

# Secagem de fatias de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão-impregnação: cinética e avaliação de modelos

*Assessment of convective drying models for fresh and osmo-dehydrated pineapple rings*

Rafael Gomes DIONELLO<sup>1</sup>, Pedro Amorim BERBERT<sup>2\*</sup>, Marília Amorim Berbert de MOLINA<sup>3</sup>, Rozimar de Campos PEREIRA<sup>4</sup>, Alexandre Pio VIANA<sup>5</sup>, Vinicius de Oliveira CARLESSO<sup>2</sup>

## Resumo

O presente estudo teve como objetivos investigar o efeito da impregnação de sacarose e de açúcar invertido na taxa de secagem por convecção de abacaxi e avaliar a adequação de nove modelos matemáticos na descrição das curvas de secagem. Os testes experimentais foram feitos empregando-se coroas circulares de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão-impregnação em soluções de sacarose (0,40, 0,44 e 0,47 g.mL<sup>-1</sup>) e em xarope de açúcar invertido. A pré-desidratação osmótica foi realizada a 40 e 50 °C, por 2 horas, sob agitação de 60 min<sup>-1</sup>. A secagem por convecção foi feita em secador do tipo gabinete com bandejas, a 60 °C e 1,25 m.s<sup>-1</sup>. O grau de ajuste dos modelos foi avaliado por meio do coeficiente de determinação, da raiz do erro quadrático médio, do erro percentual absoluto médio e por análise de dispersão de resíduos. As maiores taxas de secagem foram obtidas para amostras in natura; naquelas pré-desidratadas osmoticamente, o aumento da concentração da solução ocasionou a diminuição da taxa de secagem. O modelo de Wang e Singh foi o que melhor descreveu a secagem por convecção de coroas circulares de abacaxi.

**Palavras-chave:** *Ananas comosus (L.) Merrill; desidratação osmótica; frutas desidratadas.*

## Abstract

The effect of glucose and invert sugar impregnation on the convective drying rate of pineapple and the suitability of nine mathematical models to describe the drying curves were investigated. Tests were conducted using fresh pineapple rings and samples which were pre-treated by osmotic dehydration in sucrose solutions (0.40, 0.44, and 0.47 g mL<sup>-1</sup>) and in invert sugar syrup. Osmotic pre-treatments were performed at 40 and 50 °C for 2 hours at 60 min<sup>-1</sup>. The convective drying was performed in a tray cabinet dryer using heated ambient air at 60 °C and 1.25 m.s<sup>-1</sup>. The adjustment levels of the models were based on the correlation coefficient, the root mean square error, mean absolute percentage error, and residual plot analysis. The highest rates of convective drying were obtained for the fresh samples. In the osmotically pre-treated fruits, with both temperatures, an increase in the solution concentration was followed by a decrease in the convective drying rate. The Wang and Singh model was considered the most adequate in describing the convective drying of pineapple rings.

**Keywords:** *Ananas comosus (L.) Merrill; osmotic dehydration; dried fruits.*

## 1 Introdução

A demanda por alimentos processados que mantenham suas características as mais próximas possíveis dos produtos originais tem aumentado sensivelmente nas duas últimas décadas. No que se refere ao processamento industrial, seja em grande ou pequena escala, há a necessidade de desenvolver tecnologias que contribuam para minimizar os efeitos adversos provocados nos alimentos pelo processamento, de forma a atender a crescente exigência por produtos de melhor qualidade por parte dos consumidores. Esse é o caso das frutas desidratadas utilizadas para consumo imediato ou como ingredientes na formulação de diversos tipos de alimentos, tais como em produtos de confeitaria, sorvetes, sobremesas congeladas, saladas de frutas e iogurtes. Em todos esses casos é desejável que os

ingredientes mantenham a cor, o aroma e o sabor o mais próximo da fruta in natura, preferencialmente sem a utilização de aditivos, e proporcionando uma textura agradável ao alimento depois do processamento. A associação de operações e processos adequados durante a fabricação de determinado alimento pode garantir a manutenção dessas qualidades no produto final (TORREGIANNI; BERTOLO, 2001).

Na maioria dos casos, o objetivo da combinação de métodos de preservação durante o processamento de alimentos é conseguir que as alterações nas propriedades originais da matéria-prima ocorram de forma controlada, possibilitando o aumento da vida útil do produto. Essas combinações de proces-

Recebido para publicação em 23/10/2007

Aceito para publicação em 17/3/2008 (002937)

<sup>1</sup> Departamento de Fitossanidade, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 7712, CEP 91540-000, Porto Alegre - RS

<sup>2</sup> Laboratório de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Av. Alberto Lamego 2000, CEP 28013-602, Campos dos Goytacazes - RJ, Brasil, E-mail: pberbert@uenf.br

<sup>3</sup> Laboratório de Biotecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF

<sup>4</sup> Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, CEP 44380-000, Cruz das Almas - BA, Brasil

<sup>5</sup> Laboratório de Melhoramento Genético Vegetal, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF

