



Cinética de Secagem da Beterraba por Infravermelho e Pré-Tratamento com Ácido Cítrico

Infrared Drying Kinetics of Beetroot and Citric Acid Pretreatment

Ellyson Sergio de Paula Alves

Williams Apolo Santos Albuquerque

Jennyfer da Costa de Sousa

Yonny Romaguera Barcelay

Vinicius Venturini Santos

Bruno Sameer da Silva Sousa

Luan Vinícius Neves de Souza

Lucas Bandeira Silva

Walyson Kennedy Lins da Silva

Lucas Tomaz Vila Nova

Resumo: A secagem é uma operação unitária muito utilizada pela indústria alimentícia para remoção de água, com o intuito de preservar o alimento. A utilização de pré-tratamentos em conjunto às técnicas de secagem tem sido cada vez maior, pois diminuem o tempo do processo, reduzindo custos e minimizando as alterações na qualidade do alimento. A beterraba é um tubérculo rico em ferro e açúcar, principalmente, e também em outros compostos, como cálcio, magnésio, proteína e diversas vitaminas. Entretanto, apresenta um alto teor de umidade e é bastante perecível. Assim, o aumento do seu tempo de preservação é necessário. Este trabalho teve como objetivo o estudo da cinética da secagem por infravermelho (IV) da beterraba com pré-tratamento de ácido cítrico, além de avaliar a influência do processo no tempo de secagem e na cor das amostras. As amostras foram submetidas a secagem IV na temperatura de 60 °C, sendo avaliada a distância entre a fonte IV e as amostras de beterraba (10 e 30 cm). Para o ajuste dos dados experimentais de secagem, foram utilizados três modelos empíricos (Exponencial de Dois Termos, Logaritmo e Page). As configurações com menor distanciamento da fonte IV (10 cm) obtiveram menores tempo de secagem. Em relação ao pré-tratamento, o mesmo afetou de maneiras distintas a secagem, a depender do distanciamento de 30 ou 10 cm. Com relação aos tempos de pré-tratamento testados (10 e 30 min), o aumento do tempo resultou em maiores tempos de secagem em ambos os distanciamentos. Dos modelos empíricos testados, se ajustaram bem aos dados experimentais da cinética da secagem, o modelo de Page e o modelo logarítmico, para os distanciamentos de 10 cm e 30 cm, respectivamente. Também foi avaliada a influência da secagem na cor da beterraba. As amostras que passaram pelo pré-tratamento tiveram melhor preservação de cor, principalmente quando o menor distanciamento da fonte IV foi utilizado. Os resultados apontam que o pré-tratamento e a secagem IV podem influenciar positivamente na redução do tempo de secagem, consequentemente nos custos energéticos, e na preservação da cor da beterraba.

Palavras-chave: *Beta vulgaris* L.; secagem infravermelho; conservação de alimentos; pré-tratamento; análise de cor.

Abstract: Drying is a unitary operation widely used by the food industry to remove water, in order to preserve the food. The use of pretreatments together with drying techniques has been increasing, as they reduce process time, reducing costs and minimizing changes in food quality. Beetroot is a tuber rich in iron and sugar, mainly, and also in other compounds, such as calcium, magnesium, protein and various vitamins. However, it has a high moisture content and is quite perishable. Therefore, increasing its preservation time is necessary. This work aimed to study the kinetics of infrared (IR) drying of beetroot with citric acid pretreatment, in addition to evaluating the influence of the process on the drying time and color of the samples. The samples were subjected to IR drying at a temperature of 60 °C, and the distance between the IR source and the beet samples (10 and 30 cm) was evaluated. To adjust the experimental drying data, three empirical models were used (Two-Term Exponential, Logarithmic and Page). Configurations with a smaller distance to the IR source (10 cm) had shorter drying times. Regarding pretreatment, it affected drying in different ways, depending on the distance used. Regarding the pretreatment times tested (10 and 30 min), increasing the time resulted in longer drying periods at both distances. Of the empirical models tested, the Page model and the Logarithmic model fit well with the experimental data on drying kinetics, for distances of 10 cm and 30 cm, respectively. The influence of drying on the color of beetroot was also evaluated. The samples that underwent pretreatment had better color preservation, mainly when the smallest distance from the IR source was used. The results indicate that pretreatment and IR drying can positively influence the reduction of drying time, consequently energy costs, and the preservation of beet color.

Keywords: Beta vulgaris L; infrared drying; food preservation; pre-treatment; color analysis.

INTRODUÇÃO

A beterraba (*Beta vulgaris* L.) é cultivada mundialmente, com produção de 257,49 milhões de toneladas em 2018, destacando-se a Rússia como principal produtora (Chhikara *et al.*, 2019). No Brasil, em 2017, a produção foi de 134.969 toneladas, concentrada nos estados da Bahia, Minas Gerais, Goiás, São Paulo e Paraná, que respondem por 87% do total (IBGE, 2017). Rica em nutrientes benéficos à saúde, a beterraba contém antioxidantes (fenólicos, antocianinas) e minerais (sódio, cálcio, potássio), importantes para processos biológicos do organismo (Paciulli *et al.*, 2016).

