

*CINÉTICA DE SECAGEM EM CAMADA FINA DA POLPA DE CLADÓDIOS DE PALMA FORRAGEIRA (*Opuntia ficus indica* Mill) EM ESTUFA COM CIRCULAÇÃO FORÇADA DE AR*

G. M. V. MARTINS¹, J.P.L. FERREIRA², A. E. SANTOS³, R. S. NOBRE⁴

^{1,2,3,4} Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar
E-mail para contato: georgiana.82@gmail.com

RESUMO – Este trabalho foi realizado com o objetivo de estudar a secagem em camada fina da polpa do cladódio (broto) da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill), desidratada em estufa com circulação forçada de ar, a 50; 60 e 70 °C, com três diferentes espessuras da camada (5; 5,5 e 6 mm). Com os dados obtidos durante o processo de secagem foram traçadas as curvas de secagem e ajustados aos modelos de Wang e Sing, Henderson e Pabis, Aproximação da Difusão e Exponencial dois Termos. Para analisar os efeitos dos fatores na cinética de secagem da polpa do cladódio da palma forrageira, utilizou-se um planejamento experimental fatorial completo 2^3 com 3 pontos centrais, sendo três fatores (temperatura, espessura e tempo), avaliados em dois níveis (- e +), para constante de secagem (k). Verificou-se que a espessura da camada e a temperatura de secagem influenciaram no tempo de secagem da polpa do cladódio da palma forrageira, sendo o processo mais rápido para a menor espessura da camada e maior temperatura. O modelo de Aproximação da Difusão foi o que melhor se ajustou as curvas de cinética de secagem da amostra.

1. INTRODUÇÃO

A palma forrageira, *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill, cactácea exótica originária do México, está presente em todos os continentes com diversas finalidades, destacando-se sua utilização na alimentação animal, essa planta possui um enorme potencial produtivo e diversas outras utilidades, podendo ser utilizada para produção de medicamentos, cosméticos, recuperação de solos, culinária, entre outros. Desse modo, o conhecimento das propriedades físico-químicas da palma é importante para a caracterização do seu múltiplo uso (HOFFMANN, 1995; MOURA et al., 2009).

Os cladódios da palma, também conhecidos como broto de palma ou nopalitos, constituem-se numa boa fonte de mucilagem, fibras e minerais, sendo estes elementos importantes para a dieta humana (SAENZ 1997, 2000). Além disso, estudos recentes demonstram a viabilidade de processamento desta planta para obtenção de sucos, geléias, géis, adoçantes líquidos, picles, doces, molhos entre outros (SAENZ e COSTELL, 1990). Os cladódios de *Opuntia ficus-indica* também podem ser processados na forma de farinha (extrato seco), podendo ser utilizada como ingrediente alimentício em pequenas agroindústrias (SAENZ, 1997).

Esta cactácea é bastante comum na região do sertão da Paraíba, no entanto poucos estudos foram realizados com esta planta para seu aproveitamento no consumo humano, já que vários produtos podem ser obtidos a partir da palma.

A secagem artificial é uma operação relativamente cara; entretanto, apresenta uma série de vantagens com relação à secagem natural, como independência das condições climáticas, possibilidade de se estabelecer um programa de operação com mais facilidade; além disso, diminui o risco de deterioração dos alimentos em função do tempo de secagem ser menor (SOUSA, 1999).

Durante muito tempo o tradicional método de secagem na agricultura era deixar o produto no campo, sob a ação do sol e do vento, para perder parte de sua umidade. Conforme o tempo foi passando e com os conhecimentos adquiridos pela experiência, os artesãos se foram tornando cada vez mais capazes de lidar com secagem e armazenamento de alimentos; atualmente, esses assuntos são objeto de estudos em muitos centros de pesquisa e universidades em todo o mundo, em um processo contínuo de descobertas de novas metodologias de otimização da economia e qualidade do produto (FIOREZE, 2004).