\*A quem a correspondência deve ser enviada

sos devem vir, preferencialmente, acompanhadas de reduções no consumo de energia e no impacto sobre o meio ambiente, além de uma melhoria na segurança alimentar associada ao produto. Embora alguns dos métodos de conservação, como o branqueamento, a pasteurização e o congelamento, tenham como efeito imediato a estabilização do produto, outros métodos, como a combinação da pré-desidratação por imersão-impregnação com a secagem por convecção, permitem que as propriedades do material sejam favoravelmente alteradas. A inclusão de uma etapa de pré-tratamento osmótico na secagem de frutas tem sido considerada por diversos pesquisadores como decisiva na obtenção de produtos desidratados de melhor qualidade final (KARATHANOS; KOSTAROPOULOS; SARAVACOS, 1995; TORREGIANNI; BERTOLO, 2001).

A secagem por convecção é um dos métodos mais utilizados para a conservação de frutas por meio da redução do seu teor de água até níveis entre 10 e 25% base úmida (b.u.), porém, trata-se de operação que normalmente reduz a qualidade do produto ao alterar suas características originais relacionadas à aparência (FORNI et al., 1997; KROKIDA; TSAMI; MAROULIS, 1998), à consistência (LEWICKI; LUKASZUK, 2000; MALTINI et al., 1993) e ao sabor (GIANGIACOMO et al., 1994; LENART, 1996). No entanto, a combinação dos processos de pré-desidratação por imersão-impregnação e secagem por convecção, permite a obtenção de produtos desidratados que conservam características sensoriais e nutricionais mais próximas daquelas observadas na fruta in natura (SANKAT; CASTAIGNE; MAHARAJ, 1996; SILVEIRA; RAHMAN; BUCKLE, 1996; FORNI et al., 1990).

O conhecimento do efeito do pré-tratamento osmótico sobre a taxa de secagem por convecção pode auxiliar no estabelecimento das melhores condições operacionais deste sistema combinado de preservação de frutas. Ademais, as características de secagem de qualquer produto, incluindo a avaliação dos modelos matemáticos que melhor descrevem o processo, são importantes na seleção e desenvolvimento de equipamentos e no cálculo dos custos operacionais. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivos investigar o efeito da pré-desidratação por imersão-impregnação de soluções de sacarose e xarope de açúcar invertido sem diluição na taxa de secagem por convecção de abacaxi e avaliar a adequação de nove modelos matemáticos na descrição das curvas de secagem.

## 2 Material e métodos

Foram utilizados 27 frutos de abacaxizeiro (*Ananas comosus* (L.) Merrill var. *Smooth Cayenne* fornecidos por produtores das regiões norte e noroeste do Estado do Rio de Janeiro. A colheita foi realizada quando os frutos apresentavam os centros dos frutinhos amarelos (subgrupo "pintado"). Foram selecionados apenas frutos com massa entre 1,8 e 2,1 kg (Classe 4), que, depois de transportados para o laboratório, foram armazenados em câmaras do tipo B.O.D., a 10 °C, sendo retirados apenas para a realização do experimento.

Depois de removidas as coroas, os frutos foram lavados em água corrente e imersos em solução de detergente comercial neutro a 1% por 15 minutos, para higienização e, finalmente, submergidos em água clorada (8 a 10 ppm de cloro ativo) por

10 minutos, para sanitização. Esse procedimento foi seguido de enxágue com água destilada. Os frutos foram então cortados manualmente no formato de rodela. Para homogeneização do tamanho das amostras, foram utilizadas apenas aquelas retiradas da porção equatorial dos frutos. Depois da remoção do eixo central, as coroas circulares de abacaxi apresentavam as seguintes dimensões médias: diâmetro externo de  $97 \pm 3$  mm, diâmetro interno de  $31 \pm 4$  mm e espessura de  $10 \pm 2$  mm. Logo em seguida, as amostras foram submetidas ao branqueamento. Nesse processo, as fatias foram expostas ao vapor d'água por 1 minuto, sendo transferidas imediatamente depois para sacos plásticos e resfriadas em banho de gelo por 1 minuto. Em seguida, as amostras foram imersas em solução de ácido ascórbico a 1%, por 5 minutos.

As soluções para pré-desidratação por imersão-impregnação foram preparadas com água destilada, empregando-se dois tipos de agente osmótico: sacarose, fornecida na forma de açúcar cristal do tipo exportação pela Usina Sapucaia S/A, de Campos dos Goytacazes - RJ e açúcar líquido invertido, com taxa de inversão maior que 90%, com nome comercial Gludex 216 e fornecido pela Dulcini Alimentos - SP. A pré-desidratação por imersão-impregnação foi realizada empregando-se três concentrações da solução de sacarose, 0,40, 0,44 e 0,47 g.mL<sup>-1</sup>, e xarope de Açúcar Invertido Sem Diluição (AISD). Depois da imersão em ácido ascórbico, as amostras foram transferidas para béqueres de 1000 mL (uma amostra por béquer), contendo as soluções com diferentes tipos de agente osmótico e em diferentes concentrações, empregando-se sempre a relação fruta:xarope de 1:10 (em massa). Os béqueres foram dispostos em agitadoras-incubadoras de bancada (B. Braun Biotech, modelo Certomat U/Certomat HK) de movimento orbital. Neste experimento, foram avaliadas duas temperaturas de pré-desidratação por imersão-impregnação, 40 e 50 °C, para nível de agitação da solução de desidratação de 60 min<sup>-1</sup> e tempo de imersão de 2 horas.

