



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE NUTRIÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM NUTRIÇÃO

RUFINO ANTÓNIO INFANTE

**EFEITO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E NUTRICIONAIS DA
UTILIZAÇÃO DO ULTRASSOM COMO PRÉ-TRATAMENTO DA SECAGEM DE
BATATA-DOCE (IPOMOEA BATATAS) BIOFORTIFICADA, CULTIVAR
BEAUREGARD**

Recife

2021

RUFINO ANTÓNIO INFANTE

**EFEITO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E NUTRICIONAIS DA
UTILIZAÇÃO DO ULTRASSOM COMO PRÉ-TRATAMENTO DA SECAGEM DE
BATATA-DOCE (IPOMOEA BATATAS) BIOFORTIFICADA, CULTIVAR
BEAUREGARD**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Nutrição da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Doutor em Nutrição.

Área de concentração: Ciência dos alimentos

Orientadora: Profa. Margarida Angélica da Silva Vasconcelos

Recife

2021

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Mônica Uchôa, CRB4-1010

I43e

Infante, Rufino Antônio.

Efeito sobre as características estruturais e nutricionais da utilização do ultrassom como pré-tratamento da secagem de batata-doce (*Ipomoea batatas*) biofortificada, cultivar *Beauregard* / Rufino Antônio Infante.– 2021.

71 f.: il.; tab.; 30 cm.

Orientadora: Margarida Angélica da Silva Vasconcelos.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, CCS. Programa de Pós-Graduação em Nutrição. Recife, 2021.

Inclui referências e apêndices.

1. Antioxidante. 2. Batata-doce biofortificada. 3. Carotenóides. 4. Microestrutura. 5. Ultrassom. I. Vasconcelos, Margarida Angélica da Silva (Orientadora). II. Título.

612.3 CDD (20.ed.)

UFPE (CCS2021-089)

RUFINO ANTÓNIO INFANTE

**EFEITO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E NUTRICIONAIS DA
UTILIZAÇÃO DO ULTRASSOM COMO PRÉ-TRATAMENTO DA SECAGEM DE
BATATA-DOCE (IPOMOEA BATATAS) BIOFORTIFICADA, CULTIVAR
BEAUREGARD**

Tese aprovada no Programa de Pós-
Graduação em Nutrição em 22 de fevereiro
de 2021

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dra Thayza Christina Montenegro Stamford
Centro de Ciências Médicas/UFPE

Prof^a. Dra Tânia Lúcia Montenegro Stamford
Departamento de Nutrição/UFPE

Prof^a. Dra Lucia Raquel Ramos
Programa de pós-graduação em produção agrícola/UFRPE

Prof. Dr Marcos António Barbosa de Lima
Departamento de Biologia/UFRPE

Prof^a. Dra Natalia Ferrão C.B. Melo
Departamento de Nutrição/UFPE

Recife/PE
2021

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, que me deu forças para vencer todas as dificuldades. A minha família com quem compartilhei todos momentos, dedico especialmente às minhas filhas Keissy e Kiara.

Por detrás do meu progresso (profissional e ACADÉMICO) está uma grande mulher: MINHA MÃE MIQUELINA PAULO SAVECA INFANTE!

No princípio foi tudo lindo, não faltava nada em casa, tínhamos uma vida mediana no bairro de matadouro, cidade de Maxixe. Nos meados de 1991, na reta final da guerra civil. Por razões alheias tivemos que rumar para Gaza, uma paragem curta na cidade de Xai-xai, de lá fomos até a vila de Mandlakazi, onde fixamos a residência até hoje.

A vida não foi tão fácil assim, eu e minha irmã mais velha tivemos que esquecer a vida mediana. Minha mãe sempre dizia: “fundani vananga, mina pode diznga yambali mas wina na mi funda” e na verdade a minha mãe nunca foi vaidosa no vestuário, sempre e até hoje com roupas humildes nem parecia uma funcionaria sênior das TDM (aposentada desde outubro de 2014). Para quem conhece as margens da lagoa de sulwé, lá iam todos os sábados de manhã desbravar o teimoso caniço que nunca acabava na machamba, e mama dizia “vananga, rimani, loko hi fica kaya mita puza a tchai la leite cremora”.

Percorríamos cerca de 13 km, da vila até chaguala para culimar, percorríamos 12 km até chalala pa apanhar castanha e caju, além de colimar e mais.

Mama sempre andou de chinelos assegurados por arrames só para nós como filhos andarmos de bons chilenos e termos uma boa educação.

Fui fazer nível médio na cidade de Xai-xai, pagava internamento 400 MZN por mês (no lar Joaquim Chissano) e mamã mandava-me por mês 600 MZN, isso, mesmo, 600 MZN, (2002-2003), tinha que me virar com essa mola. Ela sempre dizia “saiba viver com o pouco e não cobiçar coisas alheias”. Terminei o nível médio, trabalhei em 2004 na Escola secundária Ecumênica São João de Chidenguele. Em 2005 admi para UEM, por mês recebia 1000 MZN, casa pagava 500 MZN na Polana Caniço, restavam 500 para fichas, comida, etc, mas tive que aguentar com isso. E minha mãe dizia “nada se ganha sem sacrifício filho” e essa era minha frase de guerra, mesmo com tremendas dificuldades, fiz o curso em tempo recorde. O meu sonho era ver minha mãe no lendário e épico pavilhão de académica a ver o seu primeiro filho a receber diploma de graduação como fruto do seu suor e sacrifício, o sonho concretizou se no dia 5 de novembro de 2009, eu e meus pais lá fomos e recebi o diploma.

Fiz mestrado, dediquei a mamã, meu sonho é dedicar a tese de doutorado a mamã, aliás, na verdade no final de tudo isto, a verdadeira Ph.D será mesmo a mama.**Ph.D Miquelina.**

Hoje sou pai de duas filhas lindas, maravilhosas e cheias de saúde, a minha primeira filha dediquei com todo orgulho a mamã, registada com o nome: Keissy Miquelina Rufino Infante.

Obrigado por tudo, obrigado mesmo mãe.

A sua paciência de nos aturar, e aturar a família em geral é um sinal inequívoca de tolerância e amor ao próximo.

Senhor! Obrigado por me dar força e convicção. Obrigado por me guiar através da minha mãe,

Mamã MIQUELINA, eu penso e olho em você como uma luz no cabo, um farol, afastando de mim as pedras e obstáculos da vida. Mãe, você é minha BÚSSOLA, Minha BENGALA.

Eu amo você mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter iluminado meus caminhos.

Agradeço aos meus pais António e Miquelina, meus guerreiros e companheiros. Agradeço, ainda, as minhas irmãs Inês e Hermínia pela amizade, que mesmo nas diferenças só mostram o quanto a gente se completa.

À minha orientadora, Margarida Angélica da Silva Vasconcelos, por me aceitar como orientando e me conceder a alegria de participar e aprender e pela confiança para a efetivação desta tese e que nutro uma admiração pela sua parte humana, social, atenciosa, pela atenção que sempre teve com minha família, mesmo sem conhecê-la, sempre procurou proporcionar alegria com mensagens de carinhos e com presentes. Muito obrigado professora pelo coração generoso, que Deus te abençoe.

Ao pesquisador Wilson Souza de Mendonça do Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise e Nanotecnologia, Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste – CETENE, pelo apoio incondicional desde o primeiro dia que nos conhecemos. Foi com ele que desenhamos as primeiras ideias para esta presente pesquisa.

À coordenação, aos docentes e técnicos da Pós-graduação em nutrição da UFPE.

À CAPES, por viabilizar esta pesquisa através da concessão de bolsas de estudos.

À professora Patrícia Moreira Azoubel, Professor Marcos António Barbosa de Lima pela concessão do equipamento/material laboratorial de forma voluntária e incondicional para realização dos experimentos da minha tese e pelo aprendizado.

À professora Thayza Christina Montenegro Stamford, pelo apoio em todas as fases da pesquisa, sempre com seu sorriso contagiante.

A colega Edilene Souza Da Silva do Laboratório de Engenharia de Alimentos. Departamento de Engenharia Química/UFPE. por me aturar nos meus primeiros passos da pesquisa (secagem da batata), tenho grande apreço pela pessoa que ela é. E aqueles que mesmo não sendo nominalmente citados foram essenciais nessa caminhada, o meu muito obrigado.

“Senhor! Obrigado por me dar força e convicção. Obrigado por me guiar, sem falhas. Por me manter resoluto, quando tudo em redor parecia perdido sobretudo neste momento da pandemia, a COVID-19, que fez com que muita coisa parasse incluindo as Universidades. Obrigado pela proteção e pelos seus muitos sinais ao longo do percurso. Obrigado por qualquer bem que eu tenha praticado. Lamento tanto o mal. Obrigado pelos professores, funcionários e técnicos de laboratórios da Pós-graduação em nutrição da UFPE, pelos colegas, amigos que tive e tenho. Por favor,

vela por eles como velas por mim. Obrigado por, finalmente, me deixares terminar o doutorado. Estou estourado, mas com o dever de missão cumprida na íntegra e em paz, na esperança de ter empregue bem o meu tempo no Brasil”.

In o filme *The book of Eli*, Denzel Hayes Washington

(Adaptado).

"Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor, mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas, Graças à Deus, não somos o que éramos antes."

Martin Luther King

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar a utilização do ultrassom como pré-tratamento na secagem da batata-doce biofortificada, seu efeito sobre as características estruturais e nutricionais. A etapa de pré-tratamento foi realizada em banho ultrassônico a 30 ° C / 10 min. As amostras foram secas a 50 ° C e 70 ° C e seis modelos de camada fina foram utilizados para ajustar os dados experimentais de secagem. A microestrutura foi caracterizada por microscopia eletrônica de varredura e a estrutura foi analisada por espectroscopia no infravermelho. O teor de carotenóides totais foi quantificado e determinou-se a atividade antioxidante. Os resultados mostraram que, após o ultrassom, as amostras ganharam água, resultando em valores negativos para a perda de água. O modelo exponencial de dois termos foi o mais adequado na predição dos dados de secagem. O tempo de secagem foi reduzido por ultrassom e aumentando a temperatura de secagem; O ultrassom causou maior aglomeração e quebra da estrutura das amostras, aumentando porosidade e taxas de secagem. Análise de espectroscopia de absorção por infravermelho revelou semelhanças de grupos funcionais em ambos os grupos. A secagem causou uma diminuição do teor de carotenóides totais e influenciou a atividade antioxidante. No entanto, as amostras pré-tratadas com ultrassom, produziram menor perda total de carotenóides. Portanto, seria interessante determinar o perfil dos carotenóides presentes nas amostras em ambos tratamentos, adicionalmente, desenvolver produto e analisar nutricional e sensorialmente. Mesmo com o avanço do conhecimento e das evidências científicas das múltiplas vantagens do ultrassom, por ser ainda semi-piloto o uso desta tecnologia emergente-ultrassom e sua transferência para a indústria vai levar seu tempo.

Palavras-Chaves: Antioxidante; Carotenóides; Ipomoea batatas; Microestrutura; Ultrassom.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the use of ultrasound as a pretreatment in the drying of biofortified sweet potatoes, its effect on structural and nutritional characteristics. The pretreatment was carried out in an ultrasonic bath at 30 ° C for 10 min, and it was evaluated in terms of water loss and solid gain. The drying process was performed at two different temperatures (50 and 70° C). Six different semi-theoretical mathematical models were examined to characterize the drying curves, and quality analyses were executed. The two-terms exponential model provided the best simulation of the drying curves. The microstructure was characterized by scanning electron microscopy and the structure was analyzed by infrared spectroscopy. The total carotenoid content was quantified and the antioxidant activity was determined. The results showed that, after the ultrasound, the samples gained water, resulting in negative values for water loss. The two-term exponential model was the most suitable for predicting drying data. The drying time was reduced by ultrasound and the drying temperature increased; Ultrasound caused greater agglomeration and breaking of the sample structure, increasing porosity and drying rates. Infrared absorption spectroscopy analysis revealed similarities of functional groups in both groups. Drying caused a decrease in the total carotenoid content and influenced the antioxidant activity. However, samples pre-treated with ultrasound, produced less total loss of carotenoids. Therefore, it would be interesting to determine the profile of the carotenoids present in the samples in both treatments, in addition to developing product and analyzing nutritionally and sensorially. Even with the advancement of knowledge and scientific evidence of the multiple advantages of ultrasound, as it is still semi-pilot, the use of this emerging ultrasound technology and its transfer to the industry will take time.

KEYWORDS: Antioxidant; *Ipomoea batatas*; Microstructure; Carotenoids; Ultrasound.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Deficiência de micronutrientes em crianças com menos de 5 anos. OMS, 2010.	18
Figura 2 - Mapa de prevalência de deficiência de vitamina A no mundo em crianças em idade pré-escolar (1995---2005). Fonte: OMS, 2009.	19
Figura 3 - Cultivos biofortificados liberados e testados até o fim de 2017.	20
Figura 4 - Amostras frescas da batata doce Beauregard adquiridas na feira da EMEPA, em João Pessoa/Paraíba usadas na presente pesquisa.	21
Figura 5 - Desenvolvimento de produtos a partir da batata-doce biofortificada Beauregard	24
Figura 6 - Curva típica da desidratação de produtos agrícolas com taxa constante e a queda dos períodos de taxa. ONWUDE et al., 2016.	27
Figura 7 - Curvas de cinética de secagem da batata-doce Beauregard em duas temperaturas (50 e 70°C) Controle (C) e Ultrassom (US).	42
Figura 8 - Imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de batata doce Beauregard desidratada a temperatura de 50°C. Controle (A, C e E) e Ultrassom (B, D e F). As fissuras e estrangulamentos estão representados pela cor verde para o grupo controle e cor vermelha para o ultrassom.	45
Figura 9 - Imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da batata doce Beauregard desidratada a temperatura de 70°C. Controle 70 (A, C e E) e Ultrassom (B, D e F). As fissuras e estrangulamentos estão representados pela cor verde para o grupo controle e cor vermelha para o ultrassom.	46
Figura 10 - Espectros de absorção na região do infravermelho por ATR das amostras de batata-doce biofortificada.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos matemáticos ajustados às curvas de cinética secagem da batata doce.	36
Tabela 2 - Perda de água (PA) e ganho de sólidos (GS) da batata doce Beauregard com pré-tratamento nas duas temperaturas.	41
Tabela 3 - Parâmetros, coeficiente de determinação (R ²) e erro médio relativo (P%), dos modelos ajustados as curvas de secagem da batata doce Beauregard em duas temperaturas do ar (50 e 70°C) Controle e Ultrassom (C e US).	43
Tabela 4 - Carotenóides Totais da Batata-doce Biofortificada cultivar Beauregard Mesmas letras indicam que não há diferenças significativas (P < 0.05) entre diferentes tratamentos	50
Tabela 5 - Atividade Antioxidante (DPPH e ABTS+) da batata-doce biofortificada cultivar Beauregard	51

LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS

AW	Atividade de água
C	Secagem controle (sem ultrassom)
Embrapa	Empresa brasileira de pesquisa agropecuária
FAO	Food and agriculture organization
P	Erro médio relativo
R ²	Coefficiente de determinação
US	Secagem com aplicação do pré-tratamento, ultrassom

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1	BIOFORTIFICAÇÃO.....	18
2.2	ORIGEM E IMPORTÂNCIA ALIMENTAR DA BATATA-DOCE BEAUREGARD.....	20
2.3	COMPOSTOS BIOATIVOS DA BATATA-DOCE BEAUREGARD	23
2.4	FARINHAS DE BATATA DOCE BEAUREGARD	24
2.5	PROCESSOS DE DESIDRATAÇÃO	25
2.5.1	Mecanismo da desidratação	26
2.5.2	Fatores que afetam a cinética da desidratação.....	28
2.6	APLICAÇÃO DO ULTRASSOM NA DESIDRATAÇÃO DE ALIMENTOS	29
2.7	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	30
3	HIPÓTESE	32
4	OBJETIVOS	33
4.1	OBJETIVO GERAL.....	33
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
5	MATERIAL E MÉTODOS	34
5.1	OBTENÇÃO E SELEÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	34
5.2	HIGIENIZAÇÃO	34
5.3	DESCASCAMENTO E FATIAMENTO	34
5.4	PROCESSO DA SECAGEM DA BATATA- DOCE.....	35
5.4.1	Pré-tratamento: Ultrassom.....	35
5.4.2	Secagem.....	35
5.5	ANÁLISE ULTRAESTRUTURAL POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	37
5.6	ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DE ABSORÇÃO DO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURRIER (FTIR)	37
5.7	A EXTRAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS CAROTENÓIDES TOTAIS	38
5.8	DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE	38
5.8.1	Obtenção dos extratos	38
5.8.2	Determinação da Atividade Antioxidante Total pela Captura do Radical Livre DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil)	38

5.8.3	Determinação da Atividade Antioxidante Total pela Captura do Radical Livre:ABTS +	39
5.9	ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS DADOS.....	39
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
6.1	EFEITO DA ULTRASSOM NA PERDA DE ÁGUA E GANHO DE SÓLIDOS SOLÚVEIS.....	40
6.2	TEMPERATURAS DE SECAGEM.....	41
6.3	MODELAGEM MATEMÁTICA DE SECAGEM.....	42
6.4	ANÁLISE DA MICROESTRUTURA.....	44
6.5	ANÁLISE DOS ESPECTROS DE INFRAVERMELHO (FTIR).....	47
6.6	CAROTENÓIDES TOTAIS	49
6.7	ATIVIDADE ANTIOXIDANTE POR MÉTODOS DPPH E ABTS+.....	50
7	CONCLUSÕES	52
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE – ULTRASOUND PRETREATMENT APPLICATION IN DEHYDRATION: ITS INFLUENCE ON THE MICROSTRUCTURE, ANTIOXIDANT ACTIVITY AND CAROTENOID RETENTION OF BIOFORTIFIED BEAUREGARD SWEET POTATO (<i>IPOMOEA BATATAS</i> LAM).....	62

1 INTRODUÇÃO

A batata doce biofortificada *Beauregard* (*Ipomoea lam potato*) é um cultivar de origem norte-americana, desenvolvida pela *Louisiana Agricultural Experiment Station*, e mais tarde trazida para o Brasil. O seu uso em países ocidentais como o Brasil e sobretudo em países africanos está aumentando não só como ingrediente sem glúten, como devido as suas características nutricionais (FERNANDES et al., 2014; SANTOS et al., 2018).

A coloração alaranjada da polpa indica a maior presença do betacaroteno, também conhecido como provitamina A. O teor pode chegar a 115 µg por quilo de raiz, por isso, ela é considerada uma batata-doce biofortificada (FERNANDES et al., 2014). Os carotenoides têm propriedades antioxidantes atuando na eliminação de radicais livres, e evidências mostram que podem melhorar a absorção de ferro intestinal (GARCÍA-CASAL; LEETS, 2014); previnem distúrbios oculares e doenças de pele, auxiliam o crescimento e desenvolvimento, fortalecem o sistema imunológico, bem como possui propriedades anti-mutagênicas (GARCÍA-CASAL; LEETS, 2014; VIZOTTO et al., 2017).

