

## Modelagem matemática e difusividade efetiva do processo de secagem do miolo da macambira

*Mathematical modeling and effective diffusivity of drying process of kernels of macambira*

Julianne V. F. Portela<sup>1\*</sup>, Thayze R. B. Pessoa<sup>2</sup>, Ânoar A. El-Aouar<sup>2</sup>

**Resumo:** A macambira (*Bromelia laciniosa* M.) é uma bromélia com grande potencialidade agrícola, energética, mas escasso embasamento científico. Assim, este trabalho objetivou avaliar as condições operacionais para a secagem convectiva do miolo da macambira, a fim de gerar um produto seco viável do ponto de vista tecnológico e com possibilidade de aplicação na alimentação humana. A matéria-prima com espessura de 2,5mm e umidade média inicial de 87,20% foi disposta em bandejas no secador de bandejas, utilizando como variáveis do processo a temperatura do ar (43, 49 e 56°C) e a variável fixa velocidade do ar igual a 1,0m.s<sup>-1</sup>. Após a execução dos experimentos realizou-se o estudo da cinética de secagem e a modelagem matemática (Fick, Page e empírico de dois parâmetros) das curvas experimentais como forma de definir a melhor condição de processo. O aumento da temperatura refletia no incremento dos valores de difusividade efetiva de água, sendo estes com ordem de grandeza de 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> e, tendo o modelo empírico exponencial de dois parâmetros como o que melhor se ajustou aos dados experimentais. A temperatura de 56°C resultou em secagem mais rápida e mais eficiente com umidade final de 12,61%.

**Palavras-chave:** *Bromelia laciniosa* M, secagem convectiva, difusividade efetiva

**Abstract:** The macambira (*Bromelia laciniosa* M.) is a bromeliad with great agricultural potential, energy, but scarce scientific foundation. Thus, this work aimed to evaluate the operational conditions for the convective drying of crumb macambira, in order to generate a dry product viable technological point of view and with the possibility of application in human food. The raw material with thickness of 2 mm and average humidity initial 87.20% was prepared on dryer, using as variables of the process air temperature (43, 49 and 56°C) with a constant air velocity 1 m.s<sup>-1</sup>. After studied of drying kinetics and mathematical modeling (Fick, Page and two empirical parameters) and of the experimental curves to define the best process condition. The temperature influence the values of effective diffusivity. The effective diffusivity with the order of magnitude of 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>. After comparing experimentally obtained values with the calculated values from the models, it was concluded that empirical exponential two parameters model represents the drying characteristics better than the other models. The best drying condition was correspondent to the trial using the highest drying air temperature (56°C) with final humidity of 12.61%.

**Key words:** *Bromelia laciniosa*, convective drying, effective diffusivity

### INTRODUÇÃO

A macambira (*Bromelia laciniosa* M.) é uma bromélia da família Bromeliaceae com produção significativamente representada nos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia (LIMA, 1996). No entanto, deve-se mencionar a escassez de fontes científicas sobre esta grande potencialidade agrícola e energética.

Um fator bem interessante é que sua reprodução, além de ocorrer por meio de sementes, também resulta da formação dos estolhos rizomáticos, os quais surgem entre as bases de duas folhas e adquirem os nutrientes a partir

de seu caule. Este processo reprodutivo torna uma planta genitora de quatro novas plantas (BESSA, 1982). Percebendo-se, assim, uma facilidade de sua propagação, sem grandes necessidades de manejos de cultivo.

Este tubérculo é uma boa fonte para alimentação humana, uma vez que apresenta teor de proteína próximo às farinhas de milho e arroz, boa fonte de amido (63,10%) e minerais, destacando-se um teor quinze vezes maior de cálcio em relação ao leite bovino e três vezes mais elevado que o queijo (BESSA, 1982; VAINSENER, 2010). É importante frisar que um estudo sobre plantas medicinais utilizadas no Nordeste brasileiro apontou a

\*Autor para correspondência

Recebido para publicação em 02/02/2014; aprovado em 23/02/2014

<sup>1</sup> Professora Assistente do Curso Bacharelado em Nutrição; Campus Senador Helvécio Nunes de Barros; Universidade Federal do Piauí – CSHNB/UFPI, Rua Cícero Duarte, nº905, Junco, CEP: 64600-000, Picos, Piauí (PI), Brasil; Telefone: (89) 3422 – 1018, e-mail: julianneportela@ufpi.edu.br

<sup>2</sup> Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos; Departamento de Tecnologia e Química de Alimentos; Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitária, Campus Universitário I, CEP: 58051-900, João Pessoa, Paraíba (PB), Brasil, Telefone: (83) 3216-7357, e-mail: anoarabbas@gmail.com; thayzepessoa1@yahoo.com.br

macambira como detentora de propriedades contra cólicas, febre, diarreia e icterícia (ALBUQUERQUE, 2007).