Além dos testes que incluíram uma etapa prévia de desidratação por imersão-impregnação, em que as amostras foram posteriormente secadas por convecção, foi utilizado um tratamento controle adicional, sem a pré-desidratação osmótica. Nesse tratamento, as amostras in natura também foram branqueadas e imersas em solução de ácido ascórbico antes da secagem.

A secagem por convecção foi realizada utilizando-se um protótipo de secador de bandejas, fabricado pela Indústria e Comércio de Máquinas Polidryer Ltda., capaz de fornecer condições controladas de temperatura e vazão do ar de secagem. A câmara de secagem é composta por três bandejas de 0,50 x 0,62 m, construídas de malha de aço galvanizada, dispostas horizontalmente de forma a proporcionar fluxo de ar tangencial. A secagem por convecção foi realizada dispondo as amostras em pequenas bandejas (0,15 x 0,15 m) com fundo perfurado, construídas de malha de alumínio e que foram, posteriormente, colocadas sobre as bandejas principais do secador. A secagem foi feita empregando-se apenas um nível de temperatura e velocidade do ar de secagem, 60 °C e 1,25 m.s<sup>-1</sup>, respectivamente.

A determinação do teor de água ao longo do processo de secagem foi feita por gravimetria, pesando-se as amostras no instante inicial, aos 15, 45, 75 e 120 minutos e de 60 em 60 minutos a partir dos 120 minutos, até o final da secagem. A secagem foi

interrompida quando as amostras atingiram teor de água no intervalo entre 15 e 18% b.u. O teor de água foi determinado antes do início da secagem, ou seja, ao final da pré-desidratação por imersão-impregnação, e ao final do processo de secagem, empregando-se estufa a vácuo a 70 °C, por 24 horas, conforme metodologia empregada por Park, Bin e Brod (2002) e por Moreira e Sereno (2003).

O delineamento estatístico utilizado foi o inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 4 x 2 (concentração da solução osmótica x temperatura de desidratação), com um tratamento controle adicional, sem a pré-desidratação osmótica, todos com três repetições, totalizando 27 unidades experimentais. Os dados experimentais de secagem por convecção foram ajustados aos nove modelos matemáticos de secagem apresentados na Tabela 1, em que k, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub>, a, b, c, g e h, representam as constantes dos modelos, RU é a razão de umidade e t é tempo de secagem.

As análises de regressão não-linear foram feitas utilizando-se o programa computacional STATGRAPHICS. O critério para escolha do modelo mais adequado foi a avaliação quantitativa dos seguintes parâmetros, em ordem decrescente de importância: 1. o maior valor do coeficiente de determinação (r<sup>2</sup>); 2. o menor valor da raiz do erro quadrático médio (REQM); 3. o menor erro percentual absoluto médio (η). Estes também foram os critérios empregados, com diferentes níveis de importância, por Lomauro, Bakshi e Labuza (1985), Madamba, Driscoll e Buckle (1996), Kobayashi e Salam (2000), Dandamrongrak, Young e Mason (2002), Toğrul e Pehlivan (2003), Ertekin e Yaldiz (2004) e Lahsani et al. (2004), na avaliação de modelos matemáticos de secagem de produtos agrícolas. Além disso, a escolha dos modelos mais apropriados foi feita a partir da análise da dispersão dos resíduos (CHEN; WU, 2001, CORRÊA et al., 2002; ABALONE et al., 2006).

As Equações 1 e 2 foram utilizadas para o cálculo de REQM e η, em que RU<sub>est</sub> representa a razão de umidade estimada pelo modelo, RU<sub>exp</sub> representa a razão de umidade experimental e N representa o número de observações durante o experimento.

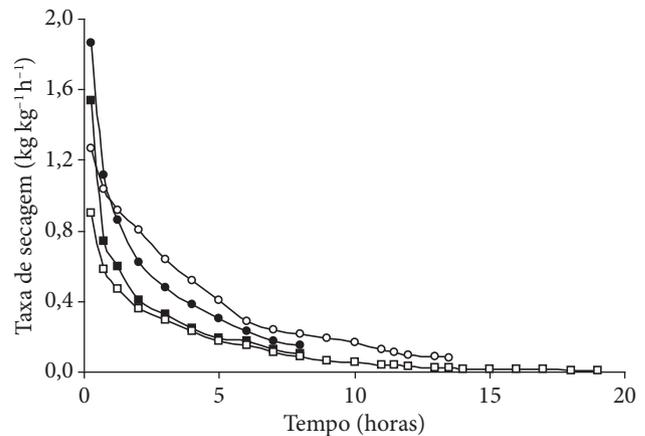
$$REQM = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - RU_{est,i})^2 \right]^{1/2} \tag{1}$$

$$\eta = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{|RU_{exp,i} - RU_{est,i}|}{RU_{exp,i}} \right) \tag{2}$$