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da espessura da camada da polpa e da temperatura de secagem, no processo de secagem em camada fina da polpa do cladódio (broto) da palma forrageira.

2. MATERIAL E MÉTODOS

*Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Tecnologia de Produtos Hortícolas (LTPH) do Centro de Ciência e Tecnologia Agroalimentar (CCTA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Utilizou-se como matéria-prima os brotos da palma forrageira (*Opuntia ficus indica* Mill) provenientes do campus da UEPB em Catolé do Rocha, PB.*

Foram colhidos os brotos que apresentavam comprimento de 17 a 21 cm de acordo com o Codex Alimentarius (2005). No laboratório, foram selecionados manualmente de forma a eliminar os exemplares que apresentavam danos físicos ou aspectos de podridão. Procedeu-se uma lavagem em água corrente, com seguida imersão em solução de hipoclorito de sódio a 50 ppm, durante 15 minutos; posteriormente, foi retirado o excesso de cloro (enxágüe) e escorrido o excesso de água. Após a limpeza e sanitização, os brotos foram cortados com auxílio de facas de aço inoxidável em pequenos pedaços para facilitar sua trituração. A seguir os pedaços de broto foram triturados e homogeneizados em um processador, o material obtido foi transferido para bandejas de aço inoxidável, o qual foi uniformemente espalhado com espátula de aço inoxidável, compondo amostras com camadas de diferentes espessuras (0,5; 0,55; 0,6 cm), medidas com o auxílio de um paquímetro digital.

Antes do início da secagem se determinou o teor de água inicial do broto de palma, de acordo com A.O.A.C. (1997), que constitui em se submeter às amostras em estufa, a temperatura de 105°C +/-2°C durante 24 horas para permitir a retirada total da água. A Equação 1 foi utilizada para determinação do teor de água em base úmida.

$$X_{BU} = (P_i - P_f) / P_i \quad (1)$$

onde:

X_{BU} - teor de água em base seca

P_i - peso inicial, em gramas

P_f - peso final, em gramas

Para determinação do teor de água em base seca, usou-se a Equação 2.

$$X_{BS} = X_{BU} / (1 - X_{BU}) \quad (2)$$

onde:

X_{BS} : teor de água em base seca

X_{BU} : teor de água em base úmida

As amostras nas bandejas foram levadas para secagem em estufa com circulação de ar, nas temperaturas de 50; 60 e 70 °C. O experimento foi realizado em triplicata, sendo as pesagens do material realizada em balança analítica modelo SHIMADZU AY220, com máximo 220g e mínimo 0,01g, até obtenção do equilíbrio.

Os dados da cinética de secagem foram obtidos pesando-se as bandejas com as amostras, durante as secagens, até peso constante, em intervalos regulares de tempo. Com os dados experimentais da secagem e utilizando a Equação 2, foram calculados os valores da razão de teor de água.

$$RU = (U - U_e) / (U_0 - U_e) \quad (3)$$

onde:

RU – razão de teor de água (adimensional)

U – teor de umidade “absoluta” (base seca)

U_e – teor de umidade de equilíbrio (base seca)

U_0 – teor de umidade inicial (base seca)

A análise e a representação dos dados experimentais do processo de secagem foram realizadas utilizando-se os modelos de Wang e Singh, Henderson e Pabis, Aproximação da Difusão e Exponencial dois Termos, que estão apresentados na Tabela 1. Os parâmetros dos modelos utilizados foram obtidos mediante aplicação dos dados experimentais a análise de regressão não-linear, pelo método Gauss-Newton no programa computacional STATISTICA, versão 5.0.

Os Modelos matemáticos de regressão não linear, utilizados para predizer o fenômeno da secagem de polpa do broto da palma serão apresentados a seguir:

Tabela 1 - Modelos matemáticos de regressão não linear, utilizados para predizer o fenômeno da secagem de polpa de palma

Modelo	Equação	Referência
Wang e Sing	$RU = 1 + at + bt^2$ (4)	Silva et al (2009)
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-kt)$ (5)	Melo et al (2013)
Arproximação da Difusão	$RU = a \exp(-k) + (1-a)\exp(-kbt)$ (6)	Santos et al (2010)
Exponencial dois Termos	$RU = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kt)$ (7)	Silva et al (2009)

Em que: RU – razão de umidade do material, adimensional; t – tempo de secagem (min., h); a e b – constantes do modelo; k – constante de secagem (min.⁻¹).