Desta forma, devido à sua considerável potencialidade agrícola e nutricional a exploração do seu rizoma na elaboração de produtos alimentares com valor agregado pode representar alternativa viável para alimentação humana e de significância ecológica, econômica e social para a Região do Semi-árido.

Com base no exposto, propõe-se uma tecnologia relativamente barata e de fácil acesso como é o caso da secagem convectiva. Este processo sugere a remoção de água ou de qualquer outro líquido de um material sólido, na forma de vapor, para uma fase gasosa insaturada, através de um mecanismo de vaporização térmica, em uma temperatura inferior à de ebulição; consistindo, assim, em um processo de transferência de calor e massa (FORTES & OKOS, 1980).

Em consequência à remoção de água de um material sólido por meio da diferença de potencial de umidade entre o produto e o ar, tem-se um produto seco e com baixa atividade de água; com peso e volume reduzidos, o que facilita o transporte e estocagem, repercutindo, ainda, em maior tempo de conservação e redução nos custos de transporte e manuseio (MURR & AREVALO-PINEDO, 2005; FITO et al., 1996).

## MATERIAL E MÉTODOS

### Matéria-prima

A macambira (*Bromelia laciniosa* Martius) procedente de uma propriedade rural do município de Cabaceiras-PB, foi conduzida ao Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Federal da Paraíba. A matéria-prima, cerca de 5kg, com umidade inicial em torno de 87,20% b.u. (base úmida) foi submetida ao corte em cortador manual de verduras, previamente ajustado a uma espessura de aproximadamente 2,5mm. Em seguida, retiraram-se as raízes com auxílio de uma faca de aço inoxidável esterilizada, com o propósito de assumir a geometria de uma placa plana infinita.

### Processo de secagem convectiva para obtenção da farinha

Utilizou-se um secador de ar convectivo para os testes conduzidos em três temperaturas diferentes (43, 49 e 56°C) com velocidade do ar constante (1,0 m/s). Um termo-higrômetro (Alla France®) foi usado a fim de medir a temperatura de bulbo seca, assim como a umidade do ar de secagem. Enquanto que um anemômetro digital (Velocicheck -TSI®) foi usado para medir a velocidade de ar da secagem. Mantidas essas condições, colocaram-se as amostras na segunda bandeja do secador (de baixo para cima). Sendo, portanto, disposto em cestas de aço inoxidável cerca de 7,50g do material, previamente pesado em balança semi-analítica.

As amostras foram retiradas periodicamente do secador e pesadas em balança semi-analítica (SSR-600),

com a finalização do processo no momento que fosse alcançado o equilíbrio dinâmico entre a amostra e o ar de secagem, ou seja, peso constante com variação máxima de 0,05g.

O equilíbrio dinâmico é exemplificado pela umidade que o material possui, a uma dada temperatura e pressão, em equilíbrio com a umidade da fase gasosa insaturada (FRUTHOTEC, 2001), ou seja, com o ar de secagem. Neste momento, as pressões de vapor na superfície do produto e no ar são iguais (FIOREZE, 2004).

A ponderação dos intervalos de pesagem deu-se da seguinte forma: 15 minutos durante a primeira hora do processamento, 30 minutos para a segunda hora, e intervalo de 60 minutos até que cada ensaio fosse encerrado. Em seguida, o material foi submetido à estufa a vácuo (70°C por 24 horas) para a determinação da matéria seca a ser utilizada no cálculo da cinética de secagem. Os experimentos foram realizados em duplicata.

A cinética de secagem foi estudada mediante as curvas do adimensional de umidade em função do tempo de processo (Eq.1), bem como pelas curvas de taxa de secagem (dX/dt) a qual foi calculada pela derivada da umidade em relação ao tempo (Eq.2)

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

onde:

RX = razão do teor de água, adimensional;

X(t) = teor de água do material em determinado tempo de secagem;

Xo = teor de água do material no início do processo;

Xe = teor de água do material no momento de equilíbrio dinâmico.

$$\text{Taxa de secagem} = \frac{dx}{dt} = \frac{X_{n-1} - X_n}{t_{n-1} - t_n} \quad (2)$$

onde:

t = tempo (minutos); n = número de leituras; dX/dt = taxa de secagem (kg<sub>H2O</sub>/kg<sub>ms.min</sub>); X<sub>n</sub> e X<sub>n-1</sub> = umidade (kg<sub>H2O</sub>/kg<sub>ms</sub>) no tempo n e no tempo n-1.