### 3 Resultados e discussão

#### 3.1 Cinética da secagem de abacaxi in natura e pré-desidratado por imersão-impregnação

Apresentam-se, na Figura 1, as curvas de variação da taxa de secagem por convecção, a 60 °C, em função do tempo, para coroas circulares de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão-impregnação, a 40 °C, em soluções de sacarose e em xarope de açúcar invertido sem diluição. As curvas correspondentes para amostras pré-desidratadas a 50 °C encontram-se na Figura 2. Nessas figuras, a taxa de secagem encontra-se expressa em kg de água evaporada por kg de matéria seca, por hora de secagem, ou seja, kg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. Observa-se, para amostras pré-desidratadas a 40 °C (Figura 1), que o efeito da impregnação de sólidos sobre a taxa de secagem começa a se tornar definido entre 0,75 e 1,25 horas de secagem. A partir desse intervalo inicial, verifica-se que as maiores taxas de secagem ocorreram para amostras in natura e, as menores, para as amostras que foram pré-desidratadas em xarope de açúcar invertido sem diluição. As curvas representativas da taxa de secagem das amostras submetidas à pré-desidratação por imersão-impregnação em

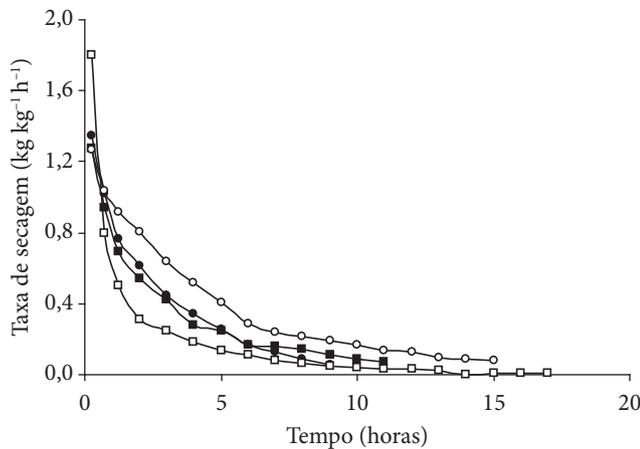


**Figura 1.** Variação da taxa de secagem por convecção, a 60 °C, em função do tempo de secagem, de coroas circulares de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão-impregnação a 40 °C. □, xarope de açúcar invertido sem diluição; ■, solução de sacarose 0,47 g.mL<sup>-1</sup>; ●, solução de sacarose 0,40 g.mL<sup>-1</sup>; ○, in natura, sem a pré-desidratação osmótica.

**Tabela 1.** Modelos matemáticos de secagem avaliados no presente trabalho.

Nome do modelo	Equação
Lewis	RU = exp (-kt)
Exponencial simples, dois parâmetros	RU = a exp (-kt)
Exponencial simples, três parâmetros	RU = a exp (-kt) + c
Exponencial duplo, dois parâmetros	RU = a exp (-kt) + (1 - a) exp (-kat)
Exponencial duplo, três parâmetros	RU = a exp (-kt) + (1 - a) exp (-kbt)
Exponencial duplo, quatro parâmetros	RU = a exp (-k <sub>0</sub> t) + b exp (-k <sub>1</sub> t)
Verma e colaboradores	RU = a exp (-kt) + (1 - a) exp (-gt)
Exponencial triplo, seis parâmetros	RU = a exp (-kt) + b exp (-gt) + c exp (-ht)
Wang e Singh	RU = 1 + at + bt <sup>2</sup>

Fonte: Ertekin e Yaldiz (2004).



**Figura 2.** Variação da taxa de secagem por convecção, a 60 °C, em função do tempo de secagem, de coroas circulares de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão-impregnação a 50 °C. □, xarope de açúcar invertido sem diluição; ■, solução de sacarose 0,44 g.mL<sup>-1</sup>; ●, solução de sacarose 0,40 g.mL<sup>-1</sup>; ○, in natura, sem a pré-desidratação osmótica.

soluções de sacarose encontram-se localizadas entre as duas curvas mencionadas anteriormente; nesse caso, quanto maior a concentração da solução, menor a taxa de secagem. O comportamento das curvas representativas da taxa de secagem por convecção das amostras pré-desidratadas a 50 °C é similar àquele observado para amostras submetidas à pré-desidratação por imersão-impregnação a 40 °C. No entanto, para pré-desidratação a 50 °C, o aumento da concentração da solução nem sempre resultou na diminuição da taxa de secagem (Figura 2).