O processo de secagem convectiva da polpa do broto da palma foi estudado mediante planejamento experimental fatorial completo 2^3 com 3 pontos centrais, sendo três fatores ou variáveis independentes (temperatura, espessura da camada e tempo), avaliadas em dois níveis (- e +), para o fator ou variável de resposta constante de secagem (K). Na matriz de planejamento experimental, os valores das variáveis independentes estão representados na forma codificada (-1, 0 e +1) e real (temperatura: 50, 60 e 70°C; espessura: 5; 5,5 e 6 mm; tempo de secagem: 8, 10 e 12 horas) sendo os fatores e os respectivos níveis apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Matriz de planejamento experimental completo (2^3) e 3 pontos centrais para constante de secagem (K)

Ensaio	Temperatura (°C)	Espessura da camada (mm)	Tempo de secagem (h)
1	-1(50°C)	-1(5)	-1(8)
2	+1(70°C)	-1(5)	-1(8)
3	-1(50°C)	+1(6)	-1(8)
4	+1(70°C)	+1(6)	-1(8)
5	-1(60°C)	-1(5)	+1(12)
6	+1(70°C)	-1(5)	+1(12)
7	-1(50°C)	+1(6)	+1(12)
8	+1(70°C)	+1(6)	+1(12)
9	0(60°C)	0(5,5)	0(10)
10	0(60°C)	0(5,5)	0(10)
11	0(60°C)	0(5,5)	0(10)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 representa as curvas de secagem da polpa do broto da palma em camada fina em diferentes temperaturas (50, 60 e 70 °C), espessura (2, 4 e 6 mm) e tempo de secagem (8, 10 e 12 horas), seguindo a matriz experimental mostrada anteriormente.

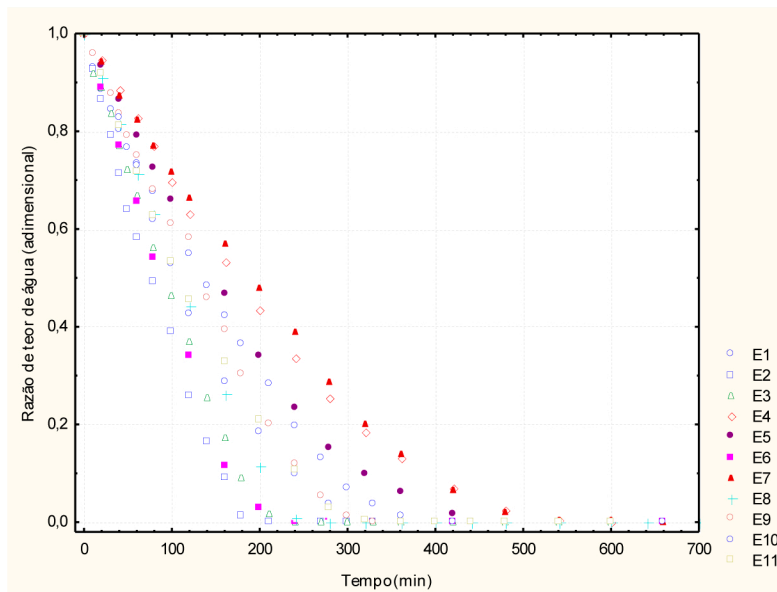


Figura 1 - Curvas da razão de umidade (RU) em função do tempo para as secagens da matriz experimental.