Seu consumo ocorre de várias formas, in natura, em conserva ou como farinha e, embora a raiz seja a principal parte consumida, as folhas também são comestíveis. Contudo, sua alta perecibilidade é um desafio. A secagem convectiva, baseada no uso de ar quente para remover água e prolongar a vida útil, é uma alternativa amplamente empregada (Moses *et al.*, 2014), devido à simplicidade e facilidade operacional dos equipamentos (Wang *et al.*, 2019). Apesar disso, essa técnica enfrenta limitações como alto consumo de energia e longos tempos de processo.

Para superar essas limitações, estudam-se pré-tratamentos como desidratação osmótica, ultrassom e imersão em solução alcoólica. A desidratação osmótica, amplamente usada, baseia-se na osmose: a água migra do interior do vegetal para a solução hipertônica devido à diferença de pressão osmótica (Silva *et*

al., 2012). Outra técnica é a secagem por radiação infravermelha (IV), que promove aquecimento por transferência de calor da fonte para a superfície do alimento, reduzindo tempo e custos de secagem.

Diante disso, a pesquisa tem como objetivo principal avaliar o efeito do pré-tratamento com ácido cítrico e da distância da fonte de IV na secagem da beterraba. Os objetivos específicos são: a) Estudar a cinética de secagem da beterraba com e sem pré-tratamento osmótico; b) Avaliar a influência do pré-tratamento e da distância da fonte de IV no tempo de secagem e na cor das amostras.

ESTADO DA ARTE/REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Beterraba

A beterraba (*Beta vulgaris* L.) é originária das regiões de clima temperado da Europa e do Norte da África. É um alimento produzido em larga escala no Brasil, sendo um alimento extremamente nutritivo. A produção nacional foi de cerca de 134.969 toneladas (IBGE, 2017), sendo os principais produtores os estados da Bahia, Minas Gerais, Goiás, São Paulo e Paraná, os quais representam cerca de 87% do que foi produzido no país. Ao ser mantida em temperatura de refrigeração na geladeira, pode durar por até 15 dias, embalada em saco de plástico perfurado. Quando guardadas já descascadas, raladas ou picadas, sua durabilidade é reduzida a 3 ou 4 dias, devendo, obrigatoriamente, ser conservadas em geladeira, dentro de saco ou vasilha de plástico (EMBRAPA, 2017).

Figura 1-Informação nutricional da beterraba (*Beta vulgaris* L.).

INFORMAÇÃO NUTRICIONAL		
Porção 100g		
BETERRABA	Quantidade por porção	% VD (*)
Valor energético	49 kcal = 204 KJ	2
Carboidratos	11,1g	4
Proteínas	1,9g	3
Gorduras totais	0,1g	0
Gorduras saturadas	0	0
Gorduras <i>trans</i>	0	**
Fibra Alimentar	3,4g	14
Sódio	10mg	0
Manganês	1,23mg	53
Magnésio	24mg	9
Cobre	0,08mg	9
Potássio	375mg	8
Zinco	0,5mg	7
Vitamina C	3,1mg	7

Fonte: JJ Alimentos, 2023.

Observando-se a figura 2 a beterraba tem em sua composição uma série de compostos que são de grande interesse alimentício como, fibra alimentar, cálcio, magnésio, proteína e diversas vitaminas, tais como vitaminas C, K e E e os minerais ferro, potássio e zinco (Chhikara *et al.*, 2019), pode-se ver o valor nutricional da beterraba, por apresentar compostos como potássio (auxilia na contração muscular do corpo), manganês (formação óssea e metabolismo de aminoácidos), carboidratos (energia).

As betalainas são compostos importantes presentes nesta raiz, pois possuem efeito antioxidante e anti-inflamatório. São compostos nitrogenados, responsáveis por dar a cor marcante presente nas beterrabas, o vermelho-arroxeados. Estes compostos são utilizados nos dias atuais como pigmentos naturais para diversos alimentos (Zielinska-Przyjemska *et al.*, 2012). Entretanto, mesmo com sua série de benefícios, o vegetal é bastante perecível, assim, torna-se necessário a aplicação de métodos para sua conservação por maiores períodos.

Secagem

A secagem é uma operação unitária bastante utilizada na indústria química e alimentícia, tendo como objetivo básico a remoção de água de um determinado material. Com isso, pode-se prevenir ou reduzir o crescimento microbiano. É uma operação que envolve transferência de massa e calor simultaneamente, em que a água do material começa a evaporar devido ao calor fornecido pelo meio

de aquecimento, que recebe o vapor de água removido, diminuindo, assim, o teor de umidade e a atividade de água no produto em questão, contribuindo para a sua conservação (Perez *et al.*, 2003).

Os modelos teóricos, utilizam os fundamentos da matemática da difusão e da transferência de calor e massa, se baseiam na segunda Lei de Fick, que expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (Martinazzo *et al.*, 2007). Os métodos empíricos consistem em formar grupos físicos adimensionais que podem ser facilmente investigados por experimentos de laboratório e baseia-se nas condições externas, como temperatura, razão da mistura e velocidade do ar de secagem. Embora bons para descrever as curvas de secagem, eles negligenciam os fundamentos do processo de secagem e seus parâmetros, como o transporte de energia e de água no interior dos produtos testados. Os modelos semi-empíricos relacionam modelos empíricos com argumentos baseados em fundamentos de transferência de massa visto nos modelos teóricos (Martinazzo *et al.*, 2007).