Realizou-se, também, a modelagem matemática aos dados experimentais das cinéticas de secagem utilizando os modelos Difusional (2ª. Lei de Fick) (Eq.3) (BROOKER et al., 1974; CRANK, 1975), considerando que a amostra apresenta geometria de placa plana infinita; o modelo semi-empírico de Page (Eq.4) (PAGE, 1949) e o modelo empírico exponencial de dois parâmetros (Eq.5).

$$\frac{X_{(t)} - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ \frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2} \right] \quad (3)$$

onde: X<sub>(t)</sub> = umidade média da amostra em um dado tempo t de processo (g/g); X<sub>e</sub> = umidade de equilíbrio (g/g); X<sub>o</sub> = umidade inicial (g/g); (X<sub>(t)</sub> - X<sub>e</sub>)/(X<sub>o</sub> - X<sub>e</sub>) =

razão de umidade decimal, base seca, adimensional;  $D_{ef}$  = difusividade efetiva ( $m^2/s$ );  $t$  = tempo (s) e  $L$  = meia espessura (m).

$$\frac{X(t) - X_e}{X_o - X_e} = \text{Exp}[-K.t^b] \quad (4)$$

onde:

$b$  = parâmetro de ajuste

$K$  = constante de secagem

$$\frac{X(t) - X_e}{X_o - X_e} = A.\text{Exp}[t.B] \quad (5)$$

onde:

$A$  e  $B$  = parâmetros de ajuste

$t$  = tempo

A aplicação dos referidos modelos matemáticos possibilita definir a difusividade efetiva de água ( $D_{ef}$ ) através do produto analisado, para cada condição de secagem. A estimativa da  $D_{ef}$  é realizada a partir de uma média do comportamento global das curvas experimentais de secagem, englobando os efeitos de todos os fenômenos do processo, podendo intervir na migração da água do meio interno ao externo do produto a ser analisado. Considera-se que a fase inicial da secagem (primeira taxa decrescente de secagem) é o período do processo onde se tem uma maior taxa de secagem comparada com a segunda fase, ou seja, período de taxa decrescente de secagem (ANTONIO, 2006).

Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem, realizou-se a análise de regressão não-linear por meio do programa computacional *Statistic 7.0*® (STATSOFT, 2004). A escolha do melhor ajuste dos modelos aos dados experimentais foi realizada pelo cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), entre as respostas observadas e os valores previstos pelo modelo ajustado, e pelo módulo do desvio relativo médio ( $P$ ), definido como a média da porcentagem de diferença relativa entre valores experimentais e preditos, expresso na Eq.6 (LOMAURO; BAKSHI; LABUSA, 1985).

O valor de  $P$  foi obtido pela seguinte expressão:

$$P = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|(M_i - Mp_i)|}{M_i} \quad (6)$$

onde:

$M_i$  = valores obtidos experimentalmente, g

$Mp_i$  = valores preditos pelo modelo, g

$n$  = número de dados experimentais.

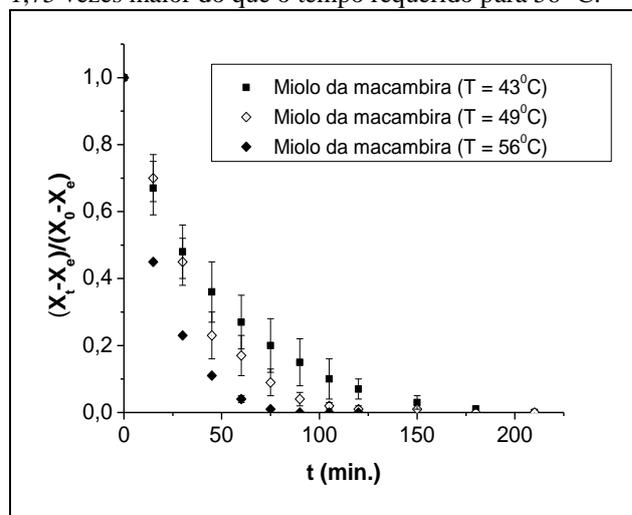
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Cinética de secagem

A representação gráfica da cinética de secagem do miolo da macambira está expressa na Figura 1, na

forma do adimensional da razão de umidade em função do tempo de processo nas várias temperaturas do ar de secagem. E, como resultado aos processos de secagem, tem-se para cada temperatura uma umidade final correspondente, conforme apresentado na Tabela 1.