Analisando as curvas de razão de umidade, demonstrada na Figura 1, verifica-se que o aumento da temperatura favorece o processo de transferência de energia na forma de calor para as amostras, conseqüentemente diminuindo o tempo necessário para a polpa do broto atingir o equilíbrio. Estes resultados estão de acordo com os estudos realizados por Silva et al (2009) para a secagem de banana maçã, com Yi et al. (2012), estudando a cinética de secagem em camada fina e a modelagem matemática de jujuba chinesa. Corroborando com os resultados desta pesquisa também encontram-se os estudos realizados por Santos et al (2010) que estudou a secagem de banana terra e com o estudo de Sousa et al (2011) para a secagem da polpa do oiti nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Na Tabela 3 são apresentados os valores dos coeficientes de determinação (R^2 , em %) e o desvio quadrático médio (DQM, em decimal) para os quatros modelos analisados para as secagens da matriz experimental.

Tabela 3 - Valores do coeficiente de determinação (R^2) e do desvio quadrático médio (DQM), calculados para verificação do ajuste dos modelos matemáticos aos valores experimentais para as secagens da matriz experimental.

SECAGEM	Wang Singh		Henderson e Pabis		Aproximação da Difusão		Exponencial dois Termos	
	$R^2(\%)$	DQM	$R^2(\%)$	DQM	$R^2(\%)$	DQM	$R^2(\%)$	DQM
1	99,82%	0,0210	98,93%	0,0507	99,52%	0,0341	98,93%	0,0507
2	95,57%	0,1044	98,97%	0,0508	99,65%	0,0297	98,97%	0,0508
3	99,93%	0,0128	99,07%	0,0470	99,86%	0,0182	99,07%	0,0470
4	97,87%	0,0749	98,71%	0,0584	99,62%	0,0318	98,71%	0,0584
5	99,67%	0,0290	99,08%	0,0485	99,87%	0,0181	99,08%	0,0485
6	94,04%	0,1170	98,62%	0,0569	99,67%	0,0277	98,62%	0,0569
7	99,88%	0,0174	98,81%	0,0548	99,66%	0,0295	98,81%	0,0548
8	97,29%	0,0824	98,65%	0,0583	99,66%	0,0295	98,65%	0,0583
9	99,54%	0,0370	98,41%	0,0554	99,46%	0,0385	98,49%	0,0643
10	99,12%	0,0577	99,12%	0,0467	99,91%	0,0153	99,12%	0,0467
11	98,83%	0,0533	99,11%	0,0465	99,81%	0,0218	99,11%	0,0465

Conforme pode ser observado na Tabela 3, verifica-se que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais, nas diferentes condições de secagem foi o de Aproximação da Difusão, pois apresentou os maiores valores de coeficiente de determinação (R^2) superiores a 99%, e os menores desvios quadráticos médios (DQM). Esses resultados estão semelhantes com os encontrados por Santos et al. (2010), que ao analisarem a cinética de secagem de banana da variedade terra verificaram que o modelo da Aproximação da Difusão ajustou-se aos dados experimentais com elevados valores de coeficientes de determinação e baixo desvio quadrático médio. Concordante com esta observação encontra-se o estudo realizado por SOUSA et al. (2011) que ao avaliarem diferentes equações matemáticas para a cinética de secagem de polpa de oiti verificaram que o modelo de Aproximação da Difusão ajustou-se muito bem aos dados experimentais da secagem.

Os valores dos parâmetros estimados pelo ajuste do modelo da Aproximação de Difusão estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros obtidos do modelo de Aproximação da Difusão ajustado aos dados de secagem da matriz experimental

<i>Ensaio</i>	<i>a</i>	<i>K</i>	<i>B</i>
1	-8,39993	0,01135	0,92654
2	-12,0416	0,02210	0,93580
3	-8,17303	0,00945	0,91043
4	-13,6824	0,01920	0,93910
5	-8,81428	0,01159	0,91139
6	-16,2013	0,02140	0,94260
7	-8,79561	0,00893	0,91597
8	-15,7392	0,01750	0,94190
9	-12,4480	0,01370	0,93370
10	-10,2835	0,01600	0,92020
11	-10,3507	0,01500	0,92570

Analisando os resultados obtidos (Tabela 4), verifica-se que o parâmetro k, para o modelo da aproximação da Difusão, que representa a constante da taxa de secagem, aumenta em função do aumento da temperatura e em função do decréscimo da espessura. Resultado semelhante foi encontrado por SANTOS et al. (2010), SILVA et al. (2009), SOUSA et al. (2011) e MELO et al. (2013) ao estudarem a secagem de banana da variedade terra (Musa Sapientum, Linneo), banana maçã, polpa de oiti e polpa do fruto do mandacaru, respectivamente.

