. 100, p. 67-76, 2020.

MILLER, G. L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry**, v.31, n.3, p.426 - 428, 1959.

MIRABELLA, N.; CASTELLANI, V.; SALA, S. Current options for the valorization of food manufacturing waste: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p.28-41, 2014.



MORRISON, I. M.; ASIEDU, E. A.; STUCHBURY, T.; POWELL, A. A. Determination of lignin and tannin contents of Cowpea seed coats. **Annals of Botany**, v.76, n.3, p.287-290, 1995.

NABUCO, C. Benefícios e modos de uso de couve, brócolis e mais vegetais verde-escuros. **Veja Saúde**. 2019. Disponível em: <https://saude.abril.com.br/alimentacao/couve-espinafre-brocolis-saiba-tudo-sobre-os-vegetais-verde-escuros/>>. Acesso em 05 de ago. de 2020.

NINČEVIĆ GRASSINO, A. et al. Application of high hydrostatic pressure and ultrasound-assisted extractions as a novel approach for pectin and polyphenols recovery from tomato peel waste. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 64, p. 102424, 1 ago. 2020.

NIRMALA, C.; BISHT, M. S.; BAJWA, H. K.; SANTOSH, O. Bamboo: A rich source of natural antioxidants and its applications in the food and pharmaceutical industry. **Trends in Food Science & Technology**, v.77, p. 91-99, 2018.

O'CONNOR, J. et al. A review on the valorisation of food waste as a nutrient source and soil amendment. **Environmental Pollution**, v. 272, 2021.

OLIVEIRA, A. D. S., FIGUEIRÊDO, R. M., QUEIROZ, A. J. D. M.; BRITO, J. G. D. Estabilidade da polpa do *Cereus jamacaru* em pó durante o armazenamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 147-153, 2015.

OLIVEIRA D. E. C. D.; RESENDE O.; SMANIOTTO T. A. D. S.; SOUSA K. A. D.; CAMPOS C. C. Propriedades termodinâmicas de grãos de milho para diferentes teores de água de equilíbrio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 1, p. 50-56. 2013a.

OLIVEIRA, H. A.; VAREJÃO, M. J. C.; CRUZ, I. A. Determinação de constituintes químicos e extrativos das madeiras de espécies florestais amazônicas. **II Congresso de Iniciação Científica PIBIC/CNPq - PAIC/FAPEAM**. Manaus. 2013b.

OLSZEWSKA, M. A.; GEÇDAS, A.; SIMÕES, M. Antimicrobial polyphenol-rich extracts: Applications and limitations in the food industry. **Food Research International**, v. 134, 2020.

ONWUDE, D. I. et al. Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 15, p. 599-618, 2016.

ORDIALES, E; IGLESIAS, DJ; ALARCÓN, MV; ZAJARA, L, GIL, J; GUTIÉRREZ, JI; SALGUERO, J. Characteristics defining broccoli cultivars from different seed producers. **International Journal of Agronomy**, 2017.

PACHÚ, C. O. **Processamento de plantas medicinais para obtenção de extratos secos e líquidos**. Campina Grande: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Tese (Doutorado). 102p., 2007.

PALAMANIT, A., PRACHAYAWARAKORN, S., TUNGTRAKUL, P., & SOPONRONNARIT, S. Performance evaluation of top-spray fluidized bed coating for healthy coated rice production. **Food and bioprocess technology**, v. 9, n. 8, p. 1317-1326, 2016.

PENA, Carlos. Um blog dedicado ao cultivo de hortaliças e flores, envolvendo: semeio, preparo do solo, plantio, tratos culturais, colheita e comercialização. **Horta e Flores**. 2018. Disponível em: <<https://www.hortae flores.com/2018/04/cultivares-e-composicao-nutricional-do.html>>. Acesso em: 05 de ago. de 2020.

PROSKY, L., ASP, NG., SCHWEIZER, TF., DEVRIES, JW., FURDA, I. Determination of insoluble, soluble and total dietary fiber in foods and food products: Interlaboratory study. **Journal of the Association of Official Analytical Chemists**, v. 71, p. 1017-1024, 1988.

RADÜNS, M. et al. Glucosinolates and phenolic compounds rich broccoli extract: Encapsulation by electrospraying and antitumor activity against glial tumor cells. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 192, 2020.

ROCHA, A.P.T. **Estudo do processo de recobrimento contínuo de extratos fitoterápicos secos em leito de jorro**. Campina Grande: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande. Tese (Doutorado). 149p., 2006.

RODRIGUES, M. I., & IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. Cárita Editora, 3<sup>a</sup> ed. – Campinas, SP: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2014.

SCHIAVON, A. **A cultura dos brócolis**. BRASÍLIA-DF: EMBRAPA-COLEÇÃO PLANTAR. 2015.

SHARMA, K. D. et al. Chemical composition, functional properties and processing of carrot- A review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 49, n. 1, p. 22–32, 2012.

SHEA, N. O.; ARENDT, E. K.; GALLAGHER, E. Dietary fibre and phytochemical characteristics of fruit and vegetable by-products and their recent applications as novel ingredients in food products. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 16, p. 1-10, 2012.

SILVA ESS, OLIVEIRA J, MACHADO AV, COSTA RO. Secagem de Grãos e Frutas: Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, v. 5, n.1, p.19-23, 2015.

SMIDERLE, O. J., SANTOS FILHO, B. D., SANTOS, D. D., LOECK, A. E., & SILVA, J. D. Qualidade física e fisiológica de sementes de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) submetidas ao ataque de *Rhizopertha dominica* Fabricius e *Sitophilus* sp. durante o armazenamento. **Revista Brasileira de Sementes**, v.19, n.1, p.1-8, 1997.