Além dos benefícios nutricionais, a batata-doce biofortificada, apresenta resultados satisfatórios em termos produtivos, tendo taxas mais altas quando comparada a outras variedades do vegetal sobre o rendimento radicular e precocidade do ciclo. Dessa forma, permite um aumento no período de colheita para os produtores, além da facilidade de cultivo, rusticidade e ampla adaptação a sistemas de baixo nível tecnológico de pequenas propriedades da agricultura de subsistência e da colheita prolongada (CARDOSO et al., 2005; ISLAM et al., 2016).

Nesse sentido, a batata-doce biofortificada se destaca como uma alternativa alimentar relevante para a erradicação da desnutrição em grupos populacionais, como crianças, mulheres em idade fértil e gestantes (BERNI et al., 2015). Uma alternativa viável para o uso da batata-doce biofortificada *Beauregard* na dieta da população é o seu processamento para a produção de farinha pela desidratação (MARTINS et al, 2018).

A desidratação é um dos métodos mais comuns usados para aumentar a vida útil e manter a qualidade dos produtos alimentícios (ONAL et al., 2019). No entanto,

a desidratação também modifica a microestrutura do alimento. O pré-tratamento com ultrassom é considerado uma alternativa tecnológica emergente que resulta na formação de microcanais, aumenta a porosidade, e pode aumentar a taxa de desidratação e melhorar a qualidade dos alimentos e influencia a atividade antioxidante (GUO et al., 2019; WANG et al., 2019).

Compostos antioxidantes, normalmente encontrados em alimentos funcionais, são capazes de inibir ou retardar lesões causadas por radicais livres (Yan et al., 2016). As reações causadas pelos radicais livres podem ser compensadas pela ação de antioxidantes obtidos através da dieta, incluindo os carotenoides, abundantes na batata doce biofortificada *Beauregard* (TEOW et al., 2007). No entanto, independentemente do método, o conteúdo de carotenoides e a atividade antioxidante podem ser afetados pelo pré-tratamento, e poucos dados sobre a retenção de carotenoides na batata doce biofortificada *Beauregard* estão disponíveis atualmente.

Diante do exposto, a presente pesquisa visa avaliar o efeito do pré-tratamento com ultrassom na desidratação: sua influência na microestrutura, atividade antioxidante e retenção de carotenoides da batata-doce biofortificada *Beauregard*.

A presente pesquisa já produziu um artigo original já publicado em revista B1 e um artigo de revisão já aprovado faltando somente a publicação como capítulo de um livro.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Biofortificação

A Desnutrição é um estado patológico provocado pela insuficiência de nutrientes que o organismo necessita, comprometendo o estado físico e neurológico, que a cada ano provoca a morte de mais de dois milhões de crianças nos primeiros anos de vida no mundo (ALVES et al., 2011). A desnutrição crônica afeta cerca de 161 milhões de crianças menores de cinco anos de idade em todo o mundo (Figs.1 e 2) . Nesse contexto, surge a biofortificação como uma alternativa para o fornecimento de alimentos mais nutritivos sobretudo para a população rural em maior vulnerabilidade de apresentar deficiências de micronutrientes (SILVA, 2010).

A biofortificação consiste em modificações nos vegetais com vista a apresentarem elevados teores de micronutrientes como ferro, zinco e vitamina A, tornando-se uma fonte alimentar viável, suprimindo as necessidades diárias da população quando inserido em sua dieta. A biofortificação visa reduzir o número de casos de desnutrição sem alterar os hábitos de consumo (STEVENS e WINTERNELSON, 2008; SILVA, 2010).

No Brasil, para se reduzir o número de casos de desnutrição, vem se realizando pesquisas inerentes à biofortificação com apoio da Fundação Bill e Melinda Gates e pelo Banco Mundial, coordenadas pela Embrapa, onde são pesquisados algumas cultivares como o arroz, o feijão, a batata-doce, a mandioca, o milho, o feijão caupi, o trigo e a abóbora (fig. 3), (NOLÊTO et al., 2015).

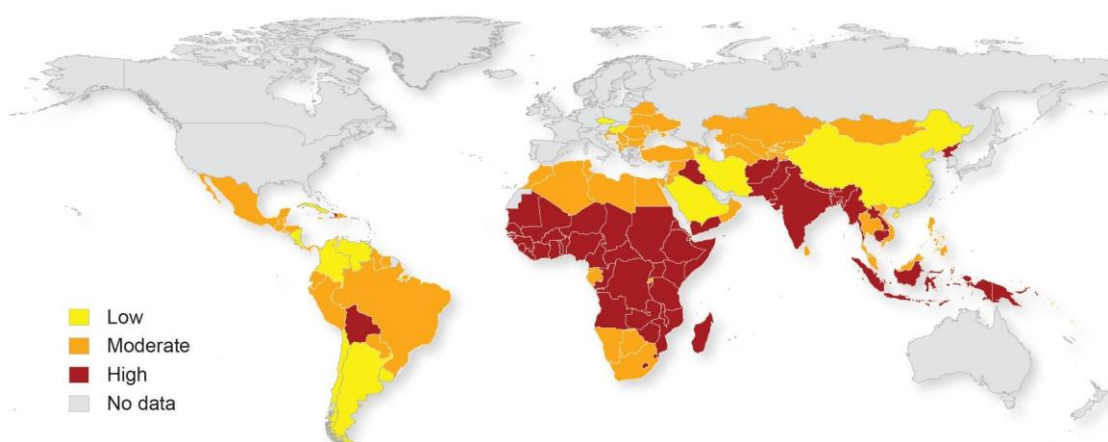


Figura 1 - Deficiência de micronutrientes em crianças com menos de 5 anos. OMS, 2010.

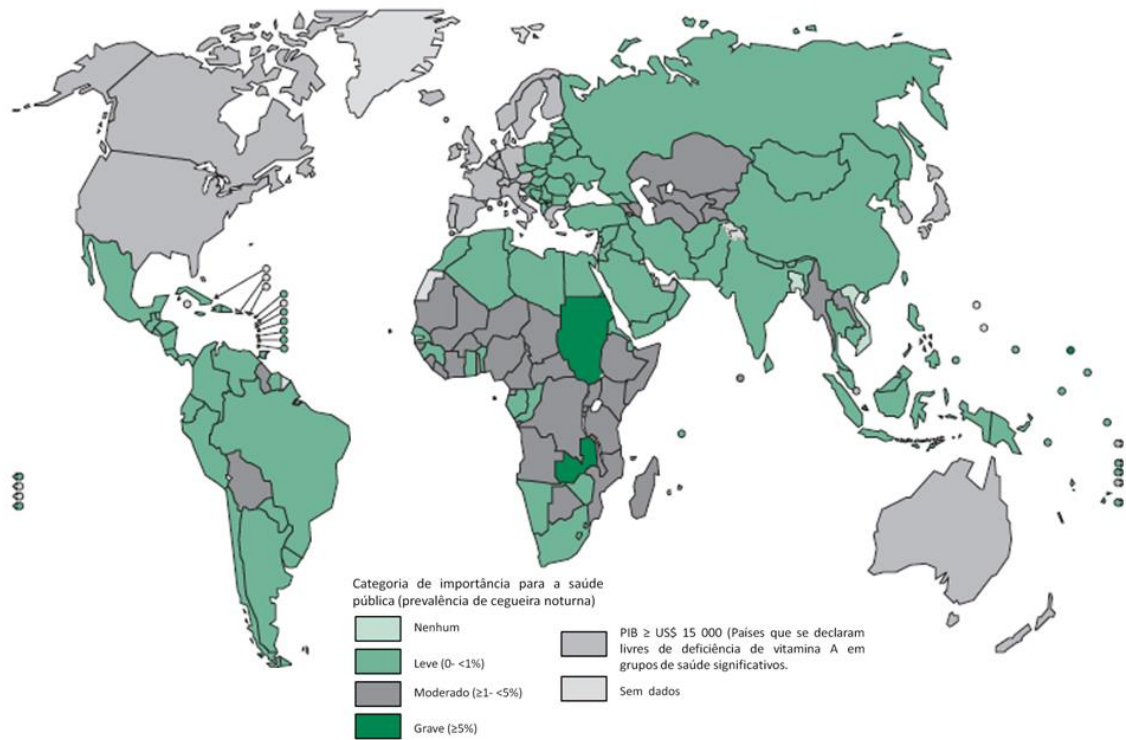
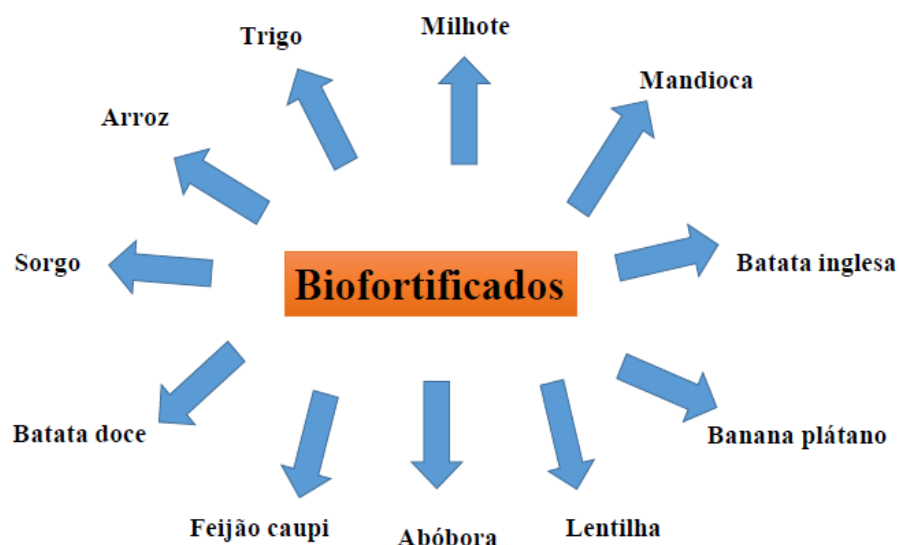


Figura 2 - Mapa de prevalência de deficiência de vitamina A no mundo em crianças em idade pré-escolar (1995---2005). Fonte: OMS, 2009.

Figura 3 - Cultivos biofortificados liberados e testados até o fim de 2017.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2 Origem e importância alimentar da Batata-doce Beauregard

A batata-doce *Beauregard* é uma cultivar americana desenvolvida em 1987 pela Louisiana Agricultural Experiment Station com objetivo de combater a deficiência da Vitamina A (RODRIGUES-AMAYA et al., 2011).

No Brasil, a batata-doce alaranjada *Beauregard* foi selecionada pela EMBRAPA e as avaliações do germoplasma introduzidas foram realizadas em Minas Gerais, Maranhão, Sergipe, Distrito Federal e Goiás, considerando o teor de betacaroteno, a produtividade e a aceitação por consumidores (ALVES et al., 2012).

Figura 4 - Amostras frescas da batata doce Beauregard adquiridas na feira da EMEPA, em João Pessoa/Paraíba usadas na presente pesquisa.



A pesquisa para biofortificação da batata-doce desenvolveu alguns genótipos que estão em estudo para adoção. Dentre os genótipos produzidos estão o CNPH 1007, CNPH 1194, CNPH 1202, CNPH 1205 (DONADO-PESTANA et al., 2012).

O plantio da *Beauregard* pode ser realizado em qualquer época do ano, exceto nos locais e períodos em que a temperatura mínima for inferior a 15 °C. O seu sabor é mais suave do que o da batata doce de polpa branca. O seu consumo pode ser por cozimento a vapor ou em água ou assadas no forno. Muitas vezes é utilizada como acompanhamento de diferentes refeições, podendo ser substituto da batata comum (RODRIGUEZ-AMAYA et al., 2004). Ainda, devido à elevada quantidade de betacaroteno, iniciou-se o desenvolvimento de vários produtos, como farinha, pães, bolos, biscoitos, etc. (RODRIGUEZ-AMAYA et al., 2004).

O uso culinário da batata-doce *Beauregard* pode melhorar a nutrição e saúde das pessoas sujeitas à restrição alimentar. Quando transformada em farinha, pode substituir parcial ou totalmente a farinha de trigo, sorgo em diversas receitas, aumentando o valor nutricional do alimento preparado (RODRIGUEZ-AMAYA et al., 2004; INFANTE, et al., 2017).

A batata-doce *Beauregard* é essencialmente energética, rica em amido e pobre em lipídios e proteínas. Com elevados teores de betacaroteno, quando comparado com batata comum (HAGENIMANA et al., 1998), apresenta teores significativos de minerais tais como cálcio, manganês, potássio, cobre, ferro e zinco, sendo o primeiro o mineral mais abundante no corpo humano, participando da regulação de várias funções corporais.

Esta cultura apresenta teores de carboidratos variando entre 25% a 30%, dos quais 98% são facilmente digestíveis. São excelentes fontes de carotenoides, vitaminas A, B e C. O amido é o principal componente de raiz da batata doce, representando cerca de 50-80% da raiz com base no peso seco (CARDOSO et al., 2005; ZHU, et al., 2017).

Estima-se que o consumo de 25 a 50 gramas dessa batata-doce supre nossas necessidades diárias de provitamina A que, no organismo humano, vai originar a vitamina A, que previne distúrbios oculares e doenças da pele, auxilia no crescimento e no desenvolvimento e fortalece a defesa do corpo contra infecções. Também age como antioxidante, ou seja, combate os radicais livres que aceleram o envelhecimento e ocasionam diversas doenças (FERNANDES et al., 2014).

Estudos sugerem que produtos à base de Beauregard apresentaram valores satisfatórios segundo a Resolução RDC número 269 de 22 de setembro de 2005 da ANVISA, que preconiza uma ingestão diária para adultos de 14 mg de ferro e 7 mg de zinco. Respondendo, assim, as necessidades diárias no enriquecimento (BAGANHA et al., 2016).

2.3 Compostos bioativos da Batata-doce Beauregard

Os compostos bioativos são substâncias não nutrientes, que possuem ação metabólica ou fisiológica específica (BRASIL, 2002). Quando presentes nos vegetais, auxiliam na redução do risco de desenvolvimento de doenças crônicas não-transmissíveis (DCNT), como aterosclerose, doenças coronárias e algumas neoplasias (BRECHT et al., 2010). A perda desses compostos pode ocorrer desde o processamento até a estocagem do produto (IGUAL et al., 2015).

Os carotenoides são compostos bioativos com alta capacidade antioxidante, sendo o β -caroteno, licopeno, luteína, zeaxantina, β -criptoxantina e α -caroteno os mais atuantes e abundantes na batata doce biofortificada.

. A ingestão de fontes de carotenoides está relacionada aos benefícios que estes compostos podem proporcionar, já que tanto os carotenoides precursores de vitamina A, quanto os não precursores, como luteína, zeaxantina e o licopeno, se mostram associados à ação protetora contra o câncer e com propriedades antioxidantes (MARINOVA e RIBAROVA, 2007; DONADO-PESTANA et al., 2012). No caso da batata-doce biofortificada, os carotenoides melhoraram a qualidade nutricional e sensorial de formulações de *cookies*, o que permitiu com que atuassem como alimento funcional para prevenir ou controlar a anemia ferropriva (INFANTE et al., 2017).

Os principais ácidos fenólicos da batata doce são: o ácido clorogênico, que compreende aproximadamente 80% do fenólico total ácidos, ácido cafeico, ácido cinâmico, ácido p-cumárico, ácido ferúlico e ácido sinápico, três isômeros de mono-cafeoilquinico ácido: ácido 3-cafeoilquinico (ácido neoclorogênico), 4-cafeoilquinico ácidos (ácido criptoclorogênico) e ácido 5-cafeoilquinico (clorogênico ácido) e três ácidos dicaffeoylquinicos: 3,5-diciclolequinquinico ácido 3,4-dicicloloquinico e ácido 4,5-dicicaffeolequinico (isoclorogênico ácidos A-C, respectivamente) (ZHAO et al.,

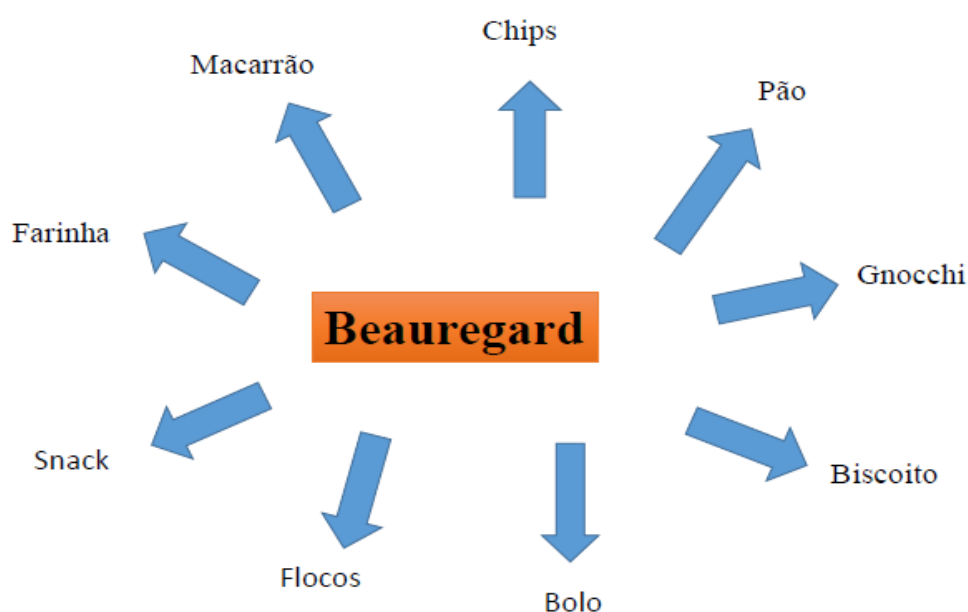
2014), e outros compostos, tais como, ácido lipoico e selênio (NEMS et al., 2015), com efeitos terapêuticos positivos, tais como antioxidante, anti-inflamatórios, protetor de DNA e protetor de doenças cardiovasculares.

A batata-doce de polpa alaranjada contém grandes quantidades de flavonóides, particularmente catequina, epicatequina e antocianidinas, associados ao baixo risco e prevenção de DCNT (NEMS et al., 2015).

2.4 Farinhas de batata doce Beauregard

O Brasil está a desenvolver produtos biofortificados para combater a carência de micronutrientes (vitamina A, ferro e zinco), que são essenciais para a saúde humana, sobretudo em comunidades de baixa renda (NESTEL et al., 2006), para melhoria da imunidade através da sua potente ação antioxidante (RODRIGUES-AMAYA et al., 2008; VAN JAARSVELD et al., 2006). Há registro de grande potencialidade de o Beauregard ser empregue como matéria-prima em processos industriais (SENANAYAKE et al., 2013) e na elaboração de produtos como farinha, batatas fritas, pães, biscoitos, bolos e outros alimentos (Fig.5) infantis (GUO et al., 2014, INFANTE et al., 2017).

Figura 5 - Desenvolvimento de produtos a partir da batata-doce biofortificada Beauregard



Fonte: Elaborado pelo autor.