Observa-se, em cada experimento, um incremento na perda de umidade à medida que avança o tempo de secagem, sendo esta redução da umidade do material mais acentuada no início do processo. O tempo de estabilização em função da temperatura foi de 210 minutos para as condições a 43 °C e 46 °C, e de 120 minutos para 56 °C (Figura 1). Este comportamento revela que o tempo necessário para retirar água contida no miolo de macambira, empregando-se menores temperaturas, é 1,75 vezes maior do que o tempo requerido para 56 °C.



**Figura 1** – Adimensional de umidade em função do tempo para o processo de secagem do miolo da macambira a várias temperaturas de processo

**Tabela 1** – Temperatura de processo de secagem e umidade final do miolo da macambira expresso em base úmida

Temperatura (°C)	Umidade b.u (%)
43	14,12
49	13,86
56	12,61

A temperatura foi o principal fator atuante no processo de secagem empregado na retirada da água contida no miolo da macambira, cujos resultados encontram respaldo em vários pesquisadores por considerarem a temperatura do ar de secagem como o parâmetro que exerce maior influência na secagem dos alimentos. Isto é, o aumento do potencial de secagem está relacionado intimamente com a temperatura do meio do processo (BACELOS, 2002). Entre estes pesquisadores citam-se Kotovicz et al. (2011) e Tripathy & Kumar (2008) ao trabalharem com secagem de yacon desidratado osmoticamente e batata (cultivares Ágata e Markies), respectivamente.

Considerando os desvios-padrões entre os adimensionais de umidade obtidos nos processos de secagem, verifica-se (Figura 1) que não houve diferença entre as temperaturas de 43 °C e 49 °C no período de taxa decrescente. Além disso, o experimento a 56 °C resultou em curva de secagem mais acentuada, apresentando, portanto, uma maior velocidade de processo com tendência ao equilíbrio dinâmico após 75 minutos e umidade final de 12,61% (Tabela 1). Enquanto que as temperaturas de 43 °C e de 49 °C apresentaram tempo para alcance da umidade de equilíbrio de 120 e 105 minutos e umidades finais iguais a 14,12% e 13,86%, respectivamente.

O presente artigo apresentou tempos inferiores necessários para alcançar a umidade de equilíbrio sob todas as condições quando comparado à secagem convectiva de yacon com e sem pré-tratamento osmótico, uma vez que este apresentou para a maior temperatura (60 °C) um tempo mínimo de 2,5 horas (KOTOVICZ et al., 2011) e, também, inferior ao tempo mínimo de 14 horas

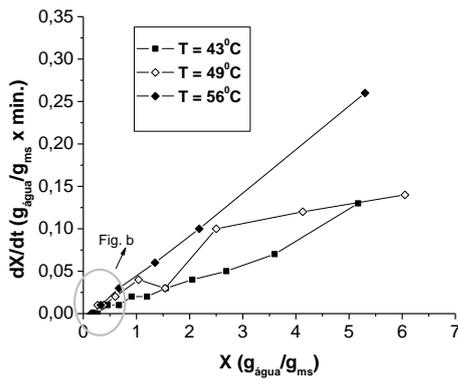
para o alcance do equilíbrio dinâmico de yacon tratado com solução de cloreto de cálcio (PADILHA et al., 2009).

Os dados deste estudo encontram-se também inferiores à pesquisa realizada por Moura (2004), que ao analisar o efeito do pré-tratamento osmótico, utilizando solução de sorbitol, relatou que amostras de yacon sem pré-tratamento e secas a 60 °C em estufa convectiva apresentaram tendência ao equilíbrio em 2,5 horas de secagem. Enquanto que as fatias pré-tratadas osmoticamente alcançaram o equilíbrio dinâmico em 1,75 horas.

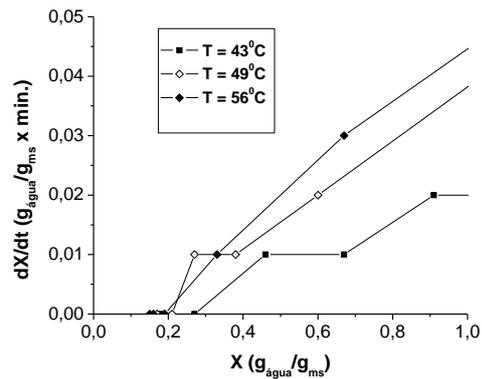
Fioreze & Morini (2000) observaram que o processo de secagem de inhame necessita de 9,3 horas a 50 °C e de 11,5 horas a 45 °C, apresentando, portanto, um material com maior resistência térmica e de saída de água que o miolo de macambira avaliado na presente pesquisa.