CONCLUSÕES

Mediante os resultados apresentados pode-se concluir que o modelo matemático de Aproximação da Difusão representa satisfatoriamente os dados experimentais da secagem da polpa da palma forrageira (Opuntia ficus-indica Mill) com coeficientes de determinação superior a 99%.

O tempo de secagem diminuiu de forma mais rápida a medida que aumentamos a temperatura e diminuimos a espessura da camada da polpa do broto da palma.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS – AOAC. *Official methods of analysis*. Arlington, 1995. 1141 p.
- CODEX ALIMENTARIUS (FAO/WHO). *Codex Standard for Nopal*, CODEX STAN 185 - 1993. Codex Alimentarius, Cidade do México, México, 2005.
- FIGUEIREDO, R. – “Princípios de secagem de produtos biológicos”. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2004. 229 p.
- HOFFMANN, W. “Etnobotânica. In: Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira”. Roma: FAO, “Produção e Proteção Vegetal”. Tradução (SEBRAE/PB), Paper 132, p. 12-14, 1995.
- MELLO, K. S.; FIGUEIREDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; FERNANDES, T. K. S.; BEZERRA, M. C. T. “Secagem em camada de Espuma da Polpa do Fruto do Mandacaru: experimentação e

ajuste de modelos matemáticos". Revista Caatinga, Mossoró, v. 26, n. 2, p. 10-17, abr. – junho., 2013.

MOURA, L.B.; ROCHA, E. M. et al. "Elaboração de produtos alimentícios à base de palma (*Opuntia ficus-indica*) e do seu fruto". Revista Verde, v. 4, n. 4, 2009.

SAENZ, C.; COSTELL, E. "Rheology of prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) concentrated juices". Engineering and Food, v. 1, p. 133–137, 1990.

SAENZ, C. "Cladodes: a source of dietary fiber". J. PACD. p.117-123, 1997.

SAENZ, C. "Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits and cladodes". J. of Arid Environments, v. 46, p. 209-225, 2000.

SANTOS, P.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; SILVA, F. T. C.; FURTADO, G. F. "Influência de Pré-Tratamentos na Cinética de Secagem em Diferentes Temperaturas de Banana da Variedade Terra (*Musa Sapientum*, Linneo)". Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial., v. 04, n. 02: p. 218-234, 2010.

SILVA, A. S.; MELO, K. S.; ALVES, N. M. C.; FERNANDES, T. K. S. F.; FARIAS, P. A. "Cinética de Secagem em Camada Fina da Banana Maçã em Secador de Leito Fixo". Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v. 11, n. 2, p.129-136, 2009.

SOUSA, F. C.; SOUSA, E. P.; SILVA, L. M. M.; MARTINS, J. J. A.; GOMES, J. P.; ROCHA, A. P. T. "Modelagem Matemática para Descrição da Cinética de Secagem de Polpa de Oiti". Revista Educação Agrícola Superior, V. 26, n. 2, p. 108-112, 2011.

SOUSA, S. de. "Desenvolvimento experimental de passa de umbu (*Spondias tuberosa*, Arruda Câmara)". (Dissertação). Campina Grande: UFPB, 1999. 98 p.

Yi, X. K.; Wu, W. F.; Zhan, Y. Q.; Li, J. X.; Luo, H. P. "Thin layer drying characteristics and modeling of Chinese jujubes". Mathematical Problems in Engineering, p.1-18, 2012.