A obtenção de menores taxas de secagem para amostras de abacaxi que foram imersas em xarope de açúcar invertido sem diluição deve-se, provavelmente, à ação conjunta de dois fatores. Em primeiro lugar, trata-se de solução com maior teor de sólidos solúveis totais (SST) (70 °Brix), quando comparado com os teores de SST das soluções de sacarose nas concentrações de 0,40, 0,44 e 0,47 g.mL<sup>-1</sup>, que foram de 35, 37 e 39 °Brix, respectivamente. Além disso, o xarope de açúcar invertido sem diluição, por conter moléculas menores, glicose e frutose, quando comparadas à sacarose, penetra mais facilmente nos tecidos da camada superficial da fruta, impregnando-os mais intensamente, de forma a dificultar a saída de água do seu interior, reduzindo assim a taxa de secagem (RAOULT-WACK, 1994).

Ao realizar estudo histológico de fatias de maçã submetidas à pré-desidratação por imersão-impregnação em xarope de frutose e de sacarose, Bolin et al. (1983) mostraram que nos primeiros 30 minutos de processo a penetração de ambas as moléculas deu-se de forma muito similar, perfazendo uma distância de 1 a 2 mm da superfície da amostra. Da mesma forma, considerando-se as três primeiras horas de imersão, as taxas de migração foram essencialmente as mesmas para ambos os açúcares. Com o decorrer do tempo, no entanto, a frutose passou a ser mais absorvida que a sacarose e, depois de 5 horas, as fatias imersas no xarope de frutose tinham absorvido 70% a mais de sólidos que aquelas em solução de sacarose.

Para teores de água inferiores a 66% b.u., Karathanos, Kostaropoulos e Saravacos (1995) não observaram diferença entre as taxas de secagem de cilindros de maçã pré-desidratados osmoticamente em soluções de glicose, nas concentrações de 15, 30 e 45%, e nas amostras in natura. No entanto, a difusividade efetiva da água nas amostras impregnadas com glicose foi significativamente menor que a observada nas amostras in natura durante todo o processo de secagem por convecção. Ramaswamy e Nsonzi (1998) estudaram a cinética da secagem por convecção (50 °C) de “blueberries” in natura e pré-desidratados por imersão em soluções de sacarose e observaram maior taxa de secagem nas amostras sem o pré-tratamento osmótico.

Nieto, Castro e Alzamora (2001) avaliaram o efeito da pré-desidratação por imersão-impregnação em xaropes de glicose nas concentrações de 22 e 40% sobre a cinética do transporte de água durante a secagem de fatias de manga por convecção em ar aquecido a 60 °C e observaram que a pré-desidratação osmótica alterou a secagem, diminuindo a taxa de transferência de massa; o aumento da concentração de glicose na solução de desidratação, com o consequente aumento da impregnação do soluto na camada superficial do produto, provocou a redução da difusividade efetiva da água presente na fruta.

Park, Bin e Brod (2002) observaram maior taxa de secagem em cubos de pera pré-desidratados osmoticamente em solução a 55 °Brix e 40 °C do que em amostras in natura, apenas para os casos em que o teor de água inicial do produto foi superior a 50% b.u. Os autores atribuíram esse resultado ao endurecimento da camada superficial das amostras da fruta, observado apenas no produto in natura, o que dificultou o transporte de massa durante a secagem por convecção a 40, 60 e 80 °C. El-Aouar, Azoubel e Murr (2003) compararam a cinética de secagem de cubos de mamão in natura e pré-desidratados em solução de sacarose a 70 °Brix e observaram que a utilização de uma etapa prévia de desidratação osmótica influenciou negativamente a taxa de secagem por convecção a 40 e 60 °C e velocidades de 1,25 e 3,25 m.s<sup>-1</sup>.

Mesmo que a secagem de produtos pré-desidratados osmoticamente seja mais lenta, existe a vantagem de a impregnação de sólidos, e a consequente redução da permeabilidade dos tecidos da camada superficial dos frutos, além da redução da difusividade aparente da água, atuarem como fatores benéficos na manutenção da estabilidade da fruta desidratada durante o armazenamento (KARATHANOS; KOSTAROPOULOS; SARAVACOS, 1995). Como pré-tratamento, os efeitos da desidratação por imersão-impregnação estão relacionados, principalmente, à melhoria de algumas propriedades nutricionais, sensoriais e funcionais do produto. O processo permite, além disso, menor gasto de energia se comparado com a secagem feita integralmente por convecção (BOLIN et al., 1983; MALTINI et al., 1993). Relatos na literatura mostram que parâmetros como a cor, o *flavour* e a textura de frutas e vegetais sensíveis à secagem ao ar, à desidratação a vácuo ou à liofilização, foram melhorados quando uma etapa prévia de desidratação osmótica foi utilizada (LAZARIDES; GEKAS; MAVROUDIS, 1997). O uso de temperaturas moderadas de operação, bem como o fato da água ser removida do alimento

sem que haja nenhuma mudança de fase, contribui, também, para a melhoria da qualidade do produto final.

O escurecimento não enzimático, tanto aquele resultante da condensação de açúcares redutores com aminoácidos ou aquele decorrente da conversão da clorofila em feofitina, é responsável pela maior parte dos problemas de escurecimento de frutas durante os processos de secagem convencional. Desta forma, a impregnação de solutos, devido à ação protetora dos sacarídeos, aumenta a estabilidade dos pigmentos durante o processamento e o subsequente período de armazenagem, resultando, assim, em produtos com qualidade mais próxima da fruta in natura, mais naturais e de maior aceitabilidade por parte dos consumidores (MALTINI et al., 1993; TORREGGIANI, 1993; FORNI et al., 1997).