As Figuras 2A e 2B apresentam a taxa de secagem em função do conteúdo de umidade em base seca das amostras para o processo de secagem do miolo da macambira a várias temperaturas de processo, de forma a expressar o comportamento estrutural do material nos processos a diferentes temperaturas do ar de secagem.

A



B



**Figura 2** – Taxa de secagem em função do conteúdo de umidade em base seca das amostras para o processo de secagem do miolo da macambira a várias temperaturas de processo. (A) todos os pontos da taxa de secagem e do conteúdo de umidade; (B) ampliação do conteúdo de umidade inferior a 1,00g<sub>água</sub>/g<sub>ms</sub>

A secagem do miolo da macambira ocorreu, especialmente, no período de taxa decrescente. Neste período, a difusão é provavelmente o mecanismo físico que governa o movimento da umidade através da estrutura do alimento (PARK et al., 2002; BENDLIN, 2003), não apresentando um período de taxa constante definido. Esse comportamento pode ser observado na maioria dos produtos biológicos, pois as condições operacionais de secagem são tais que, as resistências de transferência de massa encontram-se essencialmente no interior do produto, fazendo com que a taxa de evaporação da superfície do ar ambiente seja superior à taxa de reposição de umidade do interior à superfície do material (PARK et al., 2007).

Na Figura 2A, observa-se que, por todo o processo, a temperatura do ar de secagem exerceu uma influência diretamente proporcional sobre a taxa de secagem, ou seja, ocorreu transferência de umidade com o aumento da temperatura de processo. Tais índices são mais altos no início do processo de secagem, quando o conteúdo de umidade é maior, ocorrendo um rápido declínio nas taxas de secagem para a amostra estudada. Tem-se, portanto, um comportamento de taxa de secagem exponencial em função da temperatura do ar de secagem, uma vez que os valores desta taxa decrescem rapidamente com a aplicação das diferentes condições de processo.

Na Figura 2B, percebe-se que, para o trecho do processo de secagem com conteúdo de umidade inferior a 1,00g<sub>água</sub>/g<sub>ms</sub>, onde se tem maior resistência para a saída de

água e é considerado o período final da secagem de produtos vegetais, as taxas de secagem continuaram a reduzir. A amostra submetida à maior temperatura de processo apresentou uma secagem uniforme durante todo o ensaio, ou seja, o encolhimento do material foi proporcional à saída de água. Enquanto que as amostras a menores temperaturas tenderam à estabilização em decorrência da acomodação estrutural o que graficamente está representado por alguns setores de secagem semelhantes a degraus. Estes degraus de secagem são visualizados na Figura 2A e 2B pela taxa constante de secagem a diferentes valores de umidade do material.

Pode-se inferir que a secagem a 43 °C não é muito indicada para a obtenção da farinha do miolo da macambira, visto que o uso desta temperatura resultou em teor de umidade próximo ao máximo permitido (15%) para farinha de trigo, de acordo com a legislação brasileira (BRASIL, 2005). Adicionado a isto, tem-se que a execução das outras etapas de obtenção da farinha (moagem e peneiramento) propiciaria ao produto a aquisição de umidade, repercutindo em produto incoerente com a legislação vigente. Por tanto, constata-se que as temperaturas de 56 °C e 49 °C são mais adequadas para gerar um produto farináceo com melhor qualidade tecnológica e legislativa.

### Modelagem matemática da cinética de secagem

Na Figura 3, visualiza-se o ajuste dos dados obtidos a partir do processo de secagem nas três diferentes temperaturas, por meio dos três modelos matemáticos (Fick, Page e modelo exponencial dois parâmetros). Enquanto que, na Tabela 2, verificam-se os dados decorrentes da aplicação da modelagem matemática: difusividade efetiva da água no miolo da macambira ( $D_{ef}$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e desvio relativo médio (P%).

As modelagens matemáticas a partir da aplicação do modelo de Page e modelo exponencial de dois parâmetros apresentaram valores de  $R^2$  superiores ao encontrado no estudo matemático da cinética de secagem de batata dos cultivares Ágata e Markies, os quais foram

maiores que 97% (SANTOS, 2009). Além disso, devido a maioria dos valores de desvio relativo médio serem menores que 10%, justifica-se classificar estes modelos como os que melhor predizem as condições experimentais do estudo, em detrimento ao modelo da 2ª. Lei de Fick.