SOARES, A. C.; PEREIRA, N. R. Secagem da polpa de jambolão (*Syzygium cumini*) em secador de leito de jorro: efeito da clara de ovo como agente carreador de secagem na qualidade do produto. **Braz. J. Food Technol.**, v. 23, 2020

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI). **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil-200**, Pelotas, 2016.

SOENGAS, P.; CARTEA, ME.; FRANCISCO, M.; SOTELO, T.; VELASCO, P. New insights into antioxidant activity of Brassica crops. **Food Chemistry**, v. 134, p. 725-733, 2012.

SOUZA, D. L.; DE SOUZA OLIVEIRA, A.; FERRATO, F. S.; TIBOLA, F. L.; FREITAS, G.; RODRIGUES, I. F.; DOS SANTOS, K. G. Desenvolvimento e construção de leite de jorro para recobrimento de partículas de ureia. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, v. 4, n. 1, p.32-45, 2019.

SOUZA, P. J.; NOVELLO, D.; ALMEIDA, J. M.; QUINTILIANO, D. A. Análise sensorial e nutricional de torta salgada elaborada através do aproveitamento alternativo de talos e cascas de hortaliças. **Alimentos e Nutrição**. Araraquara v. 18, n. 1, p. 55-60, 2007.

SRISANG, N., VARANYANOND, W., SOPONRONNARIT, S., & PRACHAYAWARAKORN, S. Effects of heating media and operating conditions on drying kinetics and quality of germinated brown rice. **Journal of Food Engineering**, v.107, n. 3-4, p. 385-392, 2011.

STANSELL, Z; BJÖRKMAN, T. From landrace to modern hybrid broccoli: the genomic and morphological domestication syndrome within a diverse B. oleracea collection. **Horticulture Research**, v. 7, p. 1-17, 2020.

STORCK, C. R., NUNES, G. L., DE OLIVEIRA, B. B., BASSO, C. Folhas, talos, cascas e sementes de vegetais: composição nutricional, aproveitamento na alimentação e análise sensorial de preparações. **Ciência Rural**, v. 43, n. 3, p. 537-543, 2013.

TARANTO, O. P. **Monitoramento de Regimes e Recobrimento de Partículas em Leitos de Jorro Bidimensionais**, Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Tese (Doutorado), 1996.

TEDESCO, M. P. **Filmes de desintegração oral produzidos por tape casting – perspectiva para veiculação de compostos ativos extraídos do resíduo industrial de acerola** (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, 2018.

TEIXEIRA, Vanessa; PEREIRA, Conceição; SAMPAIO, Cristiane. Avaliação do Desperdício de Hortaliças e Frutas em um Restaurante comercial de Viçosa, MG. **Anais II SIMPAC**, Viçosa - MG, v. 2, n. 1, p. 287–292, 2010.

THOMAS, M; BADR, A; DESJARDINS, Y; GOSSELIN, A; ANGERS, P. Characterization of industrial broccoli discards (*Brassica oleracea* var. *italica*) for their glucosinolate, polyphenol and flavonoid contents using UPLC MS/MS and spectrophotometric methods. **Food Chemistry**, v. 245, p. 1204-1211, 2017.

THOMAZ, M. et al. Characterization of industrial broccoli discards (*Brassica oleracea* var. *italica*) for their glucosinolate, polyphenol and flavonoid contents using UPLC MS/MS and spectrophotometric methods. **Food Chemistry**, v. 245, p.1204–1211, 2018.

TONINI, D.; ALBIZZATI, P. F.; ASTRUP, T. F. Environmental impacts of food waste: Learnings and challenges from a case study on UK. **Waste Management**, v. 76, p. 744–766, 2018.

TREVISAN J. N. **Crescimento, desenvolvimento e produção de brócolis de cabeça única**. Dissertação de mestrado – 2013. Curso de Pós graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, RS. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/5097/TRE>

VALLEJO, F. et al. Potential bioactive compounds in health promotion from broccoli cultivars grown in Spain. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. v.82, p.1293–1297, 2002.

VEIGA-SANTOS, P.; SCAPARINI, A. R. P. **Indicador irreversível de temperatura utilizando carboidratos**. Patente protocolizada no INPJ, 2004.

WATERHOUSE, A. L. Determination of total phenolics. **Current protocols in food analytical chemistry**, v. 6, n. 1, New York: John Wiley & Sons, 2002.

WIJNGAARD, H; HOSSAIN, M. B.; RAI, D. K.; BRUNTON, N. Techniques to extract bioactive compounds from food by-products of plant origin. **Food Res. Int.**, v. 46, p. 505-513, 2012.

XIONG, X.; YU, I. K. M.; TSANG, D. C. W.; BOLAN, N. S.; SIK, Y.; IGALAVITHANA, A. D.; KIRKHAM, M. B.; KIM, K. H.; VIKRANT, K. Value-added chemicals from food supply chain wastes: state-of-the-art review and future prospects. **Chem. Eng. J.**, v.375, p. 121983, 2019.

YEMM, E. W.; WILLIS, A. J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. **Biochemical Journal**, v.57, n.3, p.508-515, 1954.

ZANOELO, E. F.; CELSO, G. M.; KASKANTZIS, G. Drying kinetics of mate leaves in a packed bed dryer. **Byosystems Engineering**, v.96, n.4, p.487- 494, 2007

ZAMUZ, S.; LÓPEZ-PEDROUSO, M.; BARBA, F. J.; LORENZO, J. M.; DOMÍNGUEZ, H.; FRANCO, D. Application of hull, bur and leaf chestnut extracts on the shelf-life of beef patties stored under MAP: Evaluation of their impact on physicochemical properties, lipid oxidation, antioxidant, and antimicrobial potential. **Food Research International**, v. 112, p. 263-273, 2018.