Os modelos empíricos escolhidos foram selecionados por se adequarem bem ao caráter exponencial das curvas de secagem, como visto por Henderson e Pabis (1961). Os modelos empíricos de camada fina, negligenciam os fundamentos termodinâmicos dos processos de secagem, por tratar a amostra como um material com dimensões desprezíveis, o que permite considerar o teor de água e a temperatura constante. Exemplos de modelos utilizados são mostrados na tabela 1.

Tabela 1-Modelos empíricos utilizados no processo de secagem.

Modelo	Equação	Referências
Henderson e Pabis	$ADM = a \exp(-kt)$	Henderson e Pabis (1961)
Logarítmico	$ADM = a \exp(-kt) + c$	Togrul e Pehlivan (2002)
Exponencial dois termos	$ADM = a \exp(-kt) + b \exp(-wt)$	Ozdemir e Devres (1999)
Lewis	$ADM = \exp(-kt)$	Bruce (1985)
Page	$ADM = \exp(-ktn)$	Page (1949)

Onde: ADM é o adimensional de umidade, t é o tempo de processamento (s); a, b, c, k, n e w são constantes dos modelos.

$$ADM = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} (1)$$

Onde: X_t = umidade média no tempo t (kg água/kg massa seca); X_e = umidade de equilíbrio (kg água/kg massa seca); X_0 = umidade inicial da amostra (kg água/kg massa seca)

Secagem por infravermelho

A transferência de calor é o movimento de energia térmica que ocorre devido a diferenças de temperatura e pode acontecer por três mecanismos principais: condução, convecção e radiação. A condução ocorre quando há contato direto entre substâncias ou objetos, sendo a energia transmitida por colisões entre

átomos e moléculas, do local mais quente para o mais frio. Na convecção, o calor é transferido dentro de um fluido (líquido ou gás) por meio do movimento das próprias partículas, combinando o transporte molecular e o movimento global do fluido. Já a radiação térmica é a emissão de energia sob forma de ondas eletromagnéticas, podendo ocorrer mesmo no vácuo, diferentemente da condução e da convecção, que dependem de um meio material (INCROPERA, 2008).

A radiação apresenta vantagens significativas sobre os demais modos de transferência de calor, como maior eficiência térmica, menor tempo de processo e redução no custo energético (Jun *et al.*, 2011). A secagem por radiação infravermelha (IV), por exemplo, é mais eficiente que a secagem convectiva com ar quente, pois transfere energia diretamente da fonte para a superfície do alimento, reduzindo perdas e dispensando o aquecimento do ar ambiente. Nessa técnica, a radiação penetra o produto, interage com sua estrutura e se converte em calor, aquecendo o material de forma rápida e uniforme. A profundidade de penetração da radiação depende tanto das propriedades do material quanto do comprimento de onda emitido (Baptestini *et al.*, 2016).

Diversos estudos demonstram o potencial da secagem infravermelha em diferentes produtos. Huang *et al.* (2021), ao aplicarem a técnica em folhas de *Stevia rebaudiana*, verificaram que o aumento da temperatura e a redução da distância de irradiação elevaram significativamente a taxa de secagem e favoreceram a preservação dos glicosídeos. Okeyo *et al.* (2017) observaram resultados semelhantes ao aplicarem infravermelho no arroz recém-colhido, constatando maior eficiência na remoção de umidade sem comprometer as qualidades sensoriais e de moagem, exceto em exposições excessivamente longas. Já Boateng, Yang e Li (2021) analisaram o processo em sementes frescas de *Ginkgo biloba* e concluíram que a secagem IV reduziu substâncias tóxicas, como a ginkgotoxina e o ácido ginkgólico, a níveis seguros, mantendo a qualidade e a bioatividade do produto.

Pré-Tratamento

A desidratação osmótica foi primeiramente desenvolvida como uma técnica de pré-tratamento para secagem por Ponting *et al.* (1966). Atualmente, é utilizada como um pré-tratamento também do congelamento, liofilização, entre outros, com a finalidade de reduzir gastos energéticos e manter qualidade do produto alimentício. A técnica consiste na imersão do alimento em uma solução hipertônica (osmótica) que tem baixa atividade de água e alta pressão osmótica.

A transferência de massa na desidratação osmótica é limitada por alguns fatores: resistência aumentando com alta viscosidade da solução osmótica e baixa diferença de densidade entre o sólido e as soluções (Rastogi *et al.* 1997). Sacarose e cloreto de sódio (NaCl) são os agentes osmóticos mais comumente usados. Porém, nos dias atuais, novos compostos têm sido utilizados, como o ácido cítrico. Esses compostos têm uma série de vantagens, pois os tratamentos com ácidos orgânicos, por exemplo, podem aumentar a permeabilidade da membrana celular e a difusividade de água na mesma. Elevação das taxas de secagem podem ser observadas, pois, em condições ácidas, a pectina de frutas e vegetais pode se

solubiliza-se e auxilia na remoção de água, como visto no estudo de secagem de ameixas utilizando pré-tratamentos de ácido cítrico e ascórbico (Brar *et al.*, 2020).