### 3.2 Avaliação do grau de adequação dos modelos às curvas de secagem de coroas circulares de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão-impregnação

Apresentam-se, na Tabela 2, os valores dos parâmetros estatísticos ( $r^2$ , REQM e  $\eta$ ) utilizados para avaliar a ade-

quação dos modelos matemáticos apresentados na Tabela 1, aos dados experimentais de secagem de coroas circulares de abacaxi pré-desidratadas por imersão-impregnação a 40 °C, como também os resultados relativos à secagem das amostras in natura, ou seja, aquelas que não foram submetidas à pré-desidratação osmótica. Os valores correspondentes para secagem de amostras pré-desidratadas por imersão-impregnação a 50 °C encontram-se na Tabela 3. Considerando-se apenas o coeficiente de determinação  $r^2$  como parâmetro de comparação entre os diversos modelos, observa-se que os melhores graus de ajuste foram obtidos para as curvas de secagem das amostras de abacaxi pré-desidratadas por imersão-impregnação e, dentre estas, os maiores valores de  $r^2$  foram geralmente obtidos para as curvas de secagem das amostras pré-desidratadas em xarope de açúcar invertido sem diluição. Dentre os modelos avaliados, aqueles com os maiores valores de  $r^2$ , e com desempenhos praticamente similares, foram os modelos Exponencial simples de três parâmetros e o de Wang e Singh. Considerando-se apenas a secagem das amostras in natura e daquelas pré-desidratadas osmoticamente a 40 °C, observa-se que o modelo Exponencial duplo de três parâmetros também apresenta desempenho satisfatório na descrição das curvas de secagem. No entanto, na

**Tabela 2.** Grau de adequação ( $r^2$ , REQM e  $\eta$ ) dos nove modelos matemáticos apresentados na Tabela 1, na descrição da secagem por convecção, a 60 °C, de coroas circulares de abacaxi in natura e previamente desidratadas por 2 horas a 40 °C, em soluções de sacarose a 0,40, 0,44 e 0,47 g.mL<sup>-1</sup> e em xarope de açúcar invertido sem diluição (AISD).

Nome do modelo	Índice de desempenho dos modelos	Valor do índice de desempenho				
		DII a 40 °C			AISD	In natura
		Concentração das soluções de sacarose (g.mL <sup>-1</sup> )				
		0,40	0,44	0,47		
Lewis	$r^2$	0,947	0,953	0,937	0,975	0,864
	REQM	0,076	0,054	0,062	0,020	0,073
	$\eta$	41,008	11,660	15,787	5,099	21,536
Exponencial simples, dois parâmetros	$r^2$	0,956	0,958	0,943	0,977	0,886
	REQM	0,068	0,051	0,057	0,017	0,066
	$\eta$	36,463	10,756	14,465	4,896	18,217
Exponencial simples, três parâmetros	$r^2$	0,990	0,986	0,974	0,981	0,969
	REQM	0,049	0,026	0,021	0,049	0,036
	$\eta$	29,118	7,586	5,320	18,480	9,227
Exponencial duplo, dois parâmetros	$r^2$	0,952	0,953	0,942	0,970	0,886
	REQM	0,224	0,128	0,145	0,022	0,275
	$\eta$	136,554	37,778	42,756	6,197	92,605
Exponencial duplo, três parâmetros	$r^2$	0,986	0,981	0,943	0,982	0,886
	REQM	0,031	0,032	0,032	0,016	0,030
	$\eta$	16,515	5,694	6,795	5,435	5,792
Exponencial duplo, quatro parâmetros	$r^2$	0,956	0,958	0,943	0,977	0,886
	REQM	0,068	0,051	0,057	0,017	0,066
	$\eta$	36,460	10,756	14,465	4,896	18,252
Verma e colaboradores	$r^2$	0,956	0,958	0,943	0,977	0,886
	REQM	0,083	0,054	0,062	0,021	0,075
	$\eta$	51,313	11,681	15,840	4,822	20,459
Exponencial triplo, seis parâmetros	$r^2$	0,956	0,958	0,941	0,977	0,886
	REQM	0,068	0,051	0,057	0,017	0,066
	$\eta$	36,462	10,756	14,465	4,896	18,224
Wang e Singh	$r^2$	0,990	0,986	0,974	0,981	0,983
	REQM	0,023	0,026	0,021	0,010	0,055
	$\eta$	10,716	7,529	5,320	3,294	18,131

secagem de amostras pré-desidratadas a 50 °C, o desempenho desse último modelo é deficiente na descrição das curvas de secagem de amostras que foram imersas em solução de sacarose a 0,40 g.mL<sup>-1</sup>.