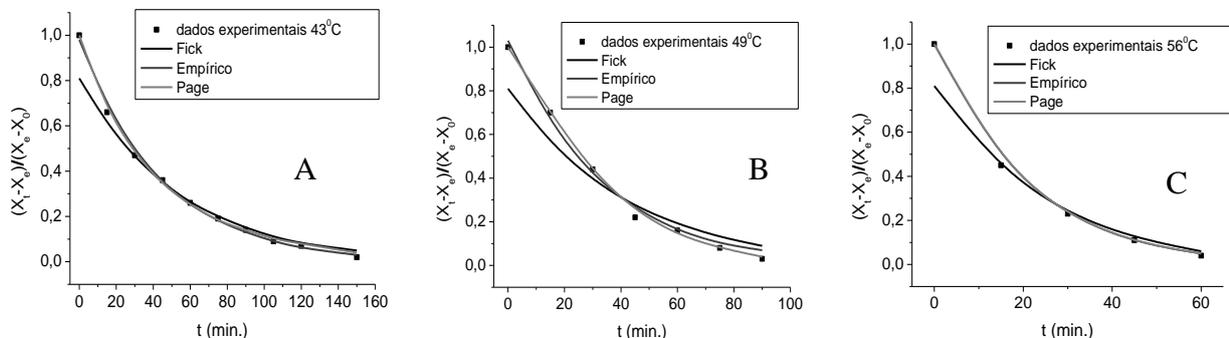
Vale mencionar que, por se tratar de modelos de natureza empírica, essas equações só podem ser usadas para as condições de temperaturas, velocidade do ar e tipo de material biológico estudadas na presente pesquisa.

Na Figura 3A, 3B e 3C, pode ser observada uma proximidade dos dados experimentais aos dados preditos, ou seja, àqueles decorrentes da modelagem matemática.

O modelo de Fick foi o que apresentou menor flexibilidade aos dados experimentais, com coeficientes de correlação ( $R^2$ ) menores que 0,96 e desvio relativo médio (P%) maiores que 10%. Esta menor predição do modelo da 2ª. Lei de Fick também pode ser evidenciada pelos valores de  $R^2$  encontrarem-se mais próximos da unidade (1,00) em todas as condições modeladas matematicamente por Page e pelo modelo exponencial de dois parâmetros, além da maioria dos valores de P% apresentar resultado menor que 10% (Tabela 2).

Considerando o modelo Difusional e o modelo exponencial de dois parâmetros, pode-se inferir que o aumento da temperatura propicia uma maximização no valor da  $D_{ef}$  da água no miolo da macambira, variando de 1,81 a 4,09 e de 2,19 a 4,90, respectivamente, com ordem de grandeza de  $10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Os valores de  $D_{ef}$  da água no miolo da macambira apresentaram ordem de grandeza ( $10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) coerente com a literatura, uma vez que de acordo com Mudamba (1996, apud SILVA et al., 2002) e Zogzas et al. (1996), os produtos biológicos possuem difusividade efetiva de água entre  $10^{-11}$  e  $10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Estes valores são condizentes com o encontrado por Murr (1992) ao submeter fatias de batatas às temperaturas de 35, 45 e 55 °C e velocidade do ar de 0,6 e 0,8  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  e encontrar difusividade efetiva variando de 5,45 a 9,87  $\cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . No entanto, diferem da média encontrada para batata inglesa (4,4415  $\cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) em estudo realizado por Dantas et al. (2009).



**Figura 3** - Modelagem matemática para o processo de secagem do miolo da macambira às várias temperaturas de processo. (A) 43 °C; (B) 49 °C; (C) 56 °C

**Tabela 2** – Resultados de difusividade efetiva da água ( $D_{ef}$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e desvio relativo médio (P%) obtidos a partir das modelagens matemáticas das cinéticas de secagem sob diferentes temperaturas do processo

Temperatura	Modelos matemáticos								
	Fick			Page			Empírico		
	$Def \times 10^{-10}$ (m <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	P(%)	$Def \times 10^{-10}$ (m <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	P(%)	$Def \times 10^{-10}$ (m <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	P(%)
43 <sup>o</sup> C	1,81	0,9532	22,73	4,86	0,9987	15,06	2,19	0,9968	9,92
49 <sup>o</sup> C	2,37	0,9150	46,15	0,53	0,9982	7,59	2,95	0,9908	23,86
56 <sup>o</sup> C	4,09	0,9381	22,92	6,34	0,9993	9,64	4,90	0,9992	8,64

Para Rizvi (1995), o coeficiente de difusão efetivo é dependente da temperatura do ar de secagem, além da variedade e composição dos materiais, dentre outras características.

O estudo de secagem de raiz de chicória demonstrou comportamento semelhante ao do miolo da macambira, uma vez que a  $D_{ef}$  a partir do modelo matemático de Page aumentou com o incremento da temperatura de processo e maiores valores, mas com mesma ordem de grandeza (OLIVEIRA et al., 2006). Estes resultados da influência da temperatura do ar de processo também corroboram com Figueira et al. (2004), Gouveia et al. (1999) e Murr (1992) ao avaliarem secagem de raízes de chicória, gengibre e batatas, respectivamente.