O ácido cítrico vem sendo utilizado como pré-tratamento na secagem de frutas e hortaliças por trazer certas vantagens. Doymaz (2009) utilizou o ácido cítrico como pré-tratamento, avaliando a qualidade e vantagens na secagem de maçãs. Em seu trabalho, as frutas foram submetidas ao tratamento com ácido cítrico a 4% por um tempo de 3 minutos, a temperatura ambiente e, também, ao branqueamento com água quente a 80 °C por 3 minutos. Observou-se que o tempo de secagem foi de 360 e 300 minutos, para as amostras submetidas ao branqueamento e ao ácido cítrico, respectivamente, mostrando assim a eficácia da utilização desse método como um pré-tratamento.

Souza *et al.* (2011) realizaram um estudo de secagem convectiva de jaca, utilizando ácido cítrico (0,25%) e açúcar (40%) no pré-tratamento osmótico, a jaca desidratada apresentou boa aceitação no teste sensorial. Como parte da água foi removida por osmose, alguns ácidos presentes na fruta puderam ser removidos junto com a água, produzindo dessa forma, um fruto com sabor mais suave e mais doce.

Doymaz (2012) realizou pré-tratamento de batata doce com solução de ácido cítrico a 20 °C por um período de 3 minutos e branqueamento com água quente a 80 °C por 3 minutos. A secagem foi realizada a uma temperatura de 65 °C com velocidade do ar de 2,0 m/s até a amostra atingir peso constante. O comportamento da secagem foi avaliado utilizando dez diferentes modelos matemáticos e o melhor modelo foi escolhido estatisticamente. As amostras pré-tratadas com ácido cítrico apresentaram o menor tempo de secagem quando comparadas às amostras controle e branqueadas, obtendo uma redução de 34,4% e 19,2% respectivamente. Os modelos matemáticos de Henderson e Pabis, Exponencial de Dois Termos e Logarítmico apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais. A difusividade efetiva do tratamento com ácido cítrico também foi maior. Parâmetros de cor e reidratação também apresentaram bons resultados com ácido cítrico.

Secagem

A secagem foi realizada em um secador por infravermelho (IV). O equipamento é constituído por um tambor de ferro isolado termicamente, o qual é aquecido internamente com 3 lâmpadas de infravermelho de 250 W cada. Foi avaliada a distância entre as lâmpadas e as amostras de 10 e 30 cm, estas distâncias escolhidas após ensaios prévios. O distanciamento de 30 cm foi o máximo possível a ser utilizado pela configuração do equipamento. Variou-se a distância de 10 em 10 cm, entretanto, notou-se que o distanciamento de 20 cm não apresentava diferença significativa quando comparado com o distanciamento de 30 cm.

A secagem foi realizada na temperatura de 60 °C, previamente ajustada por um termostato. As amostras foram pesadas em intervalos de tempo de 15 min, com a utilização de uma balança semi-analítica, até que o equilíbrio dinâmico fosse atingido.

Os estudos cinéticos foram feitos com a utilização dos dados adimensional de umidade em função do tempo de secagem. O teor de umidade em cada intervalo de tempo foi calculado a partir dos dados de pesagem e da massa seca das amostras. Os dados do teor de umidade foram convertidos na razão de umidade adimensionalizada (ADM), que é uma expressão adimensional ajustada em função do tempo de secagem (Equação 1).

Os três modelos utilizados para ajuste aos dados experimentais foram Page (Pg), Exponencial Dois Termos (TT) e Logaritmo (Log) (Tabela 1) Para a verificação dos ajustes foi calculado o erro médio relativo (E), que é definido como a diferença relativa entre os valores experimentais e preditos (Equação 2), sendo considerado preditivo o modelo que apresentar valores de E menores que 10% (Lomauro *et al.*, 1985).

$$E(\%) = \frac{100}{N} \sum_{n=1}^N \frac{M_P - M_e}{M_P} \quad (2)$$

Onde: M_P : valores preditos pelo modelo; M_e : valores obtidos experimentalmente; N : número de pontos experimentais.

Avaliação do Efeito do Processo Sobre a Cor

A cor das amostras foi avaliada em sextuplicata através do sistema de leitura de três parâmetros, CIELAB. Para a determinação dos parâmetros L^* (luminosidade), a^* (intensidades das cores vermelha-valor positivo, e verde-valor negativo) e b^* (intensidades das cores amarela-valor positivo, e azul-valor negativo), utilizou-se um espectrofotômetro portátil CM 600D. O aparelho foi previamente calibrado utilizando padrões de cor fornecidos pelo fabricante.

