

MODELAGEM MATEMÁTICA DAS CINÉTICAS DE SECAGEM DE BANANAS PRATA *IN NATURA* E OSMO-DESIDRATADAS

Maria Eduarda Nascimento de Jesus¹, Cíntia da Silva Araújo², Leandro Levate Macedo¹, Geanderson Leonardo de Lima Pereira¹, Sérgio Henriques Saraiva¹.

¹Universidade Federal do Espírito Santo/Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Alto Universitário - 29500-000 – Alegre-ES, Brasil, mnascimentodejesus626@gmail.com, leandrolevate@hotmail.com, geandersonllima@gmail.com, sergiohsaraiva@gmail.com.

²Universidade Federal da Grande Dourados/Faculdade da Engenharia, Rodovia Dourados/Itahum, km 12, Unidade II – Dourados-MS, Brasil, cintiaaraujo@ufgd.edu.br.

Resumo

A banana, fruta tropical rica em açúcares, proteínas, minerais e vitaminas, apresenta alta perecibilidade devido ao seu elevado teor de umidade quando *in natura*. Para conservar essa fruta por maiores períodos, utiliza-se a desidratação osmótica (DO), que é um pré-tratamento baseado na transferência de massa, seguida de secagem convectiva. Este estudo teve como objetivo realizar o ajuste de três modelos matemáticos as cinéticas de secagem de banana prata *in natura* e osmo-desidratada em solução hipertônica de açúcar de coco. As bananas foram cortadas e submetidas à DO em solução osmótica com concentração de 53,65% a 30 °C por 136 minutos. Posteriormente, tanto as amostras desidratadas osmoticamente quanto as *in natura* foram secas em leito fixo a 60 °C. Os valores de razão de umidade foram calculados ao longo dos dois processos de secagem e os modelos matemáticos foram ajustados. As bananas *in natura* apresentaram tempo de secagem mais curto, provavelmente, devido à ausência de agente osmótico na superfície, que reduz a difusividade da água. Todos os modelos tiveram bom ajuste aos dados, com destaque para os modelos de Henderson & Pabis e Page.

Palavras-chave: Modelagem matemática. Cinética de secagem. Banana. Desidratação Osmótica. Açúcar de coco.

Área do Conhecimento: Ciências da Saúde/Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Introdução

A banana, uma das frutas tropicais mais antigas a serem cultivadas pela humanidade, pertence à classe das monocotiledôneas e à família Musaceae. O número de variedades de banana encontradas ao redor de todo o mundo está estimado em cerca de 1600, que são subdivididas em 17 grupos e 52 subgrupos genômicos (Houwe *et al.*, 2020; Unctad, 2016). O cultivo da bananeira é realizado, predominantemente, nos países tropicais. No Brasil, a banana é a fruta mais consumida, além de ser produzida em todos os estados. No ano de 2022, o país apresentou uma produção de mais de 6,8 milhões de toneladas, que gerou um valor bruto de quase 12 bilhões de reais e fez com que se destacasse como o quinto maior produtor mundial (FAO, 2022; IBGE, 2022).

Apesar de ser amplamente consumida na sua forma *in natura*, a banana pode ser introduzida na alimentação de diferentes formas, como em doces caseiros, desidratada, assada em bolos, entre outras. O elevado consumo desta fruta se dá, principalmente, devido ao seu baixo custo e à praticidade do consumo, porém, ela ainda propicia aos seus consumidores a ingestão de diversos macro e micronutrientes, que são muito benéficos para a saúde humana. Quando madura, por exemplo, a banana é rica em açúcares, proteínas e fósforo, além de conter em concentração mediana cálcio, ferro, iodo, zinco, cobre, manganês, cobalto e as vitaminas A, C e do complexo B (Soares *et al.*, 2022; Melo *et al.*, 2017).

O elevado teor de umidade das bananas *in natura* faz com que estas apresentem alta perecibilidade e, com isso, grande parte da produção é perdida. As perdas que ocorrem no período pós-colheita se dão, principalmente, pelas logísticas de transporte e armazenagem inadequadas e pela falta de cuidado no manuseio das frutas, o que as torna inviáveis para consumo ou faz com que adquiram uma aparência não desejável pelo consumidor (Sousa *et al.*, 2019). Uma das técnicas mais utilizadas para estender a vida útil dos frutos após a colheita é a cadeia do frio, visto que esta propicia uma diminuição da atividade

metabólica, o que retarda o seu amadurecimento. Porém, as bananas são sensíveis ao uso de baixas temperaturas, o que acarreta o desenvolvimento de injúrias pelo frio e, com isso, os frutos podem exteriorizar sintomas que comprometem a sua comercialização (Araújo, 2017).