A farinha de batata-doce, quando elaborada a partir de raízes com alto teor de β -caroteno, como Beauregard, é fonte de pró-vitamina A, (RODRIGUES-AMAYA et al., 2008; VAN JAARSVELD et al., 2006). Adicionalmente, o acesso a cultivares biofortificadas constitui uma alternativa para o fornecimento de alimentos mais nutritivos, que podem ajudar a reverter à carência de nutrientes, e, assim, reduzir o número de casos de desnutrição infantil (LOW e VAN JAARSVELD, 2008).

A farinha de Beauregard pode substituir de forma parcial ou total a farinha de trigo na confecção de bolos, biscoitos e outros produtos utilizados em alimentação escolar e de apoio materno-infantil (RODRIGUES-AMAYA et al., 2011).

A farinha de Beauregard pode ser armazenada por até seis meses quando empacotadas hermeticamente em sacos plásticos protegidos da luz (CARVALHO., 2005).

2.5 Processos de desidratação

A desidratação é um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido (ISQUIERDO et al., 2013; GONELI et al., 2014; SILVA et al., 2016).

A desidratação é um método de preservação de alimentos utilizado desde a antiguidade. Ela baseia-se na redução da atividade de água dos alimentos através da remoção da água presente no seu interior. Comparado com outros métodos, oferece uma redução nos custos, além de ser uma técnica bastante simples. A remoção de água reduz a atividade de água do produto, inibindo o desenvolvimento de micro-organismos e retardando as deteriorações de origem físico-química (CANO-CHAUCA et al., 2004; PARK et al., 2014).

A desidratação além de aumentar o tempo de vida útil do produto, apresenta vantagens como facilidade de transporte, baixo custo na armazenagem podendo ser relativamente econômica na produção caseira e semi-industrial (PARK et al., 2014).

Os processos da desidratação podem ser realizados de forma contínua com alimentação e descarga simultânea e intermitente, no qual o material é alimentado ao secador e descarregado ao final da secagem (PARK et al., 2014).

2.5.1 Mecanismo da desidratação

Os principais mecanismos da desidratação são a difusão superficial nas superfícies dos poros, ou difusão de vapor devido a diferenças de concentração de umidade e ação capilar em alimentos granulados e porosos devido às forças superficiais. O período de taxa constante da desidratação, a forma física do produto e as condições externas, como temperatura, velocidade do ar de secagem, direção do fluxo de ar e umidade relativa têm uma grande influência na superfície do produto que é secado na difusão da superfície (NADERINEZHAD et al.,2016; INYANG et al.,2018).

Quando a película de superfície dos sólidos ou partículas parece estar seca e teor de umidade for reduzido para o seu teor crítico de umidade, em seguida, começa o primeiro o período da taxa de queda. Ao contrário dos períodos de taxa constante, o período de taxa decrescente é controlado por difusão líquida como resultado de diferenças de concentração de umidade e as condições internas do produto (INYANG et al.,2018).

As condições internas como umidade, a temperatura e a estrutura do produto desempenham um papel importante no período de taxa decrescente. Este fenômeno é então substituído pelo segundo período de taxa de queda de secagem, ou seja, difusão de vapor devido à diferença da concentração da umidade e também das condições internas dos produtos (PANDEY et al., 2015; INYANG et al.,2018).

O fenômeno da desidratação de produtos biológicos durante a período de taxa de queda é controlado pelo mecanismo de difusão de líquido e / ou vapor (PANDEY et al., 2015; INYANG et al.,2018). No entanto, apenas as teorias de difusão capilar e líquida são, geralmente, aplicáveis à secagem de materiais alimentares. A difusão é o mecanismo físico dominante que rege o movimento de umidade no material que é dependente do teor de umidade da amostra. O teor de umidade é expresso em base seca, o que é mais conveniente para modelagem (INYANG et al.,2018).

A Figura 6 descreve a taxa da desidratação e a temperatura em função do tempo. Esta curva pode ser também usada na identificação do mecanismo dominante de um produto durante a desidratação. No período inicial da secagem, a temperatura do ar de equilíbrio é geralmente maior que a temperatura do produto. Portanto, a taxa da desidratação entre A e B aumenta com o aumento da

temperatura do produto até que a temperatura da superfície atinja o equilíbrio (correspondente à linha B a C) (PANDEY et al., 2015; INYANG et al., 2018).

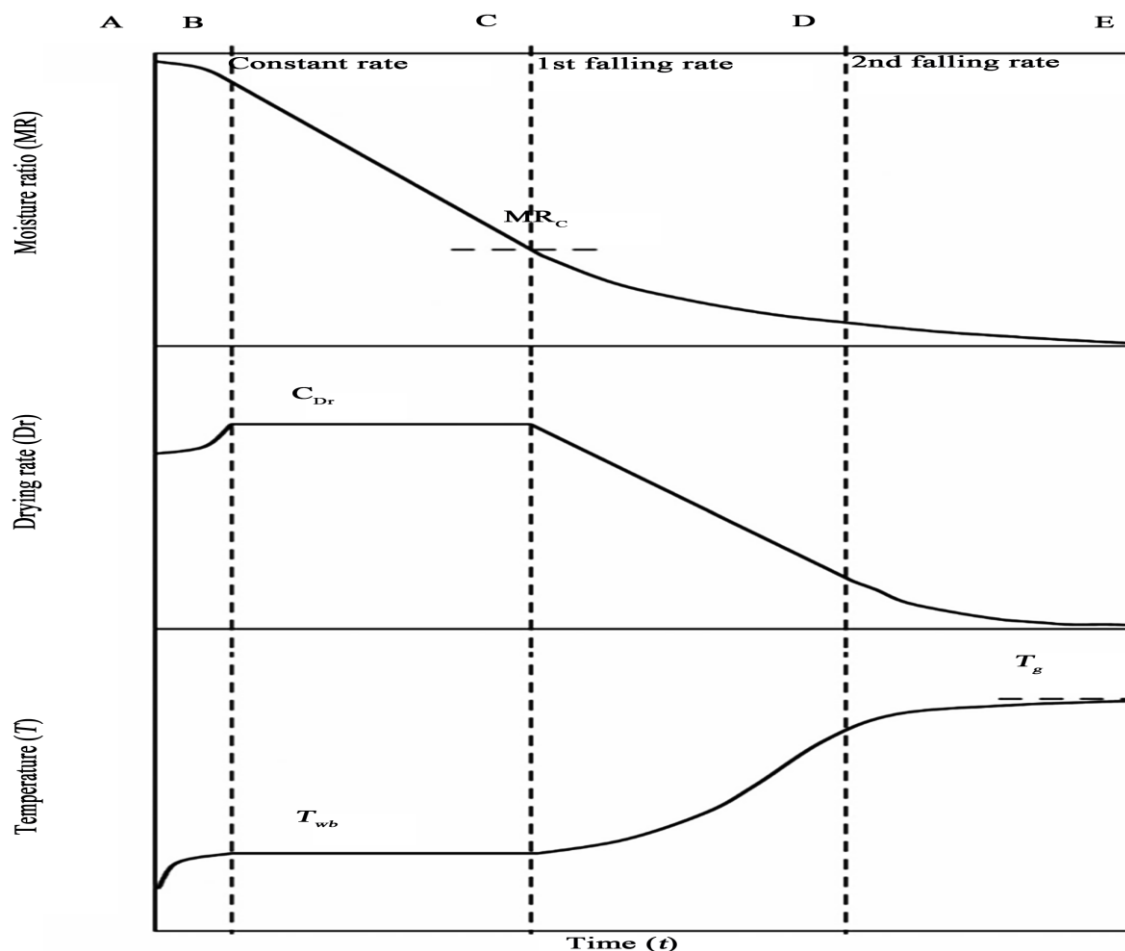


Figura 6 - Curva típica da desidratação de produtos agrícolas com taxa constante e a queda dos períodos de taxa. ONWUDE et al., 2016.

Sob condições constantes, o processo da desidratação de produtos agrícolas e biológicos tem sido descrito como etapa que consiste em um período de taxa constante (B a C) durante o qual a desidratação ocorre como se a água pura estivesse sendo evaporado, e um ou vários períodos de taxa de queda onde a umidade é controlada por resistências internas e externas combinadas ou por resistência externa ou interna ao calor e transferência de massa (PANDEY et al., 2015; INYANG et al., 2018).

A desidratação geralmente pára quando o estado estacionário de equilíbrio é alcançado. Durante o período de taxa constante, a forma física de produto é afetada, especialmente a superfície do produto. Este período é amplamente controlado pelas

forças capilares e de gravidade. As condições do processo da secagem, como a temperatura, velocidade do ar e umidade relativa, também afetam o produto durante esta fase (PANDEY et al., 2015; INYANG et al., 2018).

O primeiro período de taxa decrescente (C para D) começa quando o filme da superfície do produto parece estar seco, e o índice de umidade diminuiu para o seu teor crítico de umidade. À medida que a desidratação continua, o material experimentará então uma mudança do primeiro período de taxa decrescente para um fenômeno conhecido como o segundo período da taxa de queda (D a E). Na literatura, vários modelos como o teórico, empírico e semi-empírico são mencionados para a análise da desidratação de produtos higroscópicos, mas as categorias mais amplamente aplicadas de modelos de camada fina são as de modelos empíricos (ONWUDE et al., 2016; INYANG et al., 2018).

2.5.2 Fatores que afetam a cinética da desidratação

A desidratação de produtos alimentícios, como frutas e verduras, é bastante afetada pelos seguintes fatores: tempo da desidratação, temperatura da desidratação, umidade relativa do ar, taxa do fluxo de ar (ou velocidade), área de superfície, tamanho (espessura do material), volume e pressão parcial (INYANG et al., 2018).

Entre essas condições, as mais influentes em termos da desidratação de frutas e vegetais são a espessura do material (tamanho) e a temperatura. Cerquera et al. (2017) incluíram a velocidade do ar, o conteúdo final de umidade, contração ou encolhimento do produto e as características que estão relacionadas com a preservação e qualidade dos alimentos como parâmetros mais influentes (PANDEY et al., 2015; INYANG et al., 2018).

Durante o processo da desidratação, a velocidade do ar e umidade relativa são vistos com sendo fatores menos significativos que afetam a cinética da desidratação de frutas e vegetais, enquanto a temperatura e espessura são relatados como os fatores que mais afetam cinética da desidratação de camada fina de frutas e legumes. Mas, há estudos que mostraram que a temperatura tem mais influência na constante da desidratação que a espessura. No entanto, as interações entre a temperatura e espessura não afetam significativamente o valor da constante

da desidratação (ONWUDE et al., 2016; INYANG et al., 2018).

2.6 Aplicação do ultrassom na desidratação de alimentos

No processo da desidratação, tem sido aplicado o pré-tratamento com ultrassom. Trata-se de um procedimento eficiente, que oferece vantagens no tempo de processamento, na qualidade dos produtos alimentares no que tange ao sabor, a cor, a viscosidade, riscos químicos e físicos reduzidos, além de ser ecologicamente aceitável (OLIVEIRA et al., 2014; FERNANDES et al., 2014).

Estudos sugerem que a aplicação de ultrassom aumenta a difusividade efetiva de água e reduz o tempo da desidratação, e é capaz de ajudar a aumentar a disponibilidade da forma livre de vitaminas. A sua aplicação permite o uso de temperaturas da desidratação mais altas sem comprometer a qualidade nutricional em matrizes alimentares (FERNANDES et al., 2014).

O ultrassom é uma das tecnologias alternativas na atualidade que tem por objetivo diminuir os custos de processamento e melhorar a qualidade dos produtos alimentares. Processos de extração por ondas ultrassônicas são conhecidos por apresentarem significativo aumento no rendimento, afetando minimamente as características dos produtos, pode ser realizado em poucos minutos (CHEMAT et al. 2017).

O ultrassom também tem sido usado como pré-tratamento antes da desidratação de amostras vegetais. A sua aplicação aumenta a difusividade efetiva da umidade e do coeficiente de transferência de massa. Além disso, pode preservar melhor a microestrutura das amostras vegetais (FAN; ZHANG; MUJUMDAR, 2017).

A aplicação ultrassônica vem sendo explorado há várias décadas. Estudos mostram que a aplicação de ultrassom com a finalidade de auxiliar na secagem de alimentos indica uma redução significativa no tempo da desidratação (até 57%) com a aplicação simultânea de ultrassom na secagem convectiva, o que corresponde a uma redução no consumo de energia de até 54%. As variáveis de processamento (temperatura de secagem, espessura do produto, nível de potência ultrassônica) influenciam substancialmente a magnitude do efeito da energia ultrassônica na melhoria do processo de secagem, indicando a necessidade de estabelecer as

condições ideais de secagem para produtos específicos e aplicações do ultrassom (SABAREZ; GALLEGO-JUAREZ; RIERA, 2012).

Além disso, a aplicação de ultrassom também pode preservar melhor a microestrutura de frutas e vegetais em comparação com a secagem convectiva (FAN; ZHANG; MUJUMDAR, 2017) havendo necessidade de levar em consideração que os parâmetros do processo (temperatura, umidade do ar, velocidade do ar e nível de potência do ultrassom) e suas interações afetam substancialmente o processo da desidratação.

2.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Compreender as propriedades de microestruturas dos alimentos é um pré-requisito necessário para entender suas propriedades. Os métodos de processamento de alimentos como secagem podem influenciar na mudança da microestrutura afetando as propriedades do produto. Desse modo, técnicas de análise de microestrutura são necessárias para entender as relações estrutura-propriedades (PADILHA e AMBROZIO, 2004)

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica que permite a obtenção de imagens que demonstram a morfologia dos grânulos, além da possibilidade de aferição do tamanho médio das partículas, por meio de *softwares* acoplados ao equipamento. É de extrema importância quando aplicadas modificações nos compostos, com o objetivo de avaliar o resultado dessas modificações estruturais, podendo se comparar esses resultados com a microscopia da fonte nativa, e verificar até que ponto a modificação alterou o grânulo (ZHENG et al., 2015; BARRERA et al., 2013).

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) tornou-se um instrumento incontornável nas mais diversas áreas científicas, sobretudo no desenvolvimento de novos materiais que têm exigido informações detalhadas das características microestruturais (ZHENG et al., 2015; BARRERA et al., 2013).

No MEV os sinais de maior interesse para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. À medida que o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra estes sinais vão sofrendo alterações mediante as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da

superfície da amostra e são responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução. Já os retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição (ZHENG et al., 2015; BARRERA et al., 2013).

O MEV tem seu potencial ainda mais desenvolvido com a adaptação na câmara da amostra de detectores de raios-X permitindo a realização de análise química na amostra em observação. Através da captação pelos detectores e da análise dos raios-X característicos emitidos pela amostra, resultado da interação dos elétrons primários com a superfície, é possível obter informações qualitativas e quantitativas da composição da amostra na região submicrométrica de incidência do feixe de elétrons, o que facilita a identificação de precipitados e de variações de composição química dentro de um grão. As amostras não são vistas diretamente e suas imagens são formadas em um monitor através da codificação dos sinais gerados pela interação elétron-amostra (ZHENG et al., 2015; BARRERA et al., 2013)

Entretanto, não são apenas estas características que fazem do MEV uma ferramenta tão imprescindível e tão usada na análise dos materiais. A elevada profundidade de foco (imagem com aparência tridimensional) e a possibilidade de combinar a análise microestrutural com a microanálise química são fatores que em muito contribuem para o amplo uso desta técnica (ZHENG et al., 2015; BARRERA et al., 2013).

A presente pesquisa visa demonstrar evidências científicas da vantagem da aplicação do ultrassom na desidratação de alimentos, pese embora seja uma tecnologia emergente, com o seu efeito vantajosos na secagem de alimentos, pode se pensar na sua empregabilidade na indústria.

3 HIPÓTESE

A aplicação de pré-tratamento com ultrassom na desidratação da batata doce biofortificada reduz o tempo de secagem e preservar os teores de carotenoides da farinha de batata doce desidratada.

4 OBJETIVOS

4.1 *Objetivo Geral*

Avaliar o efeito do pré-tratamento com ultrassom na desidratação da batata-doce biofortificada, bem como a sua influência na microestrutura, atividade antioxidante e retenção de carotenoides.

4.2 *Objetivos específicos*

- ✓ Estudar a cinética de secagem em duas temperaturas da batata-doce *Beauregard* com e sem pré-tratamento ultrassônico;
- ✓ Determinar o teor de carotenoides totais e a atividade antioxidantes das farinhas de batata-doce *Beauregard*;
- ✓ Analisar a morfologia das farinhas;
- ✓ Caracterizar a estrutura química das amostras das farinhas por FTIR.

5 MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida em diferentes laboratórios: Laboratório de Engenharia de Alimentos do Departamento de Engenharia Química – Centro de Tecnologia e Geociências (CTG)/UFPE; Laboratório de Experimentação e Análise de Alimentos/LEAAL do Departamento de Nutrição/UFPE; Laboratório de Microscopia e Microanálise/LAMIN do CETENE e no Laboratório de Microscopia da Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP e Laboratório de Química Analítica e Inorgânica/UFPE.

5.1 Obtenção e seleção da matéria-prima

As amostras frescas da batata doce Beauregard foram adquiridas na feira da EMEPA, em João Pessoa/Paraíba. Todas provenientes das safras de 2018, por cultivo convencional. Após a aquisição, as batatas foram embaladas em caixas, e transportadas à temperatura ambiente até o Laboratório de Engenharia de Alimentos do Departamento de Engenharia Química – Centro de Tecnologia e Geociências (CTG)/UFPE. As amostras livres de lesões mecânicas, pragas, doenças e deterioração foram selecionadas para experimentação.

5.2 Higienização

As raízes frescas foram lavadas em água corrente para retirada de sujeira, desinfetadas com solução de cloro ($150 \mu\text{L.L}^{-1}$) por 15 min e enxaguadas em água corrente para retirada do excesso de cloro aderido às raízes.

5.3 Descascamento e fatiamento

Após a fase de higienização, as raízes frescas foram descascadas manualmente com o auxílio de uma faca de aço inoxidável. A porção comestível (seção intermediária do mesocarpo) foi fatiada em fatias com 0,5 cm de espessura e pesada em balança digital semi-analítica (HAUS Corporation, modelo AR2140, Brasil).

5.4 Processo da secagem da batata- doce

5.4.1 Pré-tratamento: Ultrassom

O pré-tratamento foi baseado no estudo de Azoubel et al. (2010). Um banho de ultrassom (Unique, modelo USC-2580A, Brasil) com frequência de 25 kHz e intensidade de 4870 W / m² foi usado para pré-tratar as amostras de batata a 30 ± 2 °C. Doze fatias de raízes frescas foram colocadas em dois frascos Erlenmeyer de 250 mL (seis por frasco) com 100 mL de água destilada. Após 10 min, as amostras foram retiradas dos frascos cônicos, secas com papel absorvente para retirada do excesso de água e, por fim, pesadas em balança semi-analítica. O teor de umidade das amostras foi determinado gravimetricamente utilizando uma estufa a 105 °C (Tecnal, modelo TE-395) por 24 horas. O processo foi avaliado em termos de perda de água e ganho de sólidos.