Através destes parâmetros, foi calculada a diferença média de cor (ΔE^*) entre as amostras com e sem pré-tratamento, segundo a equação abaixo:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (3)$$

Onde: L^* e L_0^* = luminosidade das amostras secas e *in natura*, respectivamente; a^* e a_0^* = são as intensidades das cores vermelha (valor positivo) e verde (valor negativo) das amostras secas e *in natura*, respectivamente; b^* e b_0^* = são as intensidades das cores amarela (valor positivo) e azul (valor negativo) das amostras secas e *in natura*, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Cinética de Secagem

O teor de umidade médio das amostras *in natura* de beterraba foi de 91,32% em base úmida (10,81 g de água/g de matéria seca). Após as etapas de pré-tratamento, os valores do teores de umidade foram de 92,29% (12,19 g de água/ g de matéria

seca) e 91,30 % (10,49 g de água/g de matéria seca) para as amostras pré-tratadas por 10 e 30 min, respectivamente.

Observando as curvas de secagem, o ensaio que mais demorou a atingir o peso constante (equilíbrio) foi o das beterrabas sem pré-tratamento com o distanciamento de 30 cm da fonte IV, sendo necessários 435 min. O menor tempo para atingir o peso constante (180 min) foi o da amostra sem pré-tratamento com distanciamento de 10 cm das lâmpadas IV para a amostra. Observa-se, portanto, que a distância que está relacionada a incidência de radiação IV no alimento é um importante parâmetro com influência no tempo de secagem.

As amostras com 10 cm de distanciamento tiveram um tempo menor de secagem para atingirem o equilíbrio, quando comparadas com os respectivos ensaios com distanciamento de 30 cm, com uma redução percentual aproximada de 58% entre os dois distanciamentos, uma diferença bastante significativa. Resultados semelhantes foram reportados por Huang *et al.* (2021), que estudaram a técnica secagem com IV em folhas de *Stevia rebaudiana*, em seu estudo obtiveram dados de que a taxa de secagem aumenta significativamente com a diminuição da altura de irradiação IV, isso acontece pois a potência incidida é inversamente proporcional ao quadrado da distância (lei do inverso do quadrado).

Em relação às amostras submetidas ao pré-tratamento osmótico, verificou-se redução no tempo de secagem em relação a amostra sem pré-tratamento apenas quando o distanciamento da fonte IV foi de 30 cm. A desidratação osmótica utilizando ácido cítrico pode afetar diretamente a pectina presente na parede celular da beterraba (Hiranvarachat, *et al.*, 2011). Quando a parede celular amolece, há uma maior remoção de água, resultando em taxas de redução de umidade mais elevadas (Hiranvarachat *et al.*, 2011). Assim, esses resultados podem ser atribuídos ao fato que o ácido cítrico favorece o aumento da permeabilidade da célula ocasionando um aumento da difusividade de água (Doymaz, 2013). Por outro lado, observou-se que quanto maior o tempo de pré-tratamento, mais demorado foi para atingir o equilíbrio dinâmico da secagem. Tal fato pode ter ocorrido devido a uma maior incorporação de sólidos, dificultando a remoção de água durante a secagem.

Alguns trabalhos que estudaram a influência do infravermelho na secagem são encontrados na literatura, como o de Okeyo *et al.* (2017) e de Boateng, Yang e Li (2021), nas secagens de arroz e das sementes frescas de Ginkgo biloba, respectivamente. Os autores reportaram que uso do IV resultou na diminuição tempo de secagem. Estes estudos utilizam fontes de IV fixas variando a potência das lâmpadas ou tempo de exposição do alimento.

A modelação matemática tem como finalidade descrever a cinética de secagem. Pode ser feita utilizando modelos empíricos, de forma a descrever da melhor maneira o comportamento da secagem. Os modelos empíricos de camada fina foram utilizados no ajuste dos dados experimentais obtidos nas cinéticas de secagem foram Page (Pg), Exponencial Dois Termos (TT) e Logaritmo (Log). os parâmetros dos modelos são o coeficiente de determinação(R^2) e erro médio relativo (E).

O modelo com melhor ajuste aos dados experimentais de secagem com distanciamento de 10 cm da fonte IV, foi o de Page, tendo um erro relativo (E) menor que 10% em todos os ensaios com este distanciamento, exceto por ADM10cm30min, em que o modelo Logaritmo teve o melhor ajuste. No caso das secagens com distância da fonte IV de 30 cm, o modelo Logaritmo se adequou melhor, apresentando os menores erros, porém seus valores de E% foram um pouco acima de 10%, estando numa faixa de 11 a 16%. Os erros relativos (E) relacionados ao modelo Exponencial de Dois Termos foram os maiores, demonstrando não ser adequado para descrever a cinética da secagem IV da beterraba.

O modelo empírico de Page obteve bons ajustes em outras pesquisas de modelagem matemática da cinética de secagem, como reportado por Khampakool *et al.* (2019) e Hawa *et al.* (2021), na liofilização assistida por infravermelho na produção de chips de banana e a secagem solar e convecção forçada da fruta cabya, respectivamente. O bom desempenho do modelo logaritmo pode ser visto nos estudos de secagem de Oliveira *et al.* (2015) e Silva (2018) com morango e coentro em estufa utilizando a luz solar, respectivamente.

No caso do presente estudo, a partir da modelagem da cinética, verificou-se que o modelo de Logaritmo se adequou melhor as curvas que tem maior tempo de secagem. Já o modelo de Page se adequou melhor para as curvas com menor tempo de secagem. Como um importante parâmetro que influencia o tempo de secagem é o distanciamento, observa-se uma relação clara entre o distanciamento e a otimização de determinado modelo.