Como forma de solucionar os problemas de conservação da banana, que são oriundos não só da não possibilidade de utilização da cadeia do frio, mas também da deterioração de compostos aromáticos e substâncias nutricionais devido à aplicação direta da secagem convectiva, tem-se aplicado a desidratação osmótica (DO) como pré-tratamento para reduzir a umidade das frutas. Esse método de desidratação consiste em mergulhar a fruta, inteira ou em pedaços, em solução hipertônica durante o tempo suficiente para que a maior quantidade de água seja removida. A DO promove, além do fluxo de água do alimento para a solução, a ocorrência de mais dois fluxos. São eles: fluxo de solutos da solução para o alimento e fluxo de solutos do alimento para a solução (Araya-Farias; Macaigne; Ratti, 2014; Ketata; Desjardins; Ratti, 2013). O agente osmótico mais utilizado para realizar a DO em frutas é a sacarose. Todavia, os produtos obtidos pelo processo realizado com este agente se tornam mais calóricos e podem contribuir com o aumento da incidência de diabetes e problemas dentários. Nesse cenário, o açúcar de coco se apresenta como agente osmótico mais atraente devido à presença de minerais, vitaminas, antioxidantes e menor índice glicêmico (Kaur *et al.*, 2022). Considerado o exposto, este projeto objetivou encontrar o modelo matemático mais adequado às cinéticas de secagem das bananas *in natura* e osmo-desidratadas em solução hipertônica de açúcar de coco.

Metodologia

A variedade dos frutos utilizados na pesquisa foi prata. Todos os frutos foram adquiridos no comércio local de Alegre, Espírito Santo, Brasil e a seleção foi feita com base no estágio de maturação. As bananas com pele amarela e sem injúrias foram selecionadas e, previamente, sanitizadas em água clorada a 200 ppm por 10 minutos. Após sanitização, os frutos foram enxaguados, as cascas foram removidas e, com o auxílio de um fatiador, as bananas foram cortadas em fatias de 2,5 cm de diâmetro e 0,5 cm de espessura.

O açúcar de coco foi adquirido da empresa Wlk Food's e as soluções osmóticas foram preparadas através da dissolução do açúcar em água destilada.

Para a realização da DO, as fatias de banana foram inseridas em solução hipertônica de açúcar de coco com concentração de 53,65% e incubadas a 30 °C por 136 minutos. Terminado este tempo, a solução foi drenada e as fatias foram imersas em banho de gelo por 20 segundos para cessar as transferências de massa. As amostras foram dispostas em uma bandeja contendo papel absorvente para promover a drenagem do excesso de água da superfície e só após isso, foram colocadas na bandeja do secador de cabine. A secagem ocorreu na temperatura de 60 °C e a massa das amostras foi registrada a cada 15 minutos. O processo foi interrompido quando a massa se tornou constante. A banana *in natura* foi seca sob as mesmas condições.

A razão de umidade (RU) das amostras para cada tempo de secagem foi determinada através da Equação 1.

$$RU = \frac{X_T - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

em que: X_T é o teor de água, em base seca, em qualquer instante de tempo. X_e é o teor de água na condição de equilíbrio. X_0 é o teor de água inicial.

Os dados obtidos foram representados em forma gráfica e os modelos de Lewis, Henderson & Pabis e Page (Equações 2, 3 e 4, respectivamente) foram ajustados às curvas de secagem por meio de regressão não linear.

$$RU = \exp^{-k*t} \quad (2)$$

$$RU = a * \exp^{-k*t} \quad (3)$$

$$RU = \exp^{-k*t^n} \quad (4)$$

em que: k, t e n são parâmetros dos modelos. t é o tempo em minutos.