A perda de água (PA) foi calculada pela equação:

$$PA(\%) = 100 (E_o - E_t) / M_o$$

Onde:

E_o = conteúdo inicial de água no produto (g);

E_t = conteúdo de água no produto no tempo t (g);

M_o = massa inicial do produto (g).

O ganho de sólidos (GS) foi calculado através da equação:

$$GS(\%) = 100(m_{st} - m_{s0}) / M_o$$

Onde:

m_{s0} = massa seca inicial (g);

m_{st} = massa seca no tempo t (g);

M_o = massa inicial do produto (g).

5.4.2 Secagem

Neste estudo, dois grupos de secagem foram definidos, incluindo amostras de controle sem pré-tratamento de ultrassom (C) e amostras pré-tratadas com ultrassom (US). A secagem foi realizada em estufa com circulação de ar em duas temperaturas diferentes (50 e 70 ° C) (Azoubel et al., 2010). Para cada experimento,

as doze fatias foram espalhadas pela grade de secagem. As amostras foram pesadas em balança semianalítica em intervalos de 15 minutos até que a condição de equilíbrio (peso constante) fosse alcançada.

A partir dos dados da secagem foi possível realizar o estudo da cinética, por meio dos dados do adimensional de umidade (MR) em função do tempo do processo, sendo:

$$MR = \frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e}$$

Onde: X é o teor de umidade médio no tempo t, kg H₂O/kg matéria seca; X_e é o teor de umidade de equilíbrio, kg H₂O/kg matéria seca; X₀ é o teor de umidade inicial, kg H₂O/kg de matéria seca.

No presente estudo, modelos matemáticos semiteóricos foram ajustados aos dados experimentais (Tabela 1), onde a, b, c, k e n, são as constantes empíricas nos modelos de secagem e t é o tempo de secagem em min. Os teores de umidade em cada intervalo de tempo foram calculados a partir dos dados de perda de peso e dos pesos sólidos secos das amostras. Os dados de teor de umidade foram convertidos em razão de umidade.

Tabela 1 - Modelos matemáticos ajustados às curvas de cinética secagem da batata doce.

Modelo Matemático	Equação	Autor
Page	$MR = \exp(-Kt)^n$	(Page, 1949)
Henderson e Pabis	$MR = \exp(-Kt)$	(Henderson & Pabis, 1961)
Logarítmo	$MR = \exp(-Kt) + c$	(Yagcioglu et al., 1999)
Wang e Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	(Verma et al., 1985)
Exp. 2 termos	$MR = a\exp(-Kt) + b\exp(-wt)$	(Sharaf-Eldeen et al., 1980)
Exp. Simples	$MR = \exp(-Kt)$	(Lewis, 1921)

Em que: MR - Relação de umidade do produto; a, b, c e n – parâmetros ou coeficientes dos modelos, adimensional; t – tempo, min; k – constante de secagem.

Para verificar o ajuste dos modelos aos dados experimentais, calculou-se o erro médio relativo (P) (equação 11), sendo considerado preditivo o modelo que apresentasse valores de P menores que 10% (LOMAURO *et al.*, 1985).

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|V_p - V_e|}{V_p} \quad (11)$$

Onde N é o número de dados experimentais, V_e é o valor experimental e V_p é o valor calculado. Valores de P (%) menores ou iguais a 10% são considerados para satisfazer os dados experimentais (LOMAURO et al., 1985).

Após a secagem, as fatias da amostra foram trituradas (modelo A11B S 32). O pó obtido foi padronizado com granulometria 20 *mesh*, armazenado em recipientes plásticos hermeticamente revestidos com folha de alumínio, etiquetados e colocados em freezer a $-18 \pm 1^\circ \text{C}$ para posterior análise

5.5 Análise ultraestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As farinhas obtidas em diferentes temperaturas de secagem foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura. As amostras de farinha foram aspergidas em fita dupla-face fixada em um suporte de alumínio, seguida de metalização (SANYU ELECTRON, SC-701A) por 3 min, sob amperagem de 10 mA, para a deposição iônica de uma fina camada de 5 nm de ouro. Em seguida, as amostras foram examinadas sob alto vácuo em um microscópio eletrônico de varredura, JEOL JSM-5600LV, operando a 25 KV, e as imagens foram obtidas em ampliações variando de x300 a x1200.

5.6 Espectroscopia na região de absorção do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A análise de FTIR foi utilizada para caracterizar a estrutura química das amostras das farinhas da batata-doce controle (C) e Ultrassom (US) nas temperaturas 50 e 70°C .

As amostras da farinha foram inseridas diretamente no espectrofotômetro (FTIR Perkin Elmer, USA) com acessório Universal ATR (Sampling Accessory), colocando-se cada amostra em contato com o cristal de ATR em módulo de transmitância. Este método não exige o preparo de amostra. As análises foram em triplicata com varredura na faixa de 4000-400 cm^{-1} , resolução de 4 cm^{-1} com 32 acumulações.

5.7 A extração e quantificação dos Carotenóides Totais

O conteúdo total de carotenoides foi quantificado com base na metodologia de Rodriguez-Amaya (2004). Este método consistiu em extrair o conteúdo de carotenóides com acetona em que 5,0 g de amostra da farinha foram adicionados 40 mL de acetona; a mistura foi agitada por 1 hora em mesa agitadora a 200 rpm a uma temperatura média de 10 °C com subsequente separação e diluição com éter de petróleo. A extração foi realizada em temperatura controlada, com pouca luz para minimizar a degradação; foram realizadas seis extrações sucessivas seguidas de filtração. A varredura espectral foi realizada em um espectrofotômetro Evolution 60S (Thermo Scientific) a um comprimento de onda de absorbância de 450 a 470 nm e os resultados foram expressos como Concentração de Massa. Os carotenoides totais foram expressos em µg por g de massa seca. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

5.8 Determinação da atividade antioxidante

Foram utilizados dois métodos para avaliar a atividade antioxidante das farinhas: A atividade sequestrante de radical livre utilizando o radical DPPH e a atividade anti-radical livre utilizando-se o método de ensaio do radical ABTS.

5.8.1 Obtenção dos extratos

Os extratos foram preparados de acordo com Brand Williams et al (1995), com algumas modificações. 10 mL de metanol 80% (v / v) foram adicionados à amostra de 1 g e agitados durante 2 min. Após uma hora no escuro à temperatura ambiente, o extrato foi centrifugado (2200 g, 20 °C por 20 min) e o sobrenadante armazenado a -18 °C até as avaliações. Todas as extrações foram realizadas em triplicata.

5.8.2 Determinação da Atividade Antioxidante Total pela Captura do Radical Livre DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil)

A atividade antioxidante total das amostras foi medida pelo método de

eliminação do radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) (Rufino et al., 2007). Cada extrato (0,1 mL) foi misturado com 3,9 mL de solução de metanol DPPH em cubetas. A mistura reacional foi agitada adequadamente e mantida durante 1 hora à temperatura ambiente no escuro. O metanol foi usado como branco e a amostra controle foi preparada sem adição de extrato. A absorbância foi medida a 515 nm em um espectrofotômetro (SH-1000, Hitachi, Japão). A porcentagem da atividade de eliminação do radical DPPH foi calculada usando a seguinte equação:

$$DPPH (\%) = \frac{AC-AS}{AC} \times 100$$

Onde:

AC: A absorbância do controle (solução DPPH sem a amostra)

AS: A absorbância da amostra

5.8.3 Determinação da Atividade Antioxidante Total pela Captura do Radical Livre:ABTS +

A análise da atividade antioxidante pela captura do radical ABTS (ácido 2,2'-azino-bis [3-etilbenzotiazolina] -6-sulfônico) foi realizada conforme metodologia descrita por Rufino et al. (2007). A solução estoque de cátion de radical ABTS (ABTS% +) foi preparada misturando ABTS (5 mL) com persulfato de potássio (88 µL) e deixada repousar no escuro por 16 h à temperatura ambiente antes do uso. A solução estoque foi subsequentemente diluída com álcool etílico (PA, 99,3%) até a absorbância ser de $0,7 \pm 0,05$ nm a 734 nm em espectrofotômetro. Transferiu-se uma alíquota de 30 µL do extrato das batatas-doces para o 3 mL do reagente ABTS • + em ambiente com ausência de luz. Após uma incubação de 6 minutos à temperatura ambiente, a absorbância foi medida a 734 nm em um espectrofotômetro, utilizando metanol como branco. A quantificação da atividade antioxidante foi feita por meio de curva de calibração do padrão Trolox (0,05 a 0,35 mg / mL) e estimado para 100 g de amostra.

5.9 Análises Estatísticas Dos Dados

Os resultados foram analisados usando a análise de variância unidirecional (ANOVA). A diferença entre as amostras foi considerada significativa se estivesse dentro do intervalo de confiança de 95% calculado usando o software estatístico IMB SPSS 20. Todas as experiências foram realizadas em triplicata.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Efeito da ultrassom na perda de água e ganho de sólidos solúveis

Os resultados obtidos para perda de água (PA) e ganho de sólidos (SG) são apresentados na Tabela 2. Verificaram-se valores negativos para perda de água, ou seja, houve ganho de sólidos solúveis após o pré-tratamento com ultrassom nas duas temperaturas (Tab. 2). Este fenômeno pode ter ocorrido em decorrência do gradiente de concentração, que favorece a transferência de sólidos da amostra para o meio líquido, e uma transferência de água do meio líquido para o produto. Por outro lado, ondas ultrassônicas podem provocar efeito esponja. As forças envolvidas por este mecanismo podem ser maiores que a tensão superficial que mantém a umidade dentro dos capilares da amostra, criando canais microscópicos que podem facilitar a remoção da água, conforme observado por diversos autores (FUENTE-BLANCO et al., 2006).

Outro motivo pode ser a ocorrência de transporte passivo; o efeito de cavitação e esponja, causado pelas ondas ultrassônicas, que formam canais microscópicos e distorcem as células do tecido, facilitando a transferência de água do meio líquido para a amostra; o maior ganho de água também pode ser devido ao tipo de solução usada no presente estudo que foi a água destilada. Estudos têm mostrado maior perda de água quando se usa a solução de sacarose, Fernandes e colaboradores (2008), sendo que o uso de solução hipertônica tende a aumentar a transferência de massa de água à solução osmótica devido à alta concentração gradiente.

O pré-tratamento com ultrassom incrementou o ganho de sólidos nas amostras nas duas temperaturas. A criação de canais microscópicos dentro da membrana de batata-doce pelo efeito do ultrassom também levou a captação de soluto (OLADEJO e MAA, 2016). O maior ganho de sólidos durante o pré-tratamento com ultrassom pode resultar em menores taxas de secagem, uma vez que esse ganho de sólidos tem como consequência a redução da água livre disponível nas amostras e, portanto, a taxa de transferência de massa pode ser menor.

Tabela 2 - Perda de água (PA) e ganho de sólidos (GS) da batata doce Beauregard com pré-tratamento nas duas temperaturas.

	PAm (%)	GSm (%)
50°C	-1,433	0,987
70°C	-2,114	1,247

6.2 Temperaturas de secagem

A Fig. 7 mostra a cinética de secagem das amostras em duas temperaturas (50 e 70 ° C) para as amostras de controle sem pré-tratamento de ultrassom (C) e para as amostras com pré-tratamento de ultrassom (US).

Os tempos de desidratação para a amostra atingir o equilíbrio foram 450 e 630 min a 50 ° C e 360 e 330 min a 70 ° C para C e US, respectivamente. A aplicação do pré-tratamento com ultrassom não teve efeito positivo no tempo de secagem a 50 ° C.

Por outro lado, o tempo de secagem da amostra tratada foi reduzido em 30 min a 70 ° C. Nowacka et al. (2012) relataram que o tempo de ultrassom afeta significativamente a intensidade de secagem. Os autores verificaram redução considerável quando a US foi realizada por 30 min. No presente estudo, o tempo de pré-tratamento com US foi de 10 min, fato que pode ter influenciado no não registro de redução significativa do tempo de secagem com sua aplicação.

Também é possível notar que o aumento da temperatura do ar reduziu o tempo de secagem. Observações semelhantes foram relatadas para fatias de batata (ONWUDE et al, 2018). Este fenômeno é devido à maior taxa de remoção de água do produto resultante de um maior gradiente de umidade entre o produto e o ar causado pelo aumento da temperatura do ar. Nesse processo, a cinética de secagem está diretamente relacionada à temperatura. O aumento da temperatura resulta no aumento da transferência de umidade (SANTOS et al., 2017).

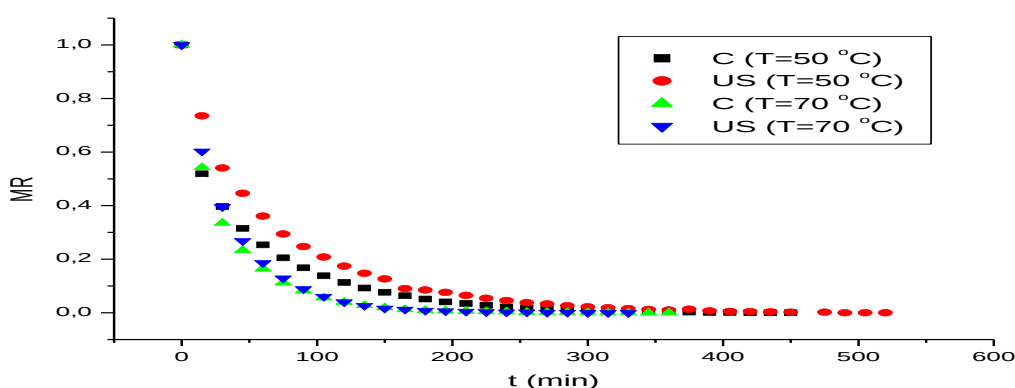


Figura 7 - Curvas de cinética de secagem da batata-doce Beauregard em duas temperaturas (50 e 70°C) Controle (C) e Ultrassom (US).

MR - Relação de umidade do produto.

6.3 Modelagem Matemática de secagem

A modelagem é importante para a análise e compreensão da secagem. Os modelos empíricos facilitam as estimativas dos tempos e curvas de secagem, permitindo estimar as condições que resultam no teor de umidade final desejado. Os ajustes dos modelos matemáticos foram testados em várias condições.

Os parâmetros dos seis modelos matemáticos contrastados com os dados experimentais da cinética de secagem das amostras são apresentados na Tabela 3. O modelo *exponencial de dois termos* produziu valores sólidos de R² e calculou-se o menor desvio médio relativo (P), isso mostra a adequação deste modelo. Resultado semelhante foi obtido por Medeiros et al. (2016) e Silva et al (2019) ambos para manga.

No presente estudo, o parâmetro k apresentou valores maiores no grupo controle, o que resulta em tempo de secagem prolongado. A aplicação do pré-tratamento com ultrassom resultou em menores valores de parâmetros, reforçando a importância do ultrassom na redução do tempo de secagem. Resultados semelhantes foram relatados por Santos et al., (2017) na secagem de cascas de Pitaya (*H. undatus*) em temperaturas de 50, 60 e 70 ° C.

Tabela 3 - Parâmetros, coeficiente de determinação (R²) e erro médio relativo (P%), dos modelos ajustados as curvas de secagem da batata doce Beauregard em duas temperaturas do ar (50 e 70°C) Controle e Ultrassom (C e US).

Modelos	Parâmetros	50°C		70°C	
		C	US	C	US
Page		$RX = \exp(-Ktn)$			
	<i>a</i>	0.0083	0.0379	0.0753	0.0464
	<i>n</i>	17.42	0.803	17.74	0.879
	<i>R</i> ²	0.2483	0.9992	0.4262	0.9999
	<i>P</i>	93.75	25.999	90.909	61.143
Henderson e Pabis		$RX = \exp(-Kt)$			
	<i>a</i>	0.8881	0.94	0.9681	0.9787
	<i>k</i>	0.021	0,015	0.033	0.029
	<i>R</i> ²	0.9499	0.9886	0.9906	0.997
	<i>P</i>	37.482	18.314	28.606	12.916
Logarítmo		$RX = \exp(-Kt)+c$			
	<i>A</i>	0.8733	0.9204	0.9468	0.9661
	<i>C</i>	0.066	0.0488	0.0369	0.0208
	<i>K</i>	0.03	0.018	0.037	0.031
	<i>R</i> ²	0.9715	0.9952	0.9956	0.9982
	<i>P</i>	32.151	10.701	23.397	15.141
Wang e Singh		$RX = 1+at+bt^2$			
	<i>A</i>	0.0131	0.0106	0.0192	0.0183
	<i>B</i>	0.00004	0.00003	0.00009	0.00008
	<i>R</i> ²	0.7288	0.9049	0.8825	0.9306
Exp. 2 termos		$RX = a\exp(-Kt) + b\exp(-wt)$			
	<i>A</i>	0.4166	0.3312	0.6257	0.8167
	<i>B</i>	0.5833	0.6705	0.3745	0.1834
	<i>K</i>	0.149	0.048	0.023	0.025
	<i>W</i>	0.014	0.011	0.091	0.103
	<i>R</i> ²	0.9999	0.9995	0.9999	0.9999
	<i>P</i>	16.503	24.092	23.265	31.611
Exp. Simples		$RX = \exp(-Kt)$			
	<i>K</i>	0.025	0.016	0.034	0.029
	<i>R</i> ²	0.9344	0.9839	0.9893	0.9965
	<i>P</i>	47.159	23.144	31.32	15.089

C- Controle; US- Ultrassom

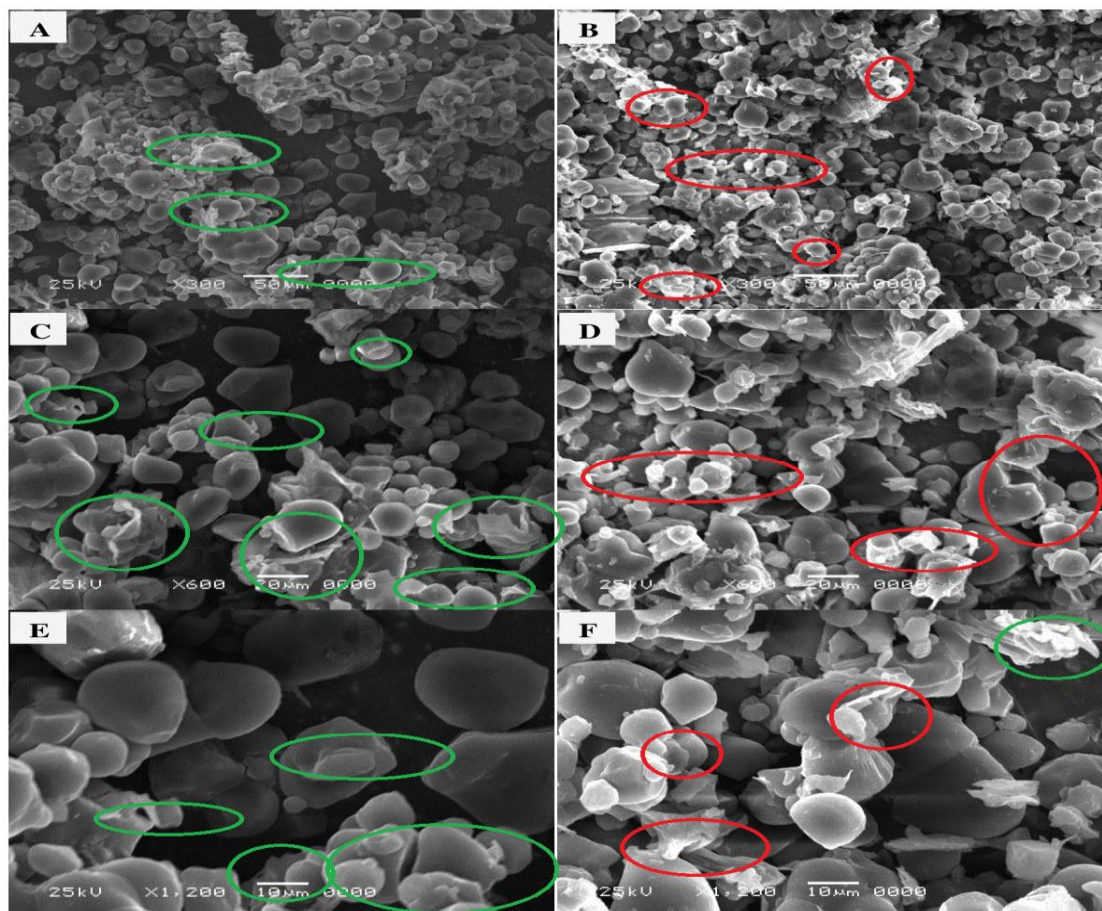
6.4 Análise da microestrutura

A microestrutura alimentar está intimamente associada à qualidade dos alimentos, valor sensorial e nutricional. A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi usada para examinar a estrutura da batata-doce com ampliações que variaram entre 300 e 1200 vezes. As imagens de MEV típicas de batata-doce nas duas temperaturas do ar (50 e 70 ° C) para o Controle e ultrassom (C e US) estão ilustradas nas Figuras 8 e 9.