Análise de Cor

Segundo a análise feita por Onwude *et al.* (2019), a cor é um dos mais importantes atributos para poder se julgar a qualidade e a aparência de alimento, influenciando bastante na decisão do consumidor.

Observa-se, um aumento do parâmetro L^* após a secagem. Esse parâmetro está relacionado a luminosidade do alimento e, quanto maior, mais esbranquiçado o material. O aumento de L^* pode ser justificado pela perda de pigmentos no processo de secagem. De França (2021) estudou a secagem da beterraba e sua influência na qualidade do alimento, constatando que a betalaína presente no vegetal tem maior taxa de deterioração pelo aumento da temperatura e tempo de secagem, se tratando de um composto termossensível. Vilhalva *et al.* (2012), em seu estudo sobre a secagem convectiva da casca de mandioca, observaram uma tendência ao clareamento do material, com o aumento de temperatura do ar até 60 °C, e em seguida, uma ligeira tendência de redução de L^* .

A utilização de IV na secagem pode ter influenciado no clareamento das amostras secas, assim como observado na secagem IV de sementes de melancia realizada por Oliveira (2019). nas temperaturas de secagem de 45, 65 e 85 °C. Resultados semelhantes também foram obtidos por Graciola (2022) na secagem de beterraba pré-tratada. A eficácia do pré-tratamento de ácido cítrico para conservação de pigmentos foi relatada por Sakooei-Vayghan (2020), ao verificar os efeitos da

desidratação osmótica (com e sem ultrassom) e pré-tratamentos de revestimento à base de pectina, nas propriedades funcionais e na cor de cubos de damasco secos. No presente estudo com a beterraba, o ensaio com maior valor de L^* é o das amostras sem pré-tratamento e que tem o maior tempo de secagem (ADM30 cm).

O parâmetro a^* está relacionado ao verde e vermelho. A beterraba é um alimento rico em uma substância que dá a coloração vermelha, a betalaína, que é até utilizada como corante natural. Do ponto de vista estrutural, este composto pode ser dividido em betacianinas, que apresentam coloração vermelha/violeta, e as betaxantinas, amarelas/alaranjadas. A coloração é bastante afetada pelos métodos da secagem convectiva, pois os pigmentos são termossensíveis (Chandran *et al.*, 2014). Segundo estudo feito por De França (2021), no início da secagem há uma rápida deterioração das betacianinas presentes nas camadas mais externas, o que afeta diretamente a coloração do produto. Entretanto, a utilização de pré-tratamentos minimizou os danos a pigmentação vermelha, principalmente quando foram realizados no tempo de 10 min. O aumento no tempo de pré-tratamento diminui a preservação do pigmento vermelho da beterraba pois a solução de ácido cítrico também retira pigmentos da mesma, quanto mais tempo em solução mais compostos da beterraba vão para a solução osmótica, o aumento de tempo de secagem provocado pelo ganho de sólidos advindos do pré-tratamento, é relatado no estudo feito por Sakooei-Vayghan (2020) e também influência negativamente na preservação das betacianinas.

Em relação ao parâmetro b^* , nota-se um decaimento geral no valor. Esse parâmetro está relacionado com as cores azul e amarelo. Na beterraba, a coloração amarelada é dada pela substância betaxantina. Segundo Kluge *et al.* (2016), as betaxantinas são mais resistentes a altas temperaturas que as betalaínas, porém reagem com ácidos, o que pode explicar o decréscimo de b^* quando as amostras foram pré-tratadas. As betaxantinas estão presentes em menor quantidade nas beterrabas, no geral o conteúdo de betacianinas supera em duas vezes o conteúdo de betaxantinas neste vegetal (Sawicki *et al.*, 2019).

Diferenças de cor (ΔE) maiores que 5 são significativas e podem ser reconhecidas, mesmo por observadores inexperientes (Wang *et al.*, 2021). Todos os ensaios tiveram uma variação perceptível em sua cor. Os ensaios sem pré-tratamento apresentam os maiores valores de ΔE . A maioria das substâncias da beterraba são termossensíveis e o pré-tratamento contribuiu na sua conservação quando a secagem foi realizada. Os ensaios com tempo de 10 minutos de desidratação osmótica apresentam menor perda de coloração, comparados com os ensaios com 30 minutos. Outra variável importante é o distanciamento da fonte IV, sendo que o distanciamento de 10 cm preservou melhor a cor do alimento. Ainda, o tempo de secagem também está diretamente ligado aos resultados obtidos, em todos os parâmetros. No caso do distanciamento de 30 cm, o tempo de secagem é o maior observado, resultando em amostras com maior diferença de cor. Resultados semelhantes foram verificados por Kluge *et al.* (2016), Sakooei-Vayghan (2020), Graciola (2022) e Oliveira (2019).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste trabalho demonstram que o distanciamento da fonte de IV para a amostra está diretamente ligado com a cinética de secagem. Quanto menor o distanciamento, maior a radiação incidida e menor a taxa de dispersão, melhorando o processo e causando uma diminuição significativa no tempo de secagem.