Em geral, os menores valores da raiz do erro quadrático médio REQM, a 40 °C, foram obtidos quando empregaram-se os modelos Exponencial simples de três parâmetros, Exponencial duplo de três parâmetros e o de Wang e Singh para descrição das curvas de secagem (Tabela 2). No entanto, o modelo Exponencial duplo de três parâmetros não apresentou desempenho satisfatório quanto ao valor da REQM na secagem de amostras pré-desidratadas por imersão-impregnação a 50 °C (Tabela 3), o que permite desconsiderar a utilização desse modelo para descrever a secagem de coroas circulares de abacaxi para os tratamentos analisados. Desconsiderando-se o modelo Exponencial duplo de três parâmetros, o erro percentual absoluto médio  $\eta$ , em geral, foi também menor nos modelos Exponencial simples de três parâmetros e de Wang e Singh. Portanto, considerando-se apenas os três parâmetros estatísticos

avaliados, esses dois últimos modelos foram os que melhor se adequaram à descrição das curvas experimentais de secagem de coroas circulares de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão-impregnação.

Entretanto, modelos de secagem apenas podem ser considerados satisfatórios se, na descrição das curvas experimentais de secagem, os resíduos obtidos deverem-se, exclusivamente, a erros aleatórios de medição das variáveis envolvidas. De acordo com Byler, Anderson e Brook (1987), se for observada qualquer relação funcional entre os resíduos e os valores estimados da razão de umidade, ou com o tempo de secagem, pode-se inferir que o modelo é inapropriado, indicando que os parâmetros empregados no seu desenvolvimento são insuficientes para explicar a variação dos dados experimentais.

A dispersão dos resíduos dos dois modelos considerados adequados para representar as curvas de secagem, a 60 °C, de coroas circulares de abacaxi são apresentados nas Figuras 3 (modelo de Wang e Singh) e 4 (Exponencial simples de três parâmetros), para amostras in natura e pré-desidratadas

**Tabela 3.** Grau de adequação ( $r^2$ , REQM e  $\eta$ ) dos nove modelos matemáticos apresentados na Tabela 1, na descrição da secagem por convecção, a 60 °C, de coroas circulares de abacaxi previamente desidratadas por 2 horas a 50 °C, em soluções de sacarose a 0,40, 0,44 e 0,47 g.mL<sup>-1</sup> e em xarope de açúcar invertido sem diluição (AISD).

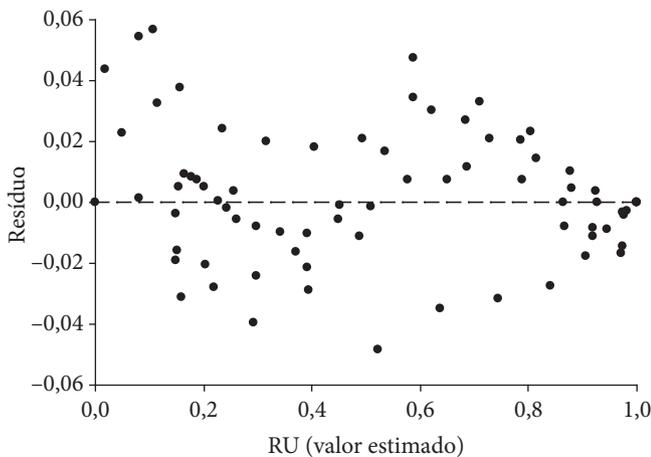
Nome do modelo	Índice de desempenho dos modelos	Valor do índice de desempenho			
		DII a 50 °C			AISD
		Concentração das soluções de sacarose (g.mL <sup>-1</sup> )			
		0,40	0,44	0,47	
Lewis	$r^2$	0,937	0,925	0,948	0,972
	REQM	0,078	0,089	0,078	0,068
	$\eta$	43,294	20,419	22,155	12,561
Exponencial simples, dois parâmetros	$r^2$	0,948	0,933	0,950	0,974
	REQM	0,070	0,083	0,669	0,058
	$\eta$	38,506	18,403	59,024	12,486
Exponencial simples, três parâmetros	$r^2$	0,988	0,974	0,956	0,973
	REQM	0,017	0,041	0,085	0,056
	$\eta$	7,651	8,849	37,222	12,989
Exponencial duplo, dois parâmetros	$r^2$	0,944	0,929	0,946	0,975
	REQM	0,187	0,161	0,067	0,054
	$\eta$	114,009	60,963	18,004	11,123
Exponencial duplo, três parâmetros	$r^2$	0,948	0,960	0,955	0,975
	REQM	0,034	0,056	0,079	0,068
	$\eta$	19,530	10,421	25,406	12,558
Exponencial duplo, quatro parâmetros	$r^2$	0,948	0,933	0,950	0,974
	REQM	0,070	0,083	0,077	0,055
	$\eta$	38,508	18,403	21,030	12,540
Verma e colaboradores	$r^2$	0,982	0,933	0,955	0,974
	REQM	0,039	0,076	0,064	0,059
	$\eta$	23,097	14,296	16,920	11,208
Exponencial triplo, seis parâmetros	$r^2$	0,948	0,933	0,950	0,974
	REQM	0,070	0,083	0,077	0,056
	$\eta$	38,506	18,405	21,034	13,120
Wang e Singh	$r^2$	0,988	0,974	0,948	0,970
	REQM	0,018	0,041	0,078	0,071
	$\eta$	8,989	8,902	24,271	10,398