Amostras desidratadas a 50 ° C apresentaram maior aglomeração e sinais de quebra ou estrangulamento das estruturas celulares (fig. 8). Estruturas com algumas fraturas celulares podem ser atribuídas à rápida evaporação de umidade por aquecimento ultrassônico (SU et al., 2018).

A aplicação do ultrassom parece induzir uma maior degradação da estrutura da batata-doce, causando aumento da porosidade e do diâmetro dos poros e ruptura da estrutura celular. No entanto, esses efeitos também podem facilitar a movimentação da água na matriz, melhorando a taxa de secagem (ONWUDE et al., 2018).

Figura 8 - Imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de batata doce Beauregard desidratada a temperatura de 50°C. Controle (A, C e E) e Ultrassom (B, D e F). As fissuras e estrangulamentos estão representados pela cor verde para o grupo controle e cor vermelha para o ultrassom.



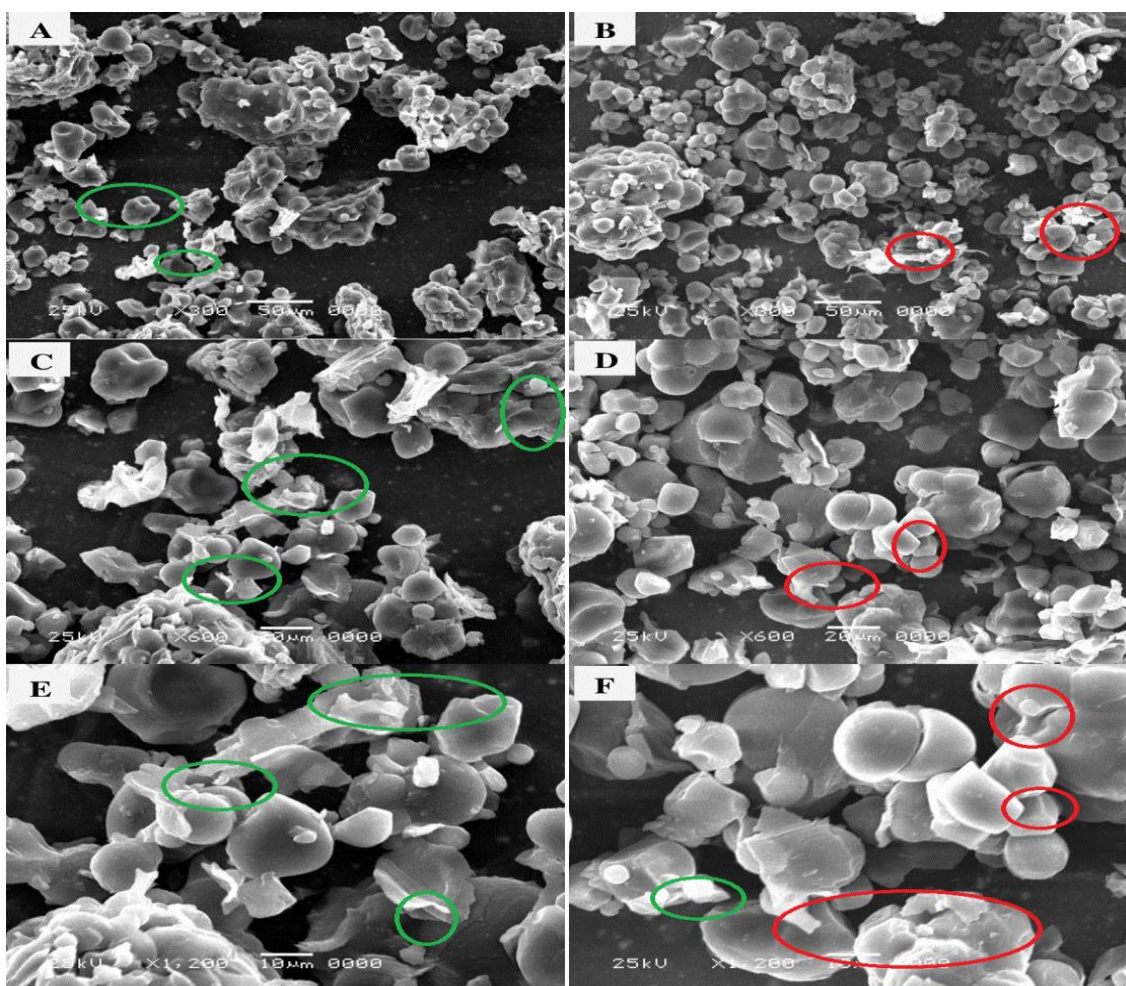
Por outro lado, a figura 9 na temperatura do ar a 70 ° C mostra uma microestrutura mais porosa e fissurada das amostras de batata-doce nas amostras tanto do controle como do ultrassom.

Os resultados estão de acordo com os apresentados por Lagnika et al., 2018 na secagem da batata-doce de polpa de laranja. A porosidade da estrutura é justificada pelo rápido aquecimento das amostras, o que leva à diminuição da água por evaporação e estresse interno nas células, alongamentos e contrações repetidas causadas por ondas ultrassônicas que dilatam o espaço intercelular, acelerando a desidratação indicando boa qualidade da amostra (NOWACKA e WEDZIK, 2016; SU et al., 2018). Além disso, o pré-tratamento por ultrassom não influenciou a espessura

da amostra, o que também garante desidratação rápida da amostra pré-tratada com ultrassom à temperatura de 70 ° C (Fig. 7).

A ruptura celular também pode ser atribuída às tensões de cisalhamento e aos efeitos da cavitação causados pelo extenso processamento de ultrassom de alta intensidade (Wang et al., 2019).

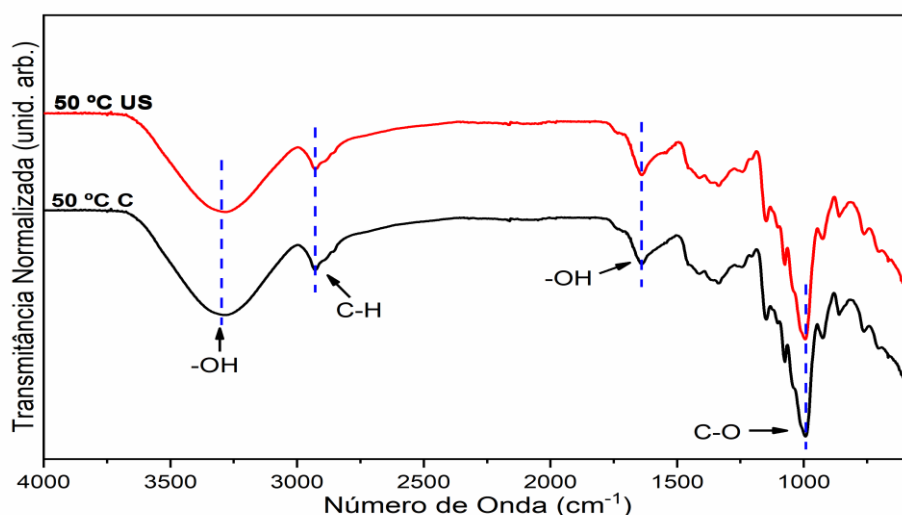
Figura 9 - Imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da batata doce Beauregard desidratada a temperatura de 70°C. Controle 70 (A, C e E) e Ultrassom (B, D e F). As fissuras e estrangulamentos estão representados pela cor verde para o grupo controle e cor vermelha para o ultrassom.



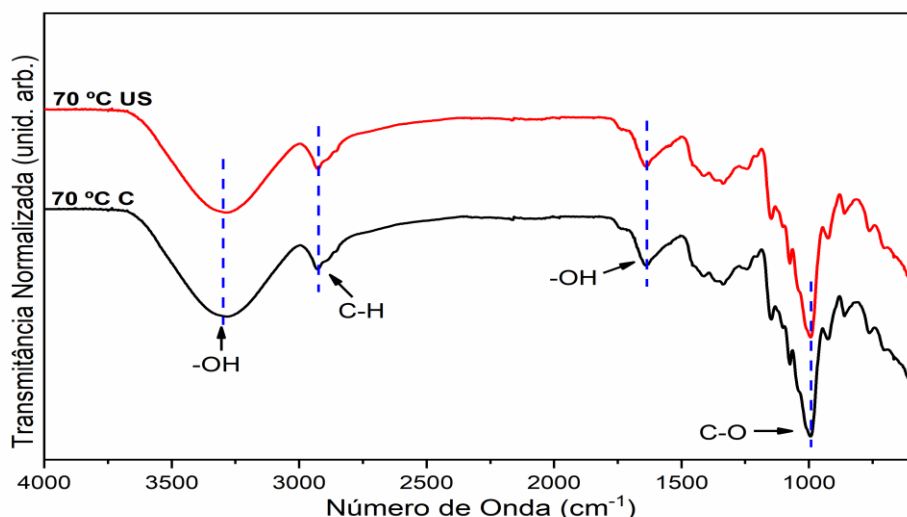
6.5 Análise dos Espectros de Infravermelho (FTIR)

As amostras da farinha de batatas-doce do controle e ultrassom foram submetidas aos métodos de análise por Refletância Total Atenuada (ATR), com emprego da espectroscopia no infravermelho médio ($4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$). A Figura 10 (a e b) ilustram respectivamente os espectros obtidos por ATR onde são apresentadas as informações estruturais para caracterização estrutural da amostra de batata-doce controle (C) e Ultrassom (US) nas temperaturas 50 e 70°C.

Figura 10 - Espectros de absorção na região do infravermelho por ATR das amostras de batata-doce biofortificada.



a) Espectros de absorção na região do infravermelho por ATR das amostras de batata-doce biofortificada à temperatura de desidratação de 50°C



b) Espectros de absorção na região do infravermelho por ATR das amostras de batata-doce biofortificada à temperatura de desidratação de 70°C.

Os espectros observados com base nas análises de infravermelho das amostras de batatas-doce para o grupo controle e ultrassom demonstraram bandas de absorção similares, sendo absorção típica de amidos (LIMA et al., 2012; CHANDRA, 2016).

Na figura 10, os picos de absorção que mostram as deformações moleculares existentes nas moléculas do amido a 3400 e 1650 cm^{-1} são atribuídas ao estiramento vibracional e a deformação angular de ligações dos grupos funcionais – OH (LIMA et al., 2012). Os amidos secundários são característicos em batata-doce, apresentando uma absorção característica nesta região do espectro (SILVERSTEIN et al., 2005).

Ainda na figura 10, observar-se também a banda a 2926 cm^{-1} , atribuída ao estiramento vibracional (simétrico ou assimétrico) dos grupos C-H metilas (COATES, 2000).

As vibrações por estiramentos influenciam alterações quanto ao aumento e diminuição da distância internuclear do átomo, e as deformações angulares atuam no sentido de uma mudança no ângulo de ligação entre átomos ou em grupamento de átomos (FORARO et al., 2010).

Os picos de absorção em 1640 cm^{-1} , referem-se a uma banda normalmente presente nos espectros de amido, sendo atribuída a uma vibração de dobragem de

H₂O ou ao número de grupo de hidroxilas em moléculas de amido, levando a uma elevada absorção de H₂O (ZHANG e HAMAKER, 2012; LIU et al., 2014).

Por fim, os picos de absorção em 1000 cm⁻¹, são considerados típicos para amidos, característica da deformação de estiramento do grupamento C-O em álcoois (LIMA et al., 2012).

Portanto, o espectro obtido nas amostras do grupo controle e ultrassom é muito semelhante, isto é, a aplicação do pré-tratamento com ultrassom não prejudica a estrutura química das amostras.

6.6 Carotenóides totais

Conforme mostrado na Tabela 4, não houve diferenças significativas no conteúdo total de carotenóides entre o grupo controle e o grupo pré-tratado. No entanto, Nowacka e Wedzik (2016) relataram que o pré-tratamento por ultrassom reduziu significativamente o conteúdo total de carotenóides em cenouras em comparação com as amostras não tratadas. Isso pode ter resultado de uma longa duração de processamento (20-30 min) em seus estudos.

Os resultados mostram que o pré-tratamento com ultrassom reteve o conteúdo total de carotenóides. Isso pode ser atribuído à ruptura mecânica das paredes celulares da matriz alimentar, o que pode aumentar o conteúdo de carotenóides livres e a preservação de estruturas protetoras de carotenóides durante o processamento do ultrassom (ABID et al., 2014).

Segundo Rodrigues-Amaya (1999), o ultrassom preserva compostos hidrofóbicos (compostos carotenóides), provavelmente devido à sua extração aumentada devido às ondas ultrassônicas que reduzem o oxigênio disponível para a formação de radicais livres, uma vez que o mecanismo de ação dos carotenóides é quelar o oxigênio singlete e sua formação.

A degradação é influenciada pelo oxigênio em altas temperaturas. Além disso, a retenção de carotenóides durante a aplicação de ultrassom pode mostrar que os microcanais formados durante as ondas ultrassônicas não permitem a passagem de compostos da amostra para o solvente, retraindo assim o conteúdo de carotenóides (RODRIGUES-AMAYA, 1999).

Tabela 4 - Carotenóides Totais da Batata-doce Biofortificada cultivar Beauregard Mesmas letras indicam que não há diferenças significativas ($P < 0.05$) entre diferentes tratamentos

	Carotenóides totais ($\mu\text{g/g}$)			
	50°C		70°C	
	C	US	C	US
470 nm	11.752 $\pm$ 0.176 ^a	14.00 $\pm$ 0.49 ^a	13.711 $\pm$ 0.07 ^a	13.115 $\pm$ 0.776 ^a
450 nm	19.195 $\pm$ 0.244 ^a	24.238 $\pm$ 0.968 ^a	23.071 $\pm$ 0.353 ^a	22.187 $\pm$ 0.783 ^a

6. 7 Atividade antioxidante por métodos DPPH e ABTS+

A principal característica dos compostos bioativos é a atividade antioxidante, que sequestra os radicais livres gerados por reações metabólicas e pode favorecer a manutenção da saúde individual, principalmente no que se refere à prevenção de doenças crônicas não transmissíveis (WU et al., 2015; YAN et al., 2016).

No presente trabalho, as batatas-doces foram avaliadas quanto sua atividade antioxidante, segundo o método de radical DPPH e a atividade anti-radical livre utilizando-se o método de ensaio do radical ABTS. Para estas análises foi utilizado o extrato em metanol 80 %. Os resultados da atividade antioxidante dos extratos de farinha de batata doce são apresentados na Tabela 5.

A atividade antioxidante observada pelos dois métodos (DPPH e ABTS+), (Tabela 5) apresentou correlação positiva com a temperatura. Esse fato pode ser atribuído a diversas reações químicas, como a reação de Maillard, induzida por alta intensidade térmica, que pode levar ao surgimento de novos compostos com alta atividade antioxidante (TIAN et al., 2016).

O pré-tratamento com ultrassom a 70 ° C não apresentou diferença significativa ($p > 0,05$) em relação ao grupo controle. De acordo com Wang et al. (2017), as alterações das ondas ultrassônicas que levam ao aumento da solubilidade nem sempre levam à melhora da atividade antioxidante.

Sledz et al. (2015) investigaram a influência do ultrassom na cinética de secagem, atividade antioxidante e microestrutura das folhas de manjerição e concluíram que o pré-tratamento com ultrassom não altera a atividade antioxidante.

Por outro lado, a aplicação do ultrassom não influenciou o potencial antioxidante determinado pelos dois métodos (DPPH e ABTS+), indicando que os compostos antioxidantes que atuam pelo mecanismo de captura de radicais livres foram retidos pelo ultrassom.

Tabela 5 - Atividade Antioxidante (DPPH e ABTS+) da batata-doce biofortificada cultivar Beauregard

	AMOSTRA			
	50 ° C		70 ° C	
Metodo	Controle	Ultrassom	Controle	Ultrassom
%DPPH	17,72±0,47	13,20±0,44	31,06 ±1,73	27,45 ±0,16
% ABTS	15,22 ±0,23	15,93±2,28	17,13±1,77	18,90±2,83

Para cada temperatura, as mesmas letras na mesma linha significam que não diferem significativamente ($P < 0,05$) entre os dois grupos: (ultrassom) e C (controle).

7 CONCLUSÕES

O pré-tratamento com ultrassom na desidratação da batata-doce biofortificada, reduziu o tempo de secagem com o aumento da temperatura e proporcionou maior ganho de sólidos, tendo o *exponencial de dois termos* apresentado as previsões mais precisas.

O pré-tratamento com ultrassom influenciou na microestrutura através de maior aglomeração, quebra ou estrangulamento da estrutura da amostra, aumentando a porosidade e, assim, encurtando as taxas de secagem. Porém, não influenciou no teor de carotenoides totais e na atividade antioxidante.

A análise de espectroscopia de absorção na região do infravermelho apresentou bandas características para amido nas amostras de batata-doce, O que demonstra que não houve alteração no principal componente nutricional - carotenoide da batata doce que foi submetida ao pré-tratamento.