Depois de realizados os ajustes, a qualidade destes foi avaliada com base nos valores do coeficiente de determinação (R^2), do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) e do erro padrão da regressão (SE). Esses valores foram calculados de acordo com as Equações 5, 6 e 7, respectivamente.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - RU_{pred,i})^2}{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - \bar{RU})^2} \quad (5)$$

$$R^2_{adj} = \frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - RU_{pred,i})^2}{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - \bar{RU})^2} * \frac{N-1}{N-p} \quad (6)$$

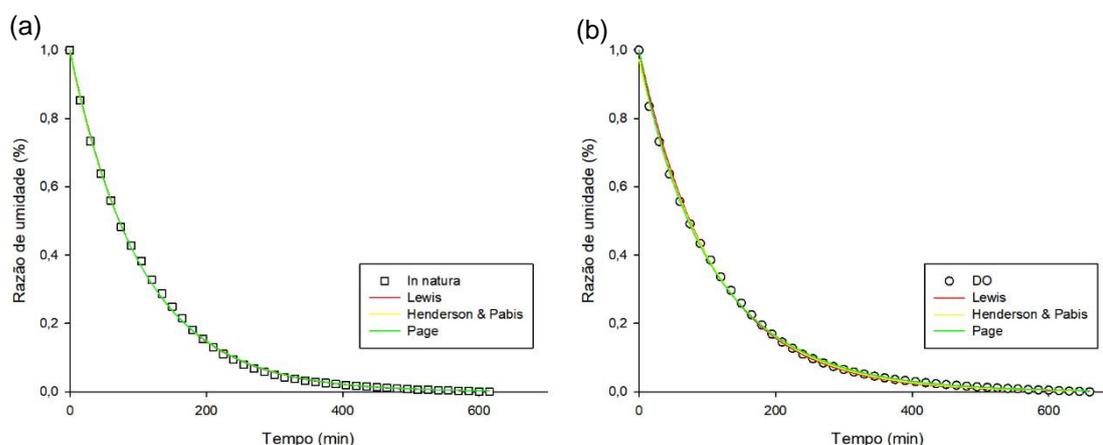
$$SE = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - RU_{pred,i})^2}{N-p} \right)} \quad (7)$$

em que: $RU_{exp,i}$ é o valor experimental da razão de umidade para a i -ésima observação. $RU_{pred,i}$ é o valor predito da razão de umidade para a i -ésima observação. \bar{RU} é a média dos valores experimentais da razão de umidade. N é o total de observações. p é o número de constantes do modelo.

Resultados

Os valores de razão de umidade foram calculados a cada 15 minutos desde o início de cada secagem. Esses dados foram plotados em gráficos de razão de umidade *versus* o tempo e os modelos de Lewis, Henderson & Pabis e Page foram ajustados. Os gráficos das cinéticas de secagem com os modelos ajustados estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Modelos de Lewis, Henderson & Pabis e Page ajustados as cinéticas de secagem da banana *in natura* (a) e da banana osmo-desidratada em solução hipertônica de açúcar de coco (b).



Fonte: a autora.

As equações dos modelos para cada tratamento, juntamente com seus coeficientes e erros estão apresentados na Tabela 1.

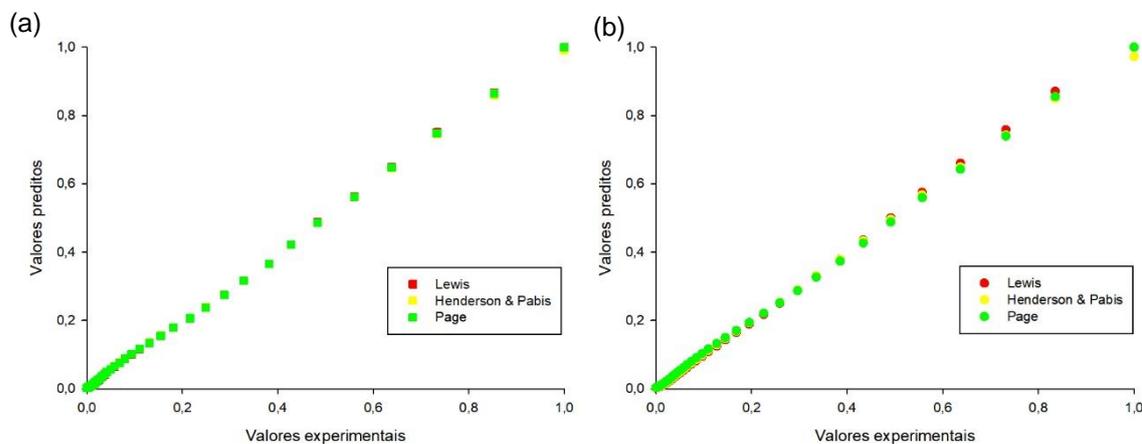
Tabela 1 – Equações ajustadas, coeficientes de determinação e erro padrão dos modelos de Lewis, Henderson & Pabis e Page para a cinética de secagem das bananas *in natura* e osmo-desidratadas em solução hipertônica de açúcar de coco.