Este comportamento da difusividade efetiva pode ser explicado devido à vibração molecular de água, pois segundo Goneli (2007) a variação do coeficiente de difusão efetivo ocorre com a elevação da temperatura, o que aumenta o nível de vibração molecular das moléculas de água, e contribui para uma difusão mais rápida. Portanto, pode-se mencionar que houve uma maior difusão na temperatura de 56 °C.

## CONCLUSÕES

O miolo da macambira apresentou uma taxa de secagem uniforme para as três temperaturas avaliadas, observando-se um incremento nos valores da difusividade efetiva da água com o aumento na temperatura do processo de secagem com aplicação dos modelos de Fick e exponencial de dois parâmetros, sendo esta da ordem de  $10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Frente aos resultados comentados e à representação satisfatória das cinéticas de secagem sob as diferentes temperaturas, define-se o modelo empírico exponencial de dois parâmetros como o que melhor prediz os dados experimentais de tais processos.

Constatou-se, ainda, que a temperatura de 56 °C mostrou-se como a mais indicativa de gerar um produto seco com melhor qualidade tecnológica para a obtenção de produto farináceo, uma vez que o teor de umidade final encontra-se abaixo do máximo permitido pela legislação

brasileira, além de apresentar uma perda de água proporcional ao encolhimento do material.

Este estudo mostra que a secagem convectiva do miolo da macambira apresenta reflexos positivos ao setor agroindustrial, podendo repercutir em impacto positivo na dieta humana.

## Agradecimentos

CNPq

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, U. P.; MEDEIROS, P. M.; ALMEIDA, A. L. S.; MONTEIRO, J. M.; LINS NETO, E. M. F.; MELO, J. G.; SANTOS, J. P. Medicinal plants of the caatinga (semi-arid) vegetation of NE Brazil: A quantitative approach. *J. Ethnopharmacology*. v.114, p.325-354. 2007.
- ANTONIO, G. C. *avaliação do efeito dos pré-tratamentos de desidratação osmótica e secagem HTST na obtenção de snacks de batata doce (Ipoemoea batatas Lam)*. 2006. Tese (Doutor em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- BACELOS, M. *Análise experimental e modelagem da cinética de secagem de batata considerando o fenômeno de encolhimento*. São Carlos: UFSCar, 2002, 108p. (Dissertação de Mestrado).
- BENDLIN, R. C. S. *Secagem convectiva de erva-mate (Ilex paraguariensis)*. 2003. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)-Departamento de Engenharia Química e de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- BESSA M. N. *A macambira (Bromélia forrageira)*. 2. ed. Natal: EMPARN/Coleção Mossoroense, 1982. 135 p.
- BRASIL. Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n° 8 de 03 jun.