Portanto, Tendo em conta que a presente pesquisa teve como objetivo avaliar efeito da aplicação de pré-tratamento por ultrassom na desidratação: sua influência na microestrutura, atividade antioxidante e retenção de carotenóides da batata-doce biofortificada, seria interessante determinar o perfil dos carotenoides presentes nas amostras em ambos tratamentos, adicionalmente, desenvolver produto e analisar nutricional e sensorialmente.

Mesmo com o avanço do conhecimento e das evidências científicas das múltiplas vantagens do ultrassom na desidratação de alimentos, nomeadamente redução de tempo de secagem, sua não influencia nas características nutricionais, esse fato, coloca o ultrassom em uma posição de destaque, vislumbrando a possibilidade de redução dos custos com matéria-prima na indústria alimentícia de biscoito, massas, entre outras. Entretanto, por ser ainda semi-piloto o uso desta tecnologia emergente- ultrassom e sua transferência para a indústria vai levar seu tempo.

REFERÊNCIAS

- ABID, M. JABBAR S, WU T, HASHIM MM, HU B, LEI S, ZENG X. Sonication enhances polyphenolic compounds, sugars, carotenoids and mineral elements of apple juice. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 21, n.1, p. 93-97, 2014.
- ALVES, F.R, ALVES, S.R., GARÓFOLO, A., Modesto, P.C.. Binômio desnutrição e pobreza: uma meta a ser vencida pelos países em desenvolvimento. **Rev Baiana Saúde Pública**. v. 35, n. 3, p. 744-757, 2011.
- ALVES, R. M. V., ITO, D., CARVALHO, J.L.V., MELO, W.F., GODOY, R.L.O. Stability of biofortified sweet potato flour. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 15, n. 1, p. 59-71, 2012.
- AOAC. Association of Official Analytical Chemists. Official methods of analysis of AOAC. 17th ed. Washington, 2002.
- AZOUBEL, P. M., BAIMA, M. A. M., AMORIM, M. R., OLIVEIRA, S. S. B. Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, v. 2, n. 97, p.194-198, 2010.
- BAGANHA, C.L., CARVALHO, L.M.J., FERNANDEZ, A.A., SIMAS, E., CHERN, M.S., CARVALHO, J.L.V, MELLO, A.F.S., Minguita. Ferro e zinco em cultivares de batata doce de polpa (ipomoea batatas lam) alaranjada, cv. beauregard biofortificada crua, branqueada e seca. **Ciencia e Tecnologia de Alimentos**, 2016.
- BARRERA, G N; DOMINGUEZ, G. C.; PÉREZ, J. C.; LÓPEZ, G. F. G.; LÉON, A. E.; RIBOTTA, P. D. Evaluation of the mechanical damage on wheat starch granules by SEM, ESEM, AFM and texture image analysis. **Carbohydrate Polymers**, v. 98, p. 1449–1457, 2013.
- BAŞLAR, M.; KILIÇLI, M.; YALINKILIÇ, B. Dehydration kinetics of salmon and trout fillets using ultrasonic vacuum drying as a novel technique. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 27, p. 495– 502, 2015.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 2, de 02 de janeiro de 2002. Aprova o regulamento técnico de substâncias bioativas e probióticos isolados com alegação de propriedades funcional e ou de saúde. Brasília, DF: ANVISA, 2002.
- BECK, S.M., SABAREZ, H., GAUKEL, V., KNOERZER, K. Enhancement of convective drying by application of airborne ultrasound - a response surface approach. **Ultrason. Sonochem**, n.21, p.2144-2150, 2014.
- BERNI, P., CHITCHUMROONCHOKCHAI, C., CANNIATTI-BRAZACA, S. G., DE MOURA, F. F., FAILLA, M. L. 2015. Comparison of Content and In vitro Bioaccessibility of Provitamin A Carotenoids in Home Cooked and Commercially Processed Orange Fleshed Sweet Potato (Ipomea batatas Lam). **Plant Foods for Human Nutrition**, v.70, n.1, p.1–8, 2015.

BRAND-WILLIAMS, W. CUVELIER, M.E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. **Lebensm-Wiss u-Technol**, v. 28, p. 25-30, 1995.

CANO-CHAUCA, M.; RAMOS, A.M.; STRINGHETA, P.C.; PEREIRA, J.A.M. Drying curves and water evaluation of dried banana. In: International Drying Symposium, São Paulo- SP, Brazil, Proceedings... Campinas: UNICAMP, v.14, p. 2013- 2020, 2004.

CARDOSO, A. D., VIANA, A. E. S., RAMOS, P. A. S., MATSUMOTO, S. N., AMARAL, C. L. F., SEDIYAMA, T., MORAIS, O. M. (2005). Evaluation of sweet potato clones in Vitória da Conquista. **Horticultura Brasileira**, v.4, n.23, p.911-914, 2005.

CARDOSO, A.D.; VIANA, A.E.S.; MATSUMOTO, S.N.; BONFIM NETO, H.; KHOURI, C.R.; MELO, T.L. Características físicas e sensoriais de clones de batata-doce. **Ciência e Agrotecnologia**, v.31, p.1760-1765, 2007.

CARVALHO, F. M.; SANTOS, A.; VIANA, A. E. S.; LOPES, S.C.; EGLER, P.G. Avaliação da atividade poluidora da manipueira na bacia do Rio Santa Rita em Vitória da Conquista, Bahia, n.1, 2005.

CERQUERA, N.E., PASTRANA, E. AND CASTRO, J.K. Determination of the Drying Variables for Dehydration of Banana Pulp Sheets (*Musa Paradisiaca* L.). **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, n.12, p.160-167, 2017.

CHANDRA, R. A. I.; SRIWIDODO; HASANAH, A. N.; AGUSTINA, R.: Optimization of starch from Indonesian local corn with concentration variation of sodium metabisuphite drying time. **International Journal of Chemical Engineering and Application**, v. 7, n. 2, 2016.

COATES, J.: Interpretation of infrared spectra, a practical approach. **Encyclopedia of Analytical Chemistry**, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2000.

CHEMAT, F., ROMBAUT, N., SICAIRE, A.G., MEULLEMIESTRE, A., FABIANO-TIXIER, A.S, ABERT-VIAN, M. Ultrasound Assisted Extraction of Food and Natural Products. Mechanisms, Techniques, Combinations, Protocols and Applications. A Review. **Ultrasonics Sonochemistry**, n.34,p.540–60, 2017.

DONADO-PESTANA.C.M, SALGADO. J.M,ALESSANDRO DE OLIVEIRA RIOS, ROBERTINA DOS SANTOS. P, JABLONSKI. A. Stability of Carotenoids, Total Phenolics and In Vitro Antioxidant Capacity in the Thermal Processing of Orange-Fleshed Sweet Potato (*Ipomoea batatas* Lam.) Cultivars Grown in Brazil.**Plant Foods Hum Nutr**. N.67.p.262–270, 2012.

FAN, K.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A. S. Application of airborne ultrasound in the convective drying of fruits and vegetables: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 39, n. March, p. 47–57, 2017.

FERNANDES, F.R; AMARO, G.B; MADEIRA, N.R; CAVALIERI, S.D; MELO, W.F.

Bifortificação: Batata-doce Beauregard. Brasília, DF: **Embrapa**. 2014.

FERNANDES, F. A. N., OLIVEIRA, F. I. P., RODRIGUES, S. Use of ultrasound for dehydration of papaya. **Food and Bioprocess Technology**, n.1, p.339-345, 2008.

FUENTE-BLANCO; S.; RIERA-FRANCO S., E.; ACOSTA-APARICIO, V. M.; BLANCO-BLANCO, A.; GALLEGUO-JUÉREZ, J. A. **Food drying process by power ultrasound**. **Ultrasonics**, v. 44, 523-527, 2006.

FORARO, L. A.; FILHO, R. B.; OSIRO, D.; BICUDO, T. C.; COLNAGO, L. A.: A espectroscopia na região do infravermelho e algumas aplicações. **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, São Carlos, p.14 p, 2010.

GARCÍA-CASAL, M. N., & LEETS, I. Carotenoids, but Not Vitamin A, Improve Iron Uptake and Ferritin Synthesis by Caco-2 Cells from Ferrous Fumarate and NaFe-EDTA. **Journal of Food Science**. V.4, n.79, 2014.

GOMES, F.P. , RESENDE, O. , SOUSA, E.P. , DE OLIVEIRA, D.E.C., NETO, F.R.A. Drying kinetics of crushed mass of 'jambu': Effective diffusivity and activation energy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.22, p.499-505, 2018.

GONÇALVES, N. A.C. Aptidões para consumo humano, produção de etanol e alimentação animal em clones de batata-doce. Tese de Doutorado (Agronomia/Fitotecnia) -Universidade Federal de Lavras. 77p, 2010.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H. de. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.11, p.64-73, 2009.

GONELI, A. L. D; VIEIRA, M.C.; VILHASANTI, H.C.B. GONCALVES, A.A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory. II: Temperature effects on drying coefficients. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.6, p.169-174. 1961.

HAGENIMANA, V.; K'OSAMBO, L.M.; CAREY, E.E. Potential of sweetpotato in reducing vitamin A deficiency in Africa. CIP 1997-1998. **Program Report**. 1998. p.289-294, 1998.

GUO, Z., ZHAO, B., HUANG LI,H., MIAO.S., ZHENG.B. Optimization of ultrasound-microwave synergistic extraction of prebiotic oligosaccharides from sweet potatoes (*Ipomoea batatas* L.). **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. 2019.

IGUAL, M.; GARCÍA-MARTÍNEZ, E.; CAMACHO MM.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. Stability of micronutrients and phytochemicals of grapefruit jam as affected by the obtention process. **Food and Science and Technology International**, v.2,n.22, p.203-212, 2015.

INFANTE,R.A., NATAL,D.S.G., MOREIRA,M.E.C., BASTIANI, M.I.D., CHAGAS, C.G.O., NUTTI,M.R.N., QUEIROZ, V.A.V., Martino, H.S.D. Enriched sorghum cookies with biofortified sweet potato carotenoids have good acceptance and high iron bioavailability. **Journal of Functional Foods**, n.38, p.89–99, 2017.

INYANG, U.E., OBOH,I.O., ETUK, B.R. Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials. **Advances in Chemical Engineering and Science**, n.8, p.27-48, 2018.

ISLAM.S.N, NUSRAT .T, BEGUM .P., AHSAN.M. Carotenoids and b-carotene in orange fleshed sweet potato: A possible solution to vitamin A deficiency. **Food Chemistry** n.199, p.628–631, 2016.

ISQUIERDO, E. P. BOREM, F. M. ANDRADE, E. T. CORREA, J. L. G. OLIVEIRA, P. D. ALVES, G. E. Drying kinetics and quality of natural coffee. Transactions of the ASABE, v. 56, p. 1003–1010, 2013.

KIANI, HOSSEIN, ZHIHANG ZHANG E DA-WEN SUN. Experimental Analysis and Modeling of Ultrasound Assisted Freezing of Potato Spheres. **Ultrasonics – Sonochemistry**, 2015.

LAGNIKA, C., HUANG, J., NING, J., LI, D., LIU, C., SONG, J., WEI, Q., ZHANG, M. Ultrasound-assisted osmotic process on quality of microwave vacuum drying sweet potato. **Drying Technology An International Journal**, p.1532-2300, 2018.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v.13, p.427-432, 1921.

LIMA, B. N. B.; CABRAL, T. B.; NETO, R. P. C.; TAVARES, M. I. B.: Estudo do amido de farinhas comerciais comestíveis. **Polímeros**, v. 22, n. 5, p. 486-490, 2012.

LOW, J.W, VAN JAARSVELD, P.J. The potential contribution of bread buns fortified with β -carotene-rich sweet potato in Central Mozambique. **Food and Nutrition Bulletin**, v. 29, n. 2, 2008.

LIU, J., WANG, B., LIN, L., ZHANG, J., LIU, W., XIE, J., & DING, Y. Functional, physicochemical properties and structure of cross-linked oxidized maize starch. **Food Hydrocolloids**, n.36, p.45-52, 2014.

MAGALHAES, M. L., SAMUEL, J. M., GALLAO, M.I., GARCÍA-PEREZ, J.V., CARCEL, J.A., FERNANDES, S.R.F.A.N. Drying intensification combining ultrasound pre-treatment and ultrasound-assisted air drying. **Journal of Food Engineering**, n.215, p.72-77, 2017.

MARINOVA, D.; RIBAROVA, F. HPLC determination of carotenoids in Bulgarian berries. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 20, p. 370-374, 2007.

MARTINAZZO, A. P., CORREA FILHO, L. C., TEODORO, C. E. S., BERBERT, P. A. Dryng kinetcs and microbiological quality of green onions. **Revista Ceres**, v.63,n. 6, p.769-774, 2016.

MARTINS, E.A.S., GONELI, A.L.D., GONCALVES, A.A., HARTMANN FILHO, C.P.H., SIQUEIRA, V.C., OBA, G.C. Drying kinetics of blackberry leaves. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**.v.22, n.8, p.570-576, 2018.

MENEZES, M. L. DE; STRÖHER, A. P.; PEREIRA, N. C.; BARROS, S. T. D. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. **Engevista**, v.15.176-186. 2013.

MOHAMMADALINEJHAD, S., DEHGHANNYA, J. Effects of ultrasound frequency and application time prior to deep-fat frying on quality aspects of fried potato strips Innovative. **Food Science and Emerging Technologies**, n.47, p.493–503, 2018.

MUTHAYYA, S.; RAH, J. H.; SUGIMOTO, J. D.; ROSS, F. F.; KRAEMER, K.; BLACK, R. E. The global hidden hunger indices and maps: an advocacy tool for action. **Plos One**, v. 8, n. 6. 2013.

NADERINEZHAD, S., ETESAMI, N., NAJAFABADY, A.P. AND FALAVARJANI, M.G. Mathematical Modeling of Drying of Potato Slices in a Forced Convective Dryer Based on Important Parameters. **Food Science and Nutrition**, n.4, p.110-118, 2016.

NEMS, A, ANNA P, ALICJA Z. KUCHARSKA , ANNA SOKOŁ-ŁĘTOWSKA , KITA. A, DRO, W, HAMOUZ, K Anthocyanin and antioxidant activity of snacks with coloured potato. **Food Chemistry**, n.72, p.175–182, 2015.

NOLÊTO, D.C., DA SILVA,C.R.P, COSTA,C.L.S., UCHÔ,T.V. Physico-chemical characterization of sweet potato (ipomoea batatas) and common biofortified. **Ciência Agrícola**, Rio Largo, v. 13, n. 1, p. 59-68, 2015.

NOWACKA, M., WEDZIK, M. Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue, **Appl. Acoust**,n.103, p.163–171, 2016.

OLADEJO, A. O., MAA, H. Optimisation of ultrasound-assisted osmotic dehydration of sweet potato (Ipomea batatas) using response surface methodology. **J Sci Food Agric**, n.96, p.3688–3693, 2016.

OLIVEIRA V.S., S. RODRIGUES, F.A.N. FERNANDES Efeito do ultrassom de baixa frequência de alta potência de processamento na estabilidade do licopeno puro e em tomates. Florianópolis/SC, 2014.

ONAL. B., ADILETTA. G., CRESCITELLI, A., DI MATTEO. M., RUSSO. P. Optimization of hot air drying temperature combined with pre-treatment to improve physico-chemical and nutritional quality of ‘Annurca’ Apple. **Food and Bioproducts Processing**. 2019.

ONWUDE, D.I., HANSHIM, N., JANIUS, R.B., NAWI, N.M. AND ABDAN, K. Modeling the Thin Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. Comprehensive Reviews in **Food Science and Food Safety** , 15, 299-618, 2016.

ONWUDE, D.I., NORHASHILA, H., KHALINA, A., RIMFIEL, J., GUANGNAN, C. Investigating the influence of novel drying methods on sweet potato (*Ipomoea batatas* L.): Kinetics, energy consumption, color, and microstructure. **Jornal of Food Process Engineering**, n.41, p.1-12, 2018.

PADILHA, A.F, F. Ambrosio Filho, Técnicas de análise microestrutural, 1ª ed. Editora Hemus, 2004.

Page, G.E. Factors Influencing the Maximum Rate of Air Drying Shelled Corn in Thin-Layers. M.S. Thesis, Purdue University, West Lafayette. 1949

PANDEY, S.K., DIWAN, S. AND SONI, R. Review of Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Process. **International Journal of current Engineering and Scientific Research** , n.3, p.96-107, 2015.

PARK, K.B., PARK, K.J., ALONSO, L.F.T. , CORNEJO, F.E.P. , FABBRO, I.M. secagem: fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.16, n.1, p.93-125, 2014.

RICCE, C., ROJAS, M.L., MIANO, A.C., SICHE, R., AUGUSTO, P.E.D. Ultrasound Pretreatment enhances the carrot drying and rehydration, **Food Research International**, v. 89, p. 701-708, 2016.

RODRIGUEZ-AMAYA, D.B. A guide to carotenoid analysis in foods. ILSI Press: SCOTT, J., REBEILLE, F., FLETCHER, J. Folic acid and folates – the feasibility for nutritional enhancement in plant foods. **Journal of Science of Food and Agriculture**, v. 6, p.56-67, 1999.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. Advances in food carotenoid research: contribution of a Brazilian laboratory. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 63, n. 2, p.129-38, 2004.

RODRIGUES-AMAYA, D. B.; KIMURA, M.; GODOY, H. T.; AMAYA-FARFAN, J. Updated Brazilian database on food carotenoids: factors affecting carotenoid composition. **Journal of Food Composition and Analysis**, San Diego, v. 21, n. 6, p. 445-463, 2008.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B.; NUTTI, M. R.; CARVALHO, J. L. V. Carotenoids of sweet potato, cassava, and maize and their use in bread and flour fortification. In: PREEDY, R. R.; WATSON, R. R.; PATEL, V. B. Flour and breads and their fortification in health and disease prevention. London; Burlington; San Diego: Academic Press; **Elsevier. chap.** n.28, p. 301-311. 2011.

RUFINO, M. S.M., ALVES, R.E., BRITO, E.S., MORAIS, S.M., SAMPAIO, C.G., JIMÉNEZ, J.P., SAURA-CALIXTO, F.D. Metodologia Científica: Determinação da Atividade Antioxidante Total em Frutas pela Captura do Radical Livre DPPH e pela Captura do Radical Livre ABTS +. Comunicado técnico 128, ISSN 1679-6535. **Embrapa Agroindústria Tropical**, 2007.

SABAREZ, H. T.; GALLEGUO-JUAREZ, J. A.; RIERA, E. Ultrasonic-assisted

convective drying of apple slices. **Drying Technology**, v. 30, n. 9, p. 989–997, 2012.

SANTOS, F.S., ROSSANA M. F., DE FIGUEIRÊDO, ALEXANDRE, J., SANTOS, D. Drying kinetics and physical and chemical characterization of white-fleshed ‘pitaya’ peels. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 12, n.21, p.872-877, 2017.