Tratamento	Modelos	Equação ajustada	R ²	R ² _{adj}	SE
<i>In natura</i>	Lewis	$RU = e^{-0,009570*t}$	0,9993	0,9993	0,0066
	Henderson & Pabis	$RU = 0,990978 * e^{-0,009485*t}$	0,9994	0,9994	0,0064
	Page	$RU = e^{-0,009863*t^{0,993839}}$	0,9993	0,9993	0,0067
DO	Lewis	$RU = e^{-0,009240*t}$	0,9987	0,9987	0,0090
	Henderson & Pabis	$RU = 0,972189 * e^{-0,008981*t}$	0,9993	0,9993	0,0064
	Page	$RU = e^{-0,012129*t^{0,944812}}$	0,9995	0,9995	0,0054

Fonte: a autora.

Cada um dos modelos ajustados gera uma série de valores preditos para os pontos de observação experimental. Os gráficos que relacionam os valores preditos pelos modelos e os valores observados experimentalmente estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Relação entre os valores de razão de umidade preditos pelos modelos de Lewis, Henderson & Pabis e Page e os observados experimentalmente para a banana *in natura* (a) e para a banana osmo-desidratada em solução hipertônica de açúcar de coco (b).



Fonte: a autora.

Discussão

Conforme mostrado na Figura 1, os menores valores de razão de umidade em função do tempo de secagem foram obtidos pelas bananas que foram secas sem sofrer pré-tratamento osmótico. Como a temperatura foi constante nas duas secagens, presume-se que, apesar de a desidratação osmótica ser eficaz na redução do conteúdo de água do alimento antes da secagem, ela reduz a difusividade da água para a etapa posterior. Isso se dá uma vez que, quando o açúcar se infiltra nos tecidos de algumas frutas, ele reduz a porosidade e, assim, a remoção da água remanescente é dificultada (Silva, 2018). Esse fenômeno também pode explicar o fato de a banana *in natura* ter apresentado um tempo de secagem mais curto, de 615 minutos, em contraste com a banana osmo-desidratada, que apresentou tempo de secagem de 660 minutos. O comportamento exponencial da curva é característico da secagem convectiva de produtos alimentícios, visto que, inicialmente, a banana apresenta teor de umidade elevado, o que facilita a saída de água e ao passo que a secagem se prolonga, o teor de umidade na superfície diminui, tornando mais complexa a eliminação da água pelos tecidos da fruta (Araújo; Macedo; Saraiva, 2023).

Os modelos matemáticos de Lewis, Henderson & Pabis e Page mostraram excelentes ajustes aos dados experimentais, conforme mostrado na Figura 2 e na Tabela 1, que traz os valores do coeficiente de determinação R^2 de todos os modelos para cada tratamento. Os valores de R^2 acima de 0,99 revelam que todos os modelos podem ser utilizados para obter informações sobre o processo e prever, com qualidade, a resposta em qualquer ponto da curva que esteja dentro das condições utilizadas para elaborar o modelo (Araújo; Macedo; Saraiva, 2023).

Além do R^2 , o R^2_{adj} e o SE também são medidas de comparação entre os modelos matemáticos. Pode-se afirmar que modelos com maior R^2_{adj} e menor SE têm melhor ajuste e representam com maior fidelidade os dados obtidos experimentalmente (Araújo; Macedo; Saraiva, 2023). Os valores apresentados na Tabela 1 revelam que, para as bananas que não sofreram pré-tratamento osmótico, o modelo de Henderson & Pabis obteve o maior R^2_{adj} e menor SE, enquanto para as bananas osmo-desidratadas, o modelo que melhor se adequou aos dados foi o de Page.

A dispersão dos valores preditos pelo modelo *versus* os dados experimentais também nos auxilia a determinar a qualidade do ajuste do modelo, conforme mostrado na Figura 2. Quanto mais os dados experimentais estão dispostos próximos a uma linha imaginária de 45°, mais próximo da perfeição está o ajuste do modelo (Macedo *et al.*, 2020). Em todos os modelos testados foram obtidos dados próximos à essa linha para os dois tratamentos.