2005. Aprova Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade da Farinha de Trigo. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*. Brasília, DF, 03 jun. 2005, Seção 1, n.105, p. 91.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. *Drying Cereal/Grains*. Connecticut: The AVI Publishing Company, 1974. 265p.
- CRANK, J. *The Mathematics of Diffusion*. 2. ed. Oxford: Clarendon Press, 1975. 414p.
- DANTAS, T. N. P.; SOUZA JUNIOR, F. E.; SOUZA, D. F. S.; MEDEIROS, M. F. D. Estudo da transferência de calor e massa e da cinética de secagem em placas planas de batata inglesa (*Solanum tuberosum* L.). VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. 2009. Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- FIGUEIRA, G.M.; PARK, K.J.; BROD, F.P.R.; HONÓRIO, S.L. Evaluation of desorption isotherms, drying rates and inulin concentration of chicory roots (*Cichorium intybus* L.) with and without enzymatic inactivation. *Journal of Food Engineering*, Oxford, v.63, n.3, p.273-80, 2004.
- FIGOREZE, R. *Princípios de Secagem de Produtos Biológicos*. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2004. 229p.
- FIGOREZE, R.; MORINI B. Yam (*Discorea* sp) drying with different cuts and temperatures: experimental and simulated results, Campinas. *Ciênc. Tecnol. Aliment.* v.20, n.2, p. 262-266. 2000.
- FITO, P.; ANDRÉS, A.; CHITALT, A.; PARDO, A.; FITO, P. Coupling of hydrodynamic Mechanism and deformation-relaxation phenomena during vacuum treatments in solid porous food-liquid systems, Kidlington. *J. Food Eng.* v.27, n.3, p. 229-240. 1996.
- FORTES, M.; OKOS, M. P. Changes in physical properties of corn during drying, St. Joseph, Michigan. *Transactions of ASAE*. v.23, n.4, p.1004 – 1008. 1980.
- FRUTHOTEC. *Desidratação de frutas e hortaliças: Manual técnico*. Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL), 2001.
- GONELI, A. L. D.; *Dinâmica da variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade das sementes de mamona (Ricinus communis L.) durante a secagem e o armazenamento sob condições controladas*. Viçosa: UFV, 2007. 192 p. Tese Doutorado.
- GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A. C.; MURR, F. E. X. Estudo da difusividade e do encolhimento do gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) durante a secagem. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.1, n.1, p.51-58, 1999.
- KOTOVICZ, V.; ELLENDERSEN, L. S. N.; MASSON, M. L. Estudo da secagem convectiva de yacon (*Polymnia sonchifolia*) desidratado osmoticamente. III Encontro Paranaense de Engenharia de Alimento DEALI/UNICENTRO .2011.
- LIMA, J. L. S. *Plantas forrageiras das caatingas - usos e potencialidades*. Petrolina, PE: EMBRAPA-CPATSA/PNE/ERG-KEW, 1996. 44p.
- LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A. S.; LABUSA, T.P. *Evaluation of food moisture sorption isotherm equations*. Part I: fruit, vegetable and meat products, Cidade. Lebensmittel- Wissenschaft and Technologies. v.18, n.2, p. 111-117. 1985.
- MOURA, C. P. *Apliação de redes neuronais para a predição e otimização do processo de secagem de yacon (Polymnia sonchifolia) com pré-tratamento osmótico*. (Dissertação de Mestrado – Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná), 107p, 2004.
- MURR, F.E.X. *Estudo comparativo dos fenômenos de secagem de batata (Solanum tuberosum, L. Cultivar Bintje)*. Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos. 1992. 188p. (Tese de Doutorado).
- MURR, F. E.; ARÉVALO-PINEDO, A. Influência da pressão, temperatura e prétratamentos na secagem a vácuo de cenoura e abóbora, Campinas. *Ciênc Tecnol Aliment.* v.25, n.4, p.636-643. 2005.
- OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v.26, n.1, p.181-189, jan./abr. 2006.
- PADILHA, V. M.; ROLIM, P. M.; SALGADO, S. M.; LIVERA, A. V. S.; OLIVEIRA, M. G. Tempo de secagem e da atividade de óxido-redutases de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) sob tratamento químico, Santa Maria. *Ciência Rural*. v.39, n.7, p.2178-2184. 2009.
- PAGE, G. E. *Factors influencing the maximum of air drying shelled corn in thin layer*. 1949. [Dissertação de Mestrado]. Indiana, USA: Purdue University, 1949.
- PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. DE; PARK, K. J. B. *Conceitos de processos e equipamentos de secagem*. Campinas: UNICAMP, 2007. Disponível

em:

<<<http://www.feagri.unicamp.br/cetea/projpesq.html>>>  
. Acesso em 03 de junho de 2012.

PARK, K.J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Drying of pear d'Anjou with and without osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, v. 56, p. 97-103, 2002.

RIZVI, S. S. H. *Thermodynamic properties of food in dehydration*. In: Rao, M. A.; Rizvi, S. S. H. (eds.) *Engineering properties of foods*. New York: Marcel Dekker Inc, 1995. cap. 7. p. 223-309.

SANTOS, A.P. *Farinha de batata (Solanum tuberosum L.): obtenção, caracterização físico-química, funcional, elaboração e caracterização de sopas desidratadas*. Itapetinga, Bahia: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 2009. 105p.

SILVA, M.; FREITAS, A. A.; KWIATKOWSKI, A.; NUNES, S. C.; ROUILLER, C. O. 2002. Processamento e caracterização físico-química da farinha de batata. In: XI Encontro Anual de Iniciação Científica, 2002, Maringá. Anais do XI EAIC.

STATSOFT. *Statistica for windows*, Tulsa, USA, 2004.

TRIPATHY, P. P.; KUMAR, S. Determination of temperature dependent drying parameters for potato cylinders and slices during solar drying. *Energy Conversion and Management*, v. 49, p. 2941–2948, 2008.

VAINSENCER, S. A. *Macambira*. Pesquisa Escolar On-Line, *Fundação Joaquim Nabuco*, Recife. 2010. Disponível em: <<http://www.fundaj.gov.br>>. Acesso em: 25 de maio de 2012.

ZOGZAS, N. P.; MAUROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, Bangkok, v.14, n.10, p.2225-2253, 1996.