SANTOS, E. A., DE ANDRADE JÚNIOR, V.C., DE SOUSA JÚNIOR, A.S., OKUMURA, F., SIMEONE, M.L.F., SANTOS, J.B., AZEVEDO, A.M. Mistico Selectivity of pre-emergent herbicides in sweet potato genotypes. **Rev. Bras. Cienc. Agrar**, v.1, n.13, p. 5511, 2018.

SHARAF-ELDEEN, Y. I.; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. A model for ear corn drying. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, v.23, p.1261-1265. 1980.

SENANAYAKE, S. A., RANAWEERA, K.K, GUNARATNE, A., BAMUNUARACHCHI, A. Comparative analysis of nutritional quality of five different cultivars of sweet potatoes (*Ipomea batatas*(L) Lam) in Sri Lanka. **Food Science & Nutrition**, v. 1, p. 284-291, 2013.

SILVA, R.G.V. Caracterização físico-química de farinha de batata-doce para produtos de panificação. Itapetinga Bahia, Brasil, 2010.

SILVA, R.B., SILVA, F.S., PORTO, A.G., ALVES, A.P. Estudo da cinética de secagem de popla de carambola. **R. bras. Tecnol. Agroindustr.** v. 10, n. 2, p. 2069-2080, 2016.

SILVA, H. W., RODOVALHO, R. S., VELASCO, M. F., SILVA, C. F., VALE, L. S. R. Kinetics and thermodynamic properties related to the drying of ‘Cabacinha’ pepper fruits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n.20, p.174-180, 2016.

SILVA, H.W, VALE, L.S.R, SILVA, C.F. SOUZA, R.C., SOARES, R.S. Drying kinetics and physiological quality of ‘Cabacinha’ pepper seeds during storage. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.22, n.4, p.292-297, 2019.

SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X.; KIEMLE, D. J.: **Spectrometric identification of organic compounds 7th edition**. John Wiley & Sons, 2005.

SLEDZ, M.; WIKTOR, A.; NOWACKA, M.; WITROWA-RAJCHERT, D. Drying kinetics, microstructure and antioxidant properties of basil treated by ultrasound. **Journal of Food Process Engineering**, 2015.

SOUZA, K. A., RESENDE, O., CHAVES, T. H., COSTA, L. M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, n.42, p.883-892, 2011.

STEVENS, R.; WINTER-NELSON, A. Consumer acceptance of provitamin A – biofortified maize in Maputo, Mozambique. **Food Policy**, v.4, n.33, p.341-351, 2008.
SUKHCHARN SINGH, C. S., RAINA, A. S., SAXENA, D. C. Effect of Pretreatments

on Drying and Rehydration Kinetics and Color of Sweet Potato Slices. **Drying Technology: An International Journal**, v.11, n.24, p.1487-1494, 2006.

SU, Y., ZHANG, M., BHANDARI, B., ZHANG, W. Enhancement of water removing and the quality of fried purple-fleshed sweet potato in the vacuum frying by combined power ultrasound and microwave technology. **Ultrasonics – Sonochemistry**, n.44, p.368–379, 2018.

TEOW, C. C.; TRUONG, V. D.; MCFEETERS, R. F.; THOMPSON, R. L.; PECOTA, K. V.; YENCHO, G. C. Antioxidant activities, phenolic and β -carotene contents of sweet potato genotypes with varying flesh colours. **Food Chemistry**, n. 103, p. 829-838, 2007.

TIAN, J.; CHEN, J.; LV, F.; CHEN, S.; CHEN, J.; LIU, D.; YE, X. Domestic cooking methods affect the phytochemical composition and antioxidant activity of purple-fleshed potatoes. **Food Chemistry**, v. 197, p. 1264–1270, 2016.

VAN JAARSVELD, P. J.; MARAIS, D. W.; HARMSE, E.; NESTEL, P.; RODRIGUES-AMAYA, D. B. Retention of β -carotene in boiled, mashed orange-fleshed sweet potato. **Journal of Food Composition and Analysis**, San Diego, v. 19, n. 4, p. 321-329, 2006.

VERMA, L. R.; BUCKLIN, R. A.; ENDAN, J. B.; WRATTEN, F. T. Effects of drying air parameters on rice drying models. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.28, p.296-301. 1985.

VIZZOTTO, M., PEREIRA, E. S., VINHOLES, J. R., MUNHOZ, P. C., FERRI, N. M. L., CASTRO, L. A. S., KROLOW, A. C. R. 2017. Physicochemical and antioxidant capacity analysis of colored sweet potato genotypes: in natura and thermally processed. **Ciência Rural**, v.4, n. 47, p.1-8, 2017.

WANG, Q.; SHENG, X.; SHI, A.; HU, H.; YANG, Y.; LIU, L.; FEI, L.; LIU, H. β -Glucans: Relationships between modification, conformation and functional activities. **Molecules**, v. 22, n. 2, p. 1–12, 2017.

WANG, J., XIAO, H. W., YE, J. H., WANG, J., & RAGHAVAN, V. Ultrasound Pretreatment to Enhance Drying Kinetics of Kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) Slices: Pros and Cons. **Food and bioprocess technology**, v.12,n.5, p.865-876. 2019.

WU, J., CHO, E., WILLETT, W.C., SASTRY, S.M., SCHAUMBERG, D.A. Intakes of luteina, zeaxanthin and other carotenoids and age-related macular degeneration during 2 decades of prospective follow-up. *JAMA Ophthalmol*, v. 133, n. 12, p. 1415-1424, 2015.

YAGCIOGLU, A.; DEGIRMENCIOGLU, A.; CAGATAY, F. Drying characteristics of laurel leaves under different conditions. In: International Congress on Agricultural Mechanization and Energy, 7, 1999, Adana. Proceedings... Adana: Faculty of Agriculture, Cukurova University, p.565-569.1999.

YAN, B., Lu, M.S., Wang, L., Mo, X.F., Luo, W.P., Du, Y.F., Zhang, C.X. Specific

serum carotenoids are inversely associated with breast cancer risk among Chinese women: a case-control study. **British Journal of Nutrition**, v. 115, p. 129-137, 2016.

YANG, F., ZHANG, M., ARUN, S., ZHONG, Q., WANG, Z. Enhancing drying efficiency and product quality using advanced pretreatments and analytical tools—An overview. **Drying Technology An International Journal**, p.0737-3937, 2018.

ZHENG, K.;JIANG, Q.; WEI, L.;ZHANG, X.;MA, J.;CHEN, G.; WEI, Y.; JENNIFER, M. F.; LU, Z.; ZHENG, Y. Characterization of starch morphology, composition, physicochemical properties and gene expressions in oat. *Journal of Integrative Agriculture*, v. 14, p. 20–28, 2015.

ZHANG, P.; HAMAKER B. R. Banana starch structure and digestibilit. **Carbohydrate Polymers**, n.87, p.1552 – 1558, 2012.

ZHANG, P., ZHU, Z., SUN, D. Using Power Ultrasound to Accelerate Food Freezing Processes: Effects on Freezing Efficiency and Food Microstructure. **Reviews in Food Science and Nutrition**, p.1549-7852, 2018.

ZHAO, J., QIAN-QIAN Y. , REN-YU X. , ZHANG, J., ZHANG, Y.. Isolation and identification of colourless caffeoyl compounds in purple sweet potato by HPLC-DAD–ESI/MS and their antioxidant activities. **Food Chemistry**, n.161, p.22–26, 2014.

ZHU.Z, GUAN.Q, KOUBAA.M, BARBA.F.J, ROOHINEJAD.S, CRAVOTTO.G, YANG.X, LI.S, HE.J. HPLC-DAD-ESI-MS2 analytical profile of extracts obtained from purple sweet potato after green ultrasound-assisted extraction. **Food Chemistry**, n.15, p.391–400, 2017.

**APÊNDICE – ULTRASOUND PRETREATMENT APPLICATION IN DEHYDRATION:
ITS INFLUENCE ON THE MICROSTRUCTURE, ANTIOXIDANT ACTIVITY AND
CAROTENOID RETENTION OF BIOFORTIFIED BEAUREGARD SWEET POTATO
(*IPOMOEA BATATAS* LAM)**



Ultrasound pretreatment application in dehydration: its influence on the microstructure, antioxidant activity and carotenoid retention of biofortified Beauregard sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam)

Rufino Antônio Infante¹ · Patrícia Moreira Azoubel² · Marcos Antonio Barbosa de Lima³ · Thayza Christina Montenegro Stamford⁴ · Alessandra Silva Araújo⁵ · Wilson Souza de Mendonça⁶ · Margarida Angélica da Silva Vasconcelos¹

Revised: 25 November 2020 / Accepted: 1 December 2020
© Association of Food Scientists & Technologists (India) 2021

Abstract This work aimed to evaluate the effects of ultrasound pretreatment on the microstructure, antioxidant activity, and carotenoid retention of biofortified Beauregard sweet potato (BBSP). The pretreatment was carried out in an ultrasonic bath at 30 °C for 10 min, and it was evaluated in terms of water loss and solid gain. The drying process was performed at two different temperatures (50 and 70 °C). Six different semi-theoretical mathematical models were examined to characterize the drying curves, and quality analyses were executed. The two-terms exponential model provided the best simulation of the drying

curves. Drying time was reduced by performing ultrasound pretreatment and by increasing drying temperature. The ultrasound treatment caused greater agglomeration, breakage, or strangulation of the BBSP structure, increasing porosity, and thus increasing drying rates. Drying caused a diminution of total carotenoids content and influenced antioxidant activity. However, the samples pretreated with ultrasound and dried produced lower total carotenoids loss.

Keywords Ultrasound · Dehydration · Microstructure · Total carotenoids · Antioxidant activity · Biofortified Beauregard

✉ Rufino Antônio Infante
ruffinoinfante@gmail.com

¹ Laboratório de Experimentação e Análise de Alimentos, Departamento de Nutrição, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Moraes Rego, s/n, Cidade Universitária, Recife, PE 50740-521, Brazil

² Laboratório de Engenharia de Alimentos, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Arthur de Sá, s/n, Cidade Universitária, Recife, PE 50740-521, Brazil

³ Laboratório de Microbiologia Agrícola e Ambiental, Departamento de Biologia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brazil

⁴ Laboratório de Microbiologia Aplicada, Centro de Ciências Médicas, Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Engenharia, s/n°, 2° andar, Microbiologia e Imunologia, Cidade Universitária, Recife, PE CEP: 50.670-420, Brazil

⁵ Departamento de Nutrição, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Moraes Rego, s/n, Cidade Universitária, Recife, PE 50740-521, Brazil

⁶ Laboratório de Microscopia e Microanálise, Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste – CETENE, Av. Prof. Luís Freire, 1 - Cidade Universitária, Recife, PE 50740-545, Brazil

Introduction

The biofortified Beauregard sweet potato (BBSP) (*Ipomoea lam potatoes*) is the most consumed and disseminated biofortified vegetable in the world (Santos et al. 2018), mainly in African countries, due to their nutritional characteristics. The orange color of the pulp indicates a strong presence of beta-carotene from provitamin A, which has beneficial effects on human health, preventing eye disorders and skin diseases, aiding in growth and development, and strengthening the immune system. It also has antioxidant properties, acting in the elimination of free radicals, improving iron absorption, and providing anti-mutagenic properties (Vizzotto et al. 2017).

In addition to its nutritional benefits, BBSP shows satisfactory results in several areas related to production. It presents higher root yield and cycle precocity rates when compared to other varieties of the sweet potato. This means a longer harvest period, easier cultivation, and wide adaptation to the low-level technological systems of subsistence farming (Islam et al. 2016).

In this sense, BBSP stands out as a significant player in malnutrition eradication in certain populations, including children, women of childbearing age, and pregnant women (Berni et al. 2015). A viable alternative for the use of the BBSP in the human diet is its processing for flour production by drying method.

Drying is one of the most common methods used to extend shelf life and to maintain the quality of food products stored below ambient temperature (Onal et al. 2019). However, drying also modifies the microstructure of the food. Ultrasound pretreatment is considered an emerging technological alternative which can increase drying rate and improve food quality. Ultrasound application results in the formation of micro-channels, increasing the porosity of the samples, and improving drying rates (Guo et al. 2019; Wang et al. 2019a, b).

Antioxidant compounds, normally found in functional foods, are capable of inhibiting or delaying injuries caused by free radicals (Yan et al. 2016). The reactions caused by free radicals can be compensated by the action of antioxidants obtained through the diet, including carotenoids, abundant in BBSP (Teow et al. 2007). However, regardless of method, carotenoid content and antioxidant activity may be affected by pretreatment, and little data on carotenoid retention in BBSP is currently available.

This work aims to evaluate the effects of ultrasound pretreatment on the microstructure, antioxidant activity, and carotenoid retention of BBSP.

Materials and methods

Preparation of samples

Fresh BBSP samples were acquired at a local market in João Pessoa (Brazil). These samples were harvested in 2018 by conventional culture. They were packed in boxes and transported at room temperature to the Laboratory of Food Engineering (Recife, Brazil). Those free of mechanical injuries, pests, diseases, and deterioration were selected for experimentation. The fresh roots were washed in running water to remove dirt, disinfected with a chlorine solution (150 µL/L) for 15 min, and rinsed under running water to remove excess chlorine adhered to the roots. After the sanitization phase, the fresh roots were peeled manually with the aid of a stainless steel knife. The edible portion (intermediate section of the mesocarp) was cut in 0.5 cm thick and weighed on a semi-analytical digital scale (HAUS Corporation, model AR2140, Brazil).

Ultrasonic pretreatment

The design of the pretreatment step was based on the methods of Azoubel et al. (2010). An ultrasound bath (Unique, model USC-2580A, Brazil) with a frequency of 25 kHz at the intensity of 4870 W/m² was used to pretreat the potato samples at 30 ± 2 °C. Twelve slices of fresh roots were placed in two 250 mL Erlenmeyer flasks (six per flask) with distilled water. After 10 min, the samples were removed from the conical flasks, dried with absorbent paper to remove excess water, and finally weighed in a semi-analytical balance. The pretreatment measured water loss and solid gain.

Drying

In this study, two drying groups were set, including control samples without ultrasound pretreatment (C) and variable samples with ultrasound pretreatment (US). Drying was performed using an air-circulating oven at two different temperatures (50 and 70 °C) (Azoubel et al. 2010). For each experiment, the twelve slices were spread across the drying grid. Samples were weighed on a semi-analytical scale in 15-min intervals until the condition of equilibrium (constant weight) was reached.

In order to predict the drying kinetics of melon, it is important to accurately model its drying behavior. Therefore, in the present study, semi-theoretical mathematical models were fitted to the experimental data (Table 1), where a , b , c , k , and n , are the empirical constants in drying models and t is the drying time in min. The moisture contents at each time interval were calculated from both weight loss data and the dry solid weights of the samples. The moisture content data was converted to moisture ratio (MR), which is a dimensionless expression and displayed as a function of drying time. The dimensionless MR of melon during the drying experiments was written in the following form (Eq. 1):

$$MR = \frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

where $\bar{X}$ is the average moisture content at time t , kg H₂O/kg dry matter; X_e is the equilibrium moisture content, kg H₂O/kg dry matter; X_0 is the initial moisture content, kg H₂O/kg dry matter.

The modeling was characterized by the mean relative deviation module P (Eq. 2) and the determination coefficient R^2 .

$$P(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{V_e - V_p}{V_e} \right| \cdot 100 \quad (2)$$

Table 1 Parameters, coefficients of determination (R^2) and mean square deviations (MSD) of the models fitted to the drying curves of BBSP at two drying conditions (50 and 70 °C) for the control samples without ultrasound pretreatment (C) and samples with ultrasound pretreatment (US)

Model	Parameters	50 °C		70 °C	
		C	US	C	US
Page	Equation	$RX = \exp(-Kt)$			
	a	0.0083	0.0379	0.0753	0.0464
	n	17.42	0.803	17.74	0.879
	R^2	0.2483	0.9992	0.4262	0.9999
	P	93.75	25.999	90.909	61.143
Henderson-Pabis	Equation	$RX = \exp(-Kt)$			
	a	0.8881	0.94	0.9681	0.9787
	k	0.021	0.015	0.033	0.029
	R^2	0.9499	0.9886	0.9906	0.997
	P	37.482	18.314	28.606	12.916
Logarithmic	Equation	$RX = \exp(-Kt) + c$			
	a	0.8733	0.9204	0.9468	0.9661
	c	0.066	0.0488	0.0369	0.0208
	k	0.03	0.018	0.037	0.031
	R^2	0.9715	0.9952	0.9956	0.9982
Wang and Singh	P	32.151	10.701	23.397	15.141
	Equation	$RX = 1 + at + bt^2$			
	a	0.0131	0.0106	0.0192	0.0183
	b	0.00004	0.00003	0.00009	0.00008
	R^2	0.7288	0.9049	0.8825	0.9306
Two-terms exponential	Equation	$RX = a \exp(-Kt) + b \exp(-wt)$			
	a	0.4166	0.3312	0.6257	0.8167
	b	0.5833	0.6705	0.3745	0.1834
	k	0.149	0.048	0.023	0.025
	w	0.014	0.011	0.091	0.103
	R^2	0.9999	0.9995	0.9999	0.9999
	P	16.503	24.092	23.265	31.611
Single exponential	Equation	$RX = \exp(-Kt)$			
	k	0.025	0.016	0.034	0.029
	R^2	0.9344	0.9839	0.9893	0.9965
	P	47.159	23.144	31.32	15.089

C control, US ultrasound

where N is the number of experimental data, V_e is the experimental value and V_p is the calculated value. Values of P (%) less than or equal to 10% are considered to satisfy the experimental data (Lomauro et al. 1985).

After drying, the BBSP slices were shredded (model A11B S 32, marca?). The obtained powder was standardized with 20 mesh granulometry, stored in plastic containers hermetically coated with aluminum foil, labeled, and placed in a freezer at -18 ± 1 °C for further analysis.

Ultrastructural analysis by scanning electronic microscopy (SEM)

Flours obtained at different drying temperatures were characterized by scanning electron microscopy. The flour samples were sprinkled onto pieces of double-sided tape affixed to an aluminum stub, followed by metallization (SANYU ELECTRON, SC-701A) for 3 min, with an amperage of 10 mA, for the ionic deposition of a thin layer of 5 nm of gold. Next, samples were examined under a high vacuum in a scanning electronic microscope, JEOL LV 5600, operating at 25 kV, and images were obtained in magnifications ranging from 300× to 1200×.

The extraction and quantification of the total carotenoids

The total carotenoid content was quantified based on Rodríguez-Amaya's method (1999). In brief, there was a 40-mL acetone extraction of carotenoids from a 5-g sample, followed by separation and dilution in petroleum ether, resulting in an absorbance of 475 nm. Some precautions against pigment degradation or alteration were taken, such as protection from light and high temperatures, and efficient analyses. Total carotenoids were expressed as µg per g of DM. All analyses were carried out in triplicate.