Conclusão

A aplicação do pré-tratamento osmótico aumentou o tempo da secagem convectiva das bananas, podendo estar relacionado à incorporação de sólidos da solução osmótica nos poros dos tecidos, reduzindo a difusividade da água para a superfície.

Todos os modelos matemáticos testados obtiveram elevada qualidade de ajuste aos dados experimentais. O modelo de Henderson & Pabis foi o mais adequado para a secagem das bananas *in natura* e o modelo de Page foi o mais adequado para a secagem das bananas osmo-desidratadas.

Referências

ARAÚJO, C. S.; MACEDO, L. L.; SARAIVA, S. H. **Influência da desidratação osmótica e do agente osmótico na cinética de secagem de banana prata**. Anais do XXVII INIC, XXIII EPG, XVII INIC Jr, XIII INID, III ENEXUN. Anais. São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba, 2023.

ARAÚJO, N. O. **Indução de tolerância à injúria do frio em banana pela aplicação do tratamento hidrotérmico e ácido salicílico**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017.

ARAYA-FARIAS, M.; MACAIGNE, O.; RATTI, C. On the development of osmotically dehydrated seabuckthorn fruits: pretreatments, osmotic dehydration, postdrying techniques, and nutritional quality. **Drying Technology**, v. 32, n. 7, p. 813–819, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.866143>.

FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Countries by commodity**. Relatório 2022.

HOUWE, I. V. D.; CHASE, R.; SARDOS, J.; RUAS, M.; KEMPENAERS, E.; GUIGNON, V.; MASSART, S.; CARPENTIER, S.; PANIS, B.; ROUARD, M.; ROUX, N. Safeguarding and using global banana diversity: a holistic approach. **CABI Agriculture and Bioscience**, v. 1, n. 15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43170-020-00015-6>.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção de Banana**. Brasil, 2022.

KAUR, D.; SINGH, M.; ZALPOURI, R.; SINGH, I. Osmotic dehydration of fruits using unconventional natural sweeteners and non-thermal-assisted technologies: A review. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 12, e16890, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.16890>.

KETATA, M; DESJARDINS, Y; RATTI, C. Effect of liquid nitrogen pretreatments on osmotic dehydration of blueberries. **Journal of Food Engineering**, v. 116, n. 1, p. 202-212, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.035>.

MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; ARAÚJO, C. S.; SARAIVA, S. H.; TEIXEIRA, L. J. Q. Effect of drying air temperature on drying kinetics and physicochemical characteristics of dried banana. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, n. 9, e13451, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13451>.

MELO, D. S.; LIMA, E. M.; FREITAS, R. M.; COSTA, J. C. Avaliação do amadurecimento da banana (*Musa spp.*) sob o efeito de abafamento e de Carboreto de Cálcio (CaC₂). *In*: II CONGRESSO INTERNACIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 2017, Rio Grande do Norte. **Anais do II Congresso Internacional das Ciências Agrárias – COINTER PDVAgro 2017**. Rio Grande do Norte: Programa Internacional Despertando Vocações para Ciências Agrárias, 2017.

SILVA, S. P. **Influência da desidratação osmótica na secagem convectiva do melão (*Cucumis melo* L):** modelo difusional de Fick. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

SOARES, D. D.; FARIAS, I. G. D.; SANTOS, P. L. M.; GONÇALVES, M. A. S.; SANTOS, S. S.; GUALBERTO, S. A. Amadurecimento natural e artificial da banana da prata (*Musa* sp.). **Journal of education, Science and health**, v. 2, n. 4, p. 1-11, 2022. DOI: <https://www.doi.org/10.52832/jesh.v2i4.156>.

SOUSA, K. A.; LUCAS, M. R.; SOUZA, D. O.; COSTA, B. B. A produção da banana e seus impactos socioeconômicos no desenvolvimento da microrregião de Araguaína-TO. **Revista Observatório**, v. 5, n. 5, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.20873/uft.2447-4266.2019v5n5p314>.

UNCTAD. UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. **Banana: An INFOCOMM Commodity Profile**. New York: United Nations. 2016.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia de Alimentos (DEAL) do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias (CCAIE) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pela infraestrutura disponibilizada para a realização dos experimentos. Agradecem, também, à Fapes pela bolsa de Pesquisador Capixaba de Sérgio Henrique Saraiva e pela concessão da bolsa de estudos.