por imersão-impregnação a 40 °C. Observa-se que apenas o modelo de Wang e Singh proporcionou padrão aleatório de dispersão dos resíduos. Na estimativa das curvas de secagem pelo modelo Exponencial simples de três parâmetros (Figura 4), nota-se a formação incipiente de relação não aleatória entre os resíduos e os valores estimados de razão de umidade. Resultados semelhantes foram observados na secagem das amostras pré-desidratadas a 50 °C. Para efeito comparativo, apresenta-se, na Figura 5, o gráfico da dispersão dos resíduos do modelo Exponencial triplo de seis parâmetros, em que se observam padrões definidos e, portanto, não aleatórios de variação dos resíduos em função dos valores estimados pelo modelo. Para os tratamentos in natura e pré-desidratados em soluções de sacarose, a relação entre os resíduos e os valores

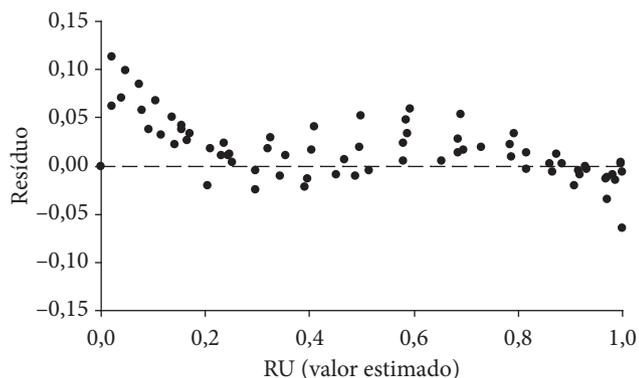
estimados de razão de umidade é representada por uma função quadrática com coeficiente de determinação de 0,898. Para as amostras pré-desidratadas em xarope de açúcar invertido sem diluição, essa relação é representada por uma função cúbica com  $r^2 = 0,920$ . Todos os demais modelos que haviam sido rejeitados anteriormente pelo critério proposto, ou seja, a avaliação dos três parâmetros estatísticos ( $r^2$ , REQM e  $\eta$ ), apresentaram padrões definidos de variação dos resíduos em função dos valores estimados de razão de umidade.

No presente trabalho, foram obtidos valores elevados do coeficiente de determinação para diversos modelos testados. Entretanto, o fato de a maioria dos modelos ter sido considerada inadequada para a descrição acurada do processo de secagem de amostras de abacaxi, depois de seu desempenho ter sido também avaliado pelos demais parâmetros estatísticos, sugere que a utilização exclusiva do  $r^2$  para a comparação desses modelos pode não ser um procedimento correto. Proposição similar foi feita por Chen e Wu (2001) na avaliação de modelos de secagem em camada delgada para arroz em casca com teor de água elevado e por Abalone et al. (2006) na secagem de sementes de amaranto. Diversos autores, no entanto, não consideram a dispersão dos resíduos na escolha de modelos matemáticos de secagem, o que pode reduzir a confiabilidade dos resultados apresentados (PALOU et al., 1994; MADAMBA; DRISCOLL; BUCKLE, 1996; TOĞRUL; PEHLIVAN, 2003; ERTEKIN; YALDIZ, 2004; SACILIKI; UNAL, 2005; GOYAL et al., 2006; SOYSAL; ÖZTEKIN; EREN, 2006; KAYA; AYDIN; DEMIRTAŞ, 2007).

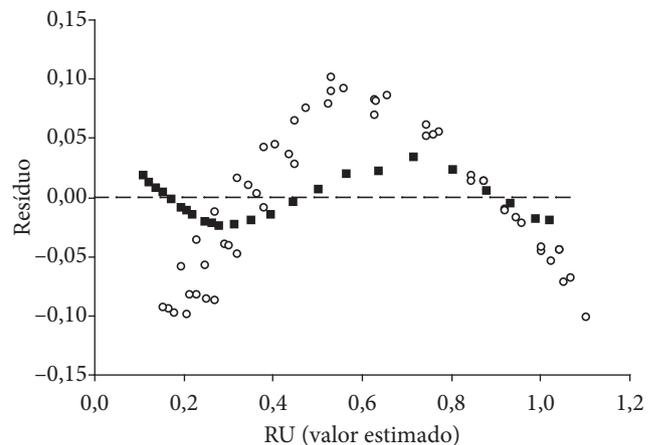
Sendo assim, no presente trabalho, o modelo de Wang e Singh foi o único, entre os nove modelos avaliados, que permitiu explicar, com o grau de acurácia desejável, a variação da razão de umidade em função do tempo, para secagem a 60 °C, de coroas circulares de abacaxi in natura e pré-desidratadas por



**Figura 3.** Dispersão dos resíduos ( $RU_{exp} - RU_{est}$ ) obtidos a partir da utilização do modelo de Wang e Singh na