Antioxidant activity determination: DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)

The extracts were prepared according to Brand-Williams et al. (1995), with some modifications. 10 mL of methanol 80% (v/v) were added to the 1-g sample and stirred for 2 min. After 1 h in the dark at room temperature, the extract was centrifuged (2200 g, 20 °C for 20 min) and the supernatant was stored at −18 °C until the evaluations. All extractions were carried out in triplicate.

DPPH radical scavenging activity assay

The extracts obtained were used to determine antioxidant activity. The total antioxidant activity of samples was measured by the DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) radical scavenging method (Rufino et al. 2007). Each extract (0.1 mL) was mixed with 3.9 mL of DPPH methanol solution in cuvettes. The reaction mixture was shaken properly and kept for 1 h at room temperature in the dark. Methanol was used as the blank, and the control sample was prepared without adding any extract. Absorbance was measured at 515 nm in a spectrophotometer (SH-1000, Hitachi, Japan). The DPPH radical scavenging activity percentage was calculated using the following equation:

$$DPPH(\%) = \frac{AC - AS}{AC} \times 100$$

where AC: the absorbance of the control (DPPH solution without the sample), AS: the absorbance of the sample.

Statistical analysis

The results were examined using a one-way analysis of variance (ANOVA). The difference between samples was considered significant if it fell within the 95% confidence interval calculated using IMB SPSS 20 (SPSS Inc., Chicago, IL). All the experiments were conducted in triplicate.

Results and discussion

Drying temperature

Figure 1 shows the drying kinetics of BBSP at two temperatures (50 and 70 °C) for the control samples without ultrasound pretreatment (C) and for the samples with ultrasound pretreatment (US). The dehydration times for BBSP to reach equilibrium were 450 and 630 min at 50 °C, and 360 and 330 min at 70 °C for C and US, respectively. The application of pretreatment with ultrasound did not have a positive effect on BBSP drying time at 50 °C. Conversely, the untreated sample's drying time was reduced by 30 min at 70 °C. Nowacka et al. (2012) reported that ultrasound time significantly affects drying intensity. The authors verified a considerable reduction when the US was performed for 30 min. In the present study, the US pretreatment duration was 10 min, a fact that may have influenced the failure to register a significant reduction in drying time with its application.

It is also possible to note that increased air temperature reduced drying time. Similar observations have been reported for potato slices (Onwude et al. 2018). This phenomenon is due to the higher water removal rate of the product resulting from a higher moisture gradient between the product and the air caused by the increase in air temperature. In this process, drying kinetics are directly related to temperature. Increased temperature results in increased moisture transfer (Santos et al. 2017).

Drying mathematical modeling

Modeling is important to the analysis and understanding of drying. Empirical models facilitate estimations of drying times and drying curves, allowing one to estimate conditions resulting in desired final moisture content. Adjustments to the mathematical models were tested under various conditions. The parameters of the six mathematical models contrasted with the experimental data of BBSP

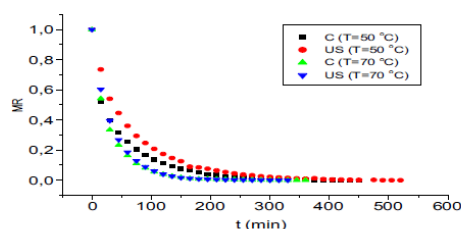


Fig. 1 BBSP at two drying conditions (50 and 70 °C) for control samples without ultrasound pretreatment (C) and samples with ultrasound pretreatment (US)

drying kinetics are presented in Table 1. The two-term exponential model produced solid R^2 values and calculated lower mean relative deviation (P). This shows the suitability of this model. A similar result was obtained by Medeiros et al. (2016) for mango and Silva et al. (2019) for mango.

In the present study, parameter k presented higher values in the control group, which implies a prolonged drying time. The application of ultrasound pretreatment resulted in lower parameter values, reinforcing the importance of ultrasound in drying time reduction. Similar results have been reported by Santos et al. (2017) in the drying of pitaya shells (*H. undatus*) at temperatures of 50, 60, and 70 °C.

Microstructure analysis

To better understand the effect of ultrasound pre-treatment at the cellular level, scanning electron microscopy (SEM) was used to observe structural changes. Typical SEM images of BBSP at two drying conditions (50 and 70 °C) for the control and ultrasound (C and US) were reported in Figs. 2 and 3.

Dehydrated samples at 50 °C showed greater agglomeration and signs of breakage or strangulation of cellular structures (Fig. 2). Structures with some cell fractures can be attributed to the rapid evaporation of moisture by

ultrasonic heating (Su et al. 2018). The application of ultrasound seems to induce a greater degradation of the structure of the sweet potato, causing an increase of porosity and pore diameter and rupture of the cellular structure. However, these effects can also make water movement in the matrix easier, improving drying rate (Onwude et al. 2018).

On the other hand, Fig. 3 at 70 °C, shows a more porous and fissured microstructure of BBSP samples in both groups (C and US). The results are similar to those presented by Lagnika et al. (2018) on the drying of the orange pulp sweet potato.

The BBSP structure porosity is justified by the rapid heating of the samples, which leads to lower water levels through evaporation and internal cellular stress and expansion and contraction caused by ultrasonic waves that dilate the intercellular space, accelerating dehydration and indicating good sample quality (Nowacka and Wedzik 2016). Also, ultrasound pre-treatment does not influence sample thickness, which also warrants rapid dehydration of the pretreated sample at 70 °C (Fig. 1).

Cellular rupture could also be attributed to the shear stresses and cavitation effects caused by extensive high-intensity ultrasound processing (Wang et al. 2019a, b).

Fig. 2 Typical SEM images of BBSP at 50 °C. Control (a, c, e) and ultrasound (b, d, f)

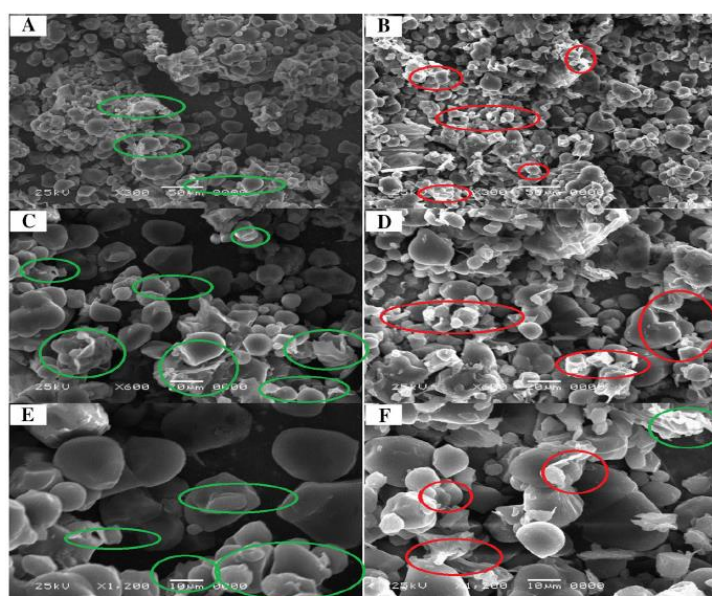
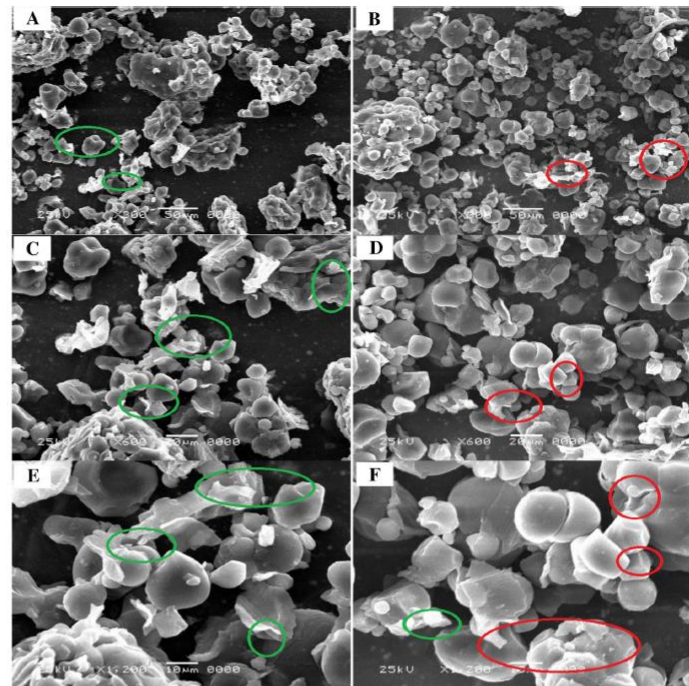


Fig. 3 Typical SEM images of BBSP at 70 °C. Control (a, c, e) and ultrasound (b, d, f)



Total carotenoid

Using the results obtained for the total carotenoid content achieved for the BBSP, Table 2 graphs the spectrophotometer readings, using wavelength as a function of the absorbance of the samples of acetone/petroleum ether solvents. It was scanned at wavelengths of 450 and 475 nm.

As shown in Table 2, there were no significant differences in the total carotenoid content between the US and C. However, Nowacka and Wedzik (2016) reported that

ultrasound pretreatment significantly reduced the total carotenoid content in carrots compared with that of the untreated samples. This may have resulted from a long processing duration (20–30 min) in their studies.

Results show that ultrasound pretreatment retained total carotenoid content. This can be attributed to the mechanical rupture of the cell walls of the food matrix, which may increase the content of free carotenoids and the preservation of carotenoid-protecting structures during ultrasound processing (Abid et al. 2014). According to Rodrigues-Amaya (1999), ultrasound preserves hydrophobic

Table 2 Total carotenoids ($\mu\text{g/g}$ of DM) and antioxidant activity (DPPH radical-scavenging activity (%)) of BBSP

	Total carotenoids ($\mu\text{g/g}$ of DM)			
	50 °C		70 °C	
	C	US	C	US
470 nm	11.752 $\pm$ 0.176 ^a	14.00 $\pm$ 0.49 ^a	13.711 $\pm$ 0.077 ^b	13.115 $\pm$ 0.776 ^b
450 nm	19.195 $\pm$ 0.244 ^a	24.238 $\pm$ 0.968 ^a	23.071 $\pm$ 0.3535 ^b	22.187 $\pm$ 0.783 ^b
%DPPH	17.72 $\pm$ 0.47 ^a	13.20 $\pm$ 0.44 ^a	31.06 $\pm$ 1.73 ^b	27.45 $\pm$ 0.16 ^b

For each temperature, the same letters on the same line mean that the US (ultrasound) and C (control) indicated no significant differences ($p < 0.05$) between the two groups (US and C)

compounds (carotenoid compounds), probably due to its increased extraction due to ultrasonic waves that reduce available oxygen for free radical formation, since the mechanism of action of carotenoids is to chelate singlet oxygen and its formation. Degradation is influenced by oxygen at high temperatures. Also, retention of carotenoids during ultrasound application may show that microchannels formed during ultrasonic waves do not allow the passage of compounds from the sample to the solvent, thereby retaining carotenoid contents.

Antioxidant activity

The results of the antioxidant activity of BBSP extracts evaluated by the DPPH free radical sequestration method are presented in Table 2.

Antioxidant activity observed according to the DPPH method (Table 2) showed a positive correlation with temperature. This fact can be attributed to several chemical reactions, such as the Maillard reaction, induced by high thermal intensity, which may lead to the emergence of new compounds with high antioxidant activities (Tian et al. 2016).

Ultrasound pretreatment at 70 °C showed no significant difference ($p > 0.05$) from the control group. According to Wang et al. (2017), these results suggest that ultrasonic wave changes that lead to increased solubility do not always lead to improved antioxidant activity. Sledz et al. (2015) investigated the influence of ultrasound on drying kinetics, antioxidant activity, and microstructure of basil leaves and concluded that pretreatment with ultrasound does not alter antioxidant activity.

On the other hand, according to Table 2, the application of ultrasound did not influence the antioxidant potential determined by the DPPH method, indicating that the antioxidant compounds that perform via free radical capture mechanism were retained by using ultrasound.

Conclusion

The application of ultrasound pretreatment did not compromise the dehydration of BBSP. Among the mathematical models used in this study, two-terms exponential presented the most accurate predictions. Ultrasound pretreatment and increased temperature reduced drying time. The ultrasound treatment effected greater agglomeration, breakage, or strangulation of the BBSP structure, increasing porosity, and thus shortening drying rates. Drying caused a diminution of total carotenoid content and influenced antioxidant activity. However, the samples pretreated with ultrasound and then dried obtained lower total carotenoid loss.

Acknowledgements The authors acknowledge, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES (process n° CAPES/PROEX 1734/2015) and Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação da Universidade Federal de Pernambuco-PROPESQ/UFPE (process n° 23076.049914/2017-47) for financial support and research grant. The Laboratório de Experimentação e Análises de Alimentos do Departamento de Nutrição da Universidade Federal de Pernambuco-LEAAL/UFPE, the Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste-CETENE for the availability of infrastructure. The authors were also grateful to Nucleus of Research in Environmental Sciences and Biotechnology, Catholic University of Pernambuco, by the SEM analysis.

References

- Abid M, Jabbar S, Wu T, Hashim MM, Hu B, Lei S, Zeng X (2014) Sonication enhances polyphenolic compounds, sugars, carotenoids and mineral elements of apple juice. *Ultrason Sonochem* 21:93–97
- Azoubel PM, Baima MAM, Amorim MR, Oliveira SSB (2010) Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. *J Food Eng* 97:194–198
- Berni P, Chitchumroonchokchai C, Canniatti-brazaca SG, de Moura FF, Failla ML (2015) Comparison of content and in vitro bioaccessibility of provitamin A carotenoids in home cooked and commercially processed orange fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam). *Plant Foods Hum Nutr* 70:1–8
- Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C (1995) Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensm-Wiss u-Technol* 28:25–30
- Guo Z, Zhao B, Huang LH, Miao S, Zheng B (2019) Optimization of ultrasound-microwave synergistic extraction of prebiotic oligosaccharides from sweet potatoes (*Ipomoea batatas* L.). *Innov Food Sci Emerg Technol* 1:5. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.03.009>
- Islam SN, Nusrat T, Begum P, Ahsan M (2016) Carotenoids and b-carotene in orange fleshed sweet potato: a possible solution to vitamin A deficiency. *Food Chem* 15:628–631
- Lagnika C, Huang J, Ning J, Li D, Liu C, Song J, Wei Q, Zhang M (2018) Ultrasound-assisted osmotic process on quality of microwave vacuum drying sweet potato. *Drying Technol Int J*. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1402786>
- Lomauro CJ, Bakshi AS, Labuza TP (1985) Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: fruit, vegetable and meat products. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technol* 18:112–122
- Medeiros RAB, Barros ZMP, Carvalho CBO, Fraga Neta EG, Maciel MIS, Azoubel PM (2016) Influence of dual-stage sugar substitution pretreatment on drying kinetics and quality parameters of mango. *LWT Food Sci Technol* 67:167–173
- Nowacka M, Wedzik M (2016) Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue. *Appl Acoust* 103:163–171
- Nowacka M, Wiktor A, Sledz M, Jurek N, Witrowa-rajchert D (2012) Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *J Food Eng* 113:427–433
- Onal B, Adiletta G, Crescitelli A, Di Matteo M, Russo P (2019) Optimization of hot air drying temperature combined with pretreatment to improve physico-chemical and nutritional quality of 'Annurca' apple. *Food Bioprod Process* 115:87–99. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.03.002>
- Onwude DI, Norhashila H, Khalina A, Rimfiel J, Guangnan C (2018) Investigating the influence of novel drying methods on sweet

- potato (*Ipomoea batatas* L.): kinetics, energy consumption, color, and microstructure. *J Food Process Eng* 41:1–12
- Rodriguez-Amaya DB (1999) A guide to carotenoid analysis in foods. ILSI Press: Scott, J., Rebeille, F., Fletcher, J. Folic acid and folates—the feasibility for nutritional enhancement in plant foods. *J Sci Food Agric* 6:56–67
- Rufino MSM, Alves RE, Brito ES, Moraes SM, Sampaio CG, Jiménez JP, Saura-Calixto FD (2007) Metodologia Científica: Determinação da Atividade Antioxidante Total em Frutas pela Captura do Radical Livre DPPH e pela Captura do Radical Livre ABTS +. Comunicado técnico 128, ISSN 1679-6535. Embrapa Agroindústria Tropical
- Santos FS, de Figueirêdo RMF, Alexandre J, Santos D (2017) Drying kinetics and physical and chemical characterization of white-fleshed 'pitaya' peels. *R Bras Eng Agríc Ambiental* 21:872–877
- Santos EA, de Andrade Júnior VC, de Sousa Júnior AS, Okumura F, Simeone MLF, dos Santos JB, Azevedo AM (2018) Mistico selectivity of pre-emergent herbicides in sweet potato genotypes. *Rev Bras Cienc Agrar* 13:5511
- Silva HW, Vale LSR, Silva CF, Souza RC, Soares RS (2019) Drying kinetics and physiological quality of 'Cabacinha' pepper seeds during storage. *R Bras Eng Agríc Ambiental* 22:292–297
- Sledz M, Wiktor A, Nowacka M, Witrowa-Rajchert D (2015) Drying kinetics, microstructure and antioxidant properties of basil treated by ultrasound. *J Food Process Eng* 1–13:1745–4530. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12271>
- Su Y, Zhanga M, Bhandarid B, Zhang W (2018) Enhancement of water removing and the quality of fried purple-fleshed sweet potato in the vacuum frying by combined power ultrasound and microwave technology. *Ultrason Sonochem* 44:368–379
- Teow CC, Truong VD, Mcfeeters RF, Thompson RL, Pecota KV, Yencho GC (2007) Antioxidant activities, phenolic and β -carotene contents of sweet potato genotypes with varying flesh colours. *Food Chem* 103:829–838
- Tian J, Chen J, Chen S, Chen J, Liu D, Ye X (2016) Domestic cooking methods affect the phytochemical composition and antioxidant activity of purple-fleshed potatoes. *Food Chem* 97:1264–1270
- Vizzotto M, Pereira ES, Vinholes JR, Munhoz PC, Ferri NML, Castro LAS, Krolow ACR (2017) Physicochemical and antioxidant capacity analysis of colored sweet potato genotypes: in natura and thermally processed. *Ciência Rural* 47:1–8
- Wang Q, Sheng X, Shi A, Hu H, Yang Y, Liu L, Fei L, Liu H (2017) β -Glucans: relationships between modification, conformation and functional activities. *Molecules* 22:1–12
- Wang J, Xiao HW, Ye JH, Wang J, Raghavan V (2019a) Ultrasound pretreatment to enhance drying kinetics of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) slices: pros and cons. *Food Bioprocess Technol* 12(5):865–876
- Wang J, Wang J, Ye J, Vanga SK, Raghavan V (2019b) Influence of high-intensity ultrasound on bioactive compounds of strawberry juice: profiles of ascorbic acid, phenolics, antioxidant activity and microstructure. *Food Control* 96:128–136
- Yan B, Lu MS, Wang L, Mo XF, Luo WP, Du YF, Zhang CX (2016) Specific serum carotenoids are inversely associated with breast cancer risk among Chinese women: a case-control study. *Br J Nutr* 115:129–137

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.