O pré-tratamento com ácido cítrico afetou de diferentes modos o processo de secagem, a depender do distanciamento para fonte de radiação IV. Dentre as amostras pré-tratadas com ácido cítrico, as com o menor tempo de imersão resultaram em menores tempos de secagem, independente da distância utilizada para a fonte IV.

REFERÊNCIAS

- BAPTESTINI, F.M.; CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; ALMEIDA, L.F.J.; VARGASELÍAS, G.A. **Constant and decreasing periods of pineapple slices dried by infrared**. *Agrária* (Recife. Online), v. 11, p. 53-59, 2016.
- BRAR, H. S.; KAUR, P.; SUBRAMANIAN, J.; NAIR, G. R.; SINGH, A. **Effect of Chemical Pretreatment on Drying Kinetics and Physio-chemical Characteristics of Yellow European Plums**. *International Journal of Fruit Science*, Philadelphia, v. 20, p. 252-279, 2020.
- BRUCE, D. M. Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150°C. *Journal of Agricultural Engineering Research*, [s. l.], v. 32, p. 337-347, 1985.
- BOATENG, ISAAC DUAH; YANG, XIAO-MING; LI, YUAN-YUAN. **Optimization of infrared-drying parameters for Ginkgo biloba L. seed and evaluation of product quality and bioactivity**. *Industrial Crops and Products*, v. 160, p. 113108, Fev. 2021. Elsevier BV.
- CHANDRAN, J.; NISHA, P.; SINGHAL, R. S.; PANDIT, A. B. **Degradation of colour in beetroot (Beta vulgaris L.): A kinetics study**. *Journal of Food Science and Technology*, v. 51, p. 2678–2684, 2014.
- CHHIKARA, N.; KUSHWAHA, K.; SHARMA, P.; GAT, Y.; PANGHAL, A. **Bioactive compounds of beetroot and utilization in food processing industry: a critical review**. *Food Chemistry*, London, v. 272, p. 192-200, 2019.
- DE FRANÇA, Pedro Renann Lopes. **Secagem de beterraba vermelha: avaliação do processo e qualidade do produto por uso de técnicas de imagem e espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)**. 2021. Tese de Doutorado. [sn].
- DOYMAZ, I. **An Experimental Study on Drying of Green Apples**. *Drying Technology*, New York, v. 27, p. 478-485, 2009.

DOYMAZ, I. **Drying of potato slices: effect of pretreatments and mathematical modeling.** Journal of Food Processing and Preservation, Westport, v. 36, p. 310-319, 2012.

DOYMAZ, I. **Experimental study on drying of pear slices in a convective dryer.** International Journal of Food Science and Technology, Oxford, v. 48, p. 1909-1915, 2013.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática.** 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.

GRACIOLA, Keli Cristiane. **Pré-tratamentos para secagem de beterraba.** 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Unidade em Encantado, 2022.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. **Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient.** Journal of Agriculture Engineering Research, [s. l.], v. 6, n. 3 p. 169-174, 1961

HIRANVARACHAT, B.; DEVAHASTIN, S.; CHIEWCHAN, N. **Effects of acid pretreatments on some physicochemical properties of carrot undergoing hot air drying.** Food and Bioproducts Processing, Rugby, v. 89, p. 116-27, 2011.

HUANG, XIAOPENG; LI, WUQIANG; WANG, YONGMEI; WAN, FANGXIN. **Drying characteristics and quality of Stevia rebaudiana leaves by far-infrared radiation.** Lwt, [S.L.], v. 140, p. 110638, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110638>

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 6a edição,** LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., R. J. 2008.

JUN, S.; KRISHNAMURTHY, K.; IRUDAYARAJ, J.; DEMIRCI, A. **Fundamentals and Theory of Infrared Radiation. Infrared Heating for Food and Agricultural Processing.** Ed. Pan, Z.; Atungulu, G. G. CRC Press, pp. 1-18, 2011.

KHAMPAKOOL, APINYA; SOISUNGWAN, SALINEE; PARK, SUNG HEE. **Potential application of infrared assisted freeze drying (IRAFD) for banana snacks: drying kinetics, energy consumption, and texture.** Lwt, [S.L.], v. 99, p. 355-363, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.081>.

KLUGE, Ricardo Alfredo; PRECZENHAK, Ana Paula. **Betalainas em beterraba minimamente processada: perdas e formas de preservação.** Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, v. 17, n. 2, p. 175-192, 2016.

LENART, A. **Osmo-convective, drying of fruits and vegetables: technology and application.** Drying Technology, v.14, p. 391-413, 1996.

LOMAURO C.J., BAKSHI A.S., LABUZA T.P. **Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: fruit, vegetable and meat products.** Lebensmittel- Wissenschaft and Technologies, 18, p. 112-122. 1985.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. **Análise e Discriminação Matemática da Cinética de Secagem de Folhas de Capim-Limão**. Revista Brasileira de Agrícola e Ambiental, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007.

OLIVEIRA, Gabriel Henrique Horta de *et al.* **Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos**. Brazilian Journal of Food Technology, v. 18, p. 314-321, 2015.

OLIVEIRA, Raí Melo de. **Estudo da secagem infravermelho de sementes de melancia (*Citrullus lanatus*)**. 2019. Tese (Pós-graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Sergipe, Faculdade de Engenharia Química, São Cristóvão, 2019.

ONWUDE, DANIEL I.; HASHIM, NORHASHILA; ABDAN, KHALINA; JANIUS, RIMFIEL; CHEN, GUANGNAN. **The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato**. Journal of Food Engineering, v. 241, p. 75-87, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.008>.

OKEYO, A. A.; OLATUNDE, G.; ATUNGULO, G. G.; SADAKA, S.; MCKAY, T. **Infrared Drying Characteristics of Long-Grain Hybrid, Long-Grain Pureline, and Medium-Grain Rice Cultivars**. Cereal Chemistry, V. 94, n. 2, p. 251-261, 2017.

OZDEMIR, M.; DEVRES, Y. O. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v.42,n.4,p.225-233,1999.

PACIULLI, M.; MEDINA-MEZA, I. G.; CHIAVARO, E.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. **Impact of thermal and high pressure processing on quality parameters of beetroot (*Beta vulgaris* L.)**. LWT-Food Science and Technology, London, v. 68, p. 98-104, 2016.

PAGE, C. Factors Influencing the Maximum Rate of Drying Shelled Corn in Layers. West Lafayette MSc Thesis, Purdue University, 1949.

PEREZ, Bruna de Souza. **Obtenção de parâmetros para dimensionamento de um equipamento secador para a produção de cebola roxa desidratada**. In: CONGRESSO NACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, Não use números Romanos ou letras, use somente números Árabicos., 2015, São Paulo. Anais São Paulo: Conic, 2015. p. 1 – 11.

PONTING, J.D., WARRERS, G.G., FORREY, R.R., JACKSON, R., STANLEY, W.L. **Osmotic dehydration os fruits**. Food Technology, n.20, p.1365-1368, 1966.

RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S.; NIRANJAN, K. **Mass transfer** During osmotic dehydration of banana: fickian diffusion in cylindrical configuration. Journal of Food Engineering. v. 31, p. 423-432, 1997.

RIADH, M. H.; AHMAD B. S. A.; MARHABAN, M. H.; SOH, A.C. **Infrared Heating in Food Drying: An Overview**. Drying Technology, 2015, v. 33, p. 322–335

RODRIGUES, M.V.N.; RODRIGUES, R.A.F.; SERRA, G.E.; ANDRIETTA, S.R.; FRANCO, T.T. **Produção de xarope de açúcar invertido obtido por hidrólise heterogênea, através de planejamento experimental.** Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v.20, n.1, p.2-15, 2000.

SAKOOEI-VAYGHAN, Roghieh *et al.* **Effects of osmotic dehydration (with and without sonication) and pectin-based coating pretreatments on functional properties and color of hot-air dried apricot cubes.** Food chemistry, v. 311, p. 125978, 2020.

SAWICKI, T.; MARTINEZ-VILLALUENGA, C.; FRIAS, J.; WICZKOWSKI, W.; PEÑAS, E.; BĄCZEK, N.; ZIELIŃSKI, H. **The effect of processing and in vitro digestion on the betalain profile and ACE inhibition activity of red beetroot products.** Journal of Functional Foods, v. 55, 2018, p. 229–237, 2019.

SILVA, Mirtes Aparecida da Conceição; SILVA, Zaqueu Ernesto Da; MARIANI, Viviana Cocco; DARCHE, Sébastien. **Mass transfer during the osmotic dehydration of West Indian cherry.** LWT - Food Science and Technology, João Pessoa, Paraíba, v. 45, n. 2, p. 246–252, 2012.

SILVA, Toni Batista de Souza. **Estudo da cinética de secagem do coentro sob ação da radiação direta e difusa.** Nucleus, v. 15, n. 2, 2018.

SOUZA, Mariane Sampaio da Silveira de *et al.* **Desenvolvimento e avaliação de passas de jaca obtidas por desidratação osmótica seguida de secagem convectiva.** Journal of Health Sciences, v. 13, n. 2, 2011.

TOGRUL, I. T.; PEHLIVAN, D. **Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers.** Journal of Food Engineering, Essex, v. 55, p. 209-216, 2002.

VILHALVA, Divina Aparecida Anunciação *et al.* **Secagem convencional de casca de mandioca proveniente de resíduos de indústria de amido.** Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 42, p. 331-339, 2012.

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, [s. l.], v. 12, p. 865-876, 2019.

WANG, H.; FANG, X. M.; SUTAR, P. P.; MENG, J. S.; WANG, J.; YU, X. L.; XIAO, H. W. **Effects of vacuum-steam pulsed blanching on drying kinetics, colour, phytochemical contents, antioxidant capacity of carrot and the mechanism of carrot quality changes revealed by texture, microstructure and ultrastructure.** Food Chemistry, v. 338, p. 127799, 2021.

ZIELINSKA-PRZYJEMSKA, M.; OLEJNIK, M.; KOSTRZEWA, A.; LUCZAK, M.; JAGODZINSKI, P. P.; BAER-DUBOWSKA, W. **The beetroot component**

betanin modulates ROS production, DNA damage and apoptosis in human polymorphonuclear neutrophils. *Phytotherapy Research*, London, v. 26, p. 845-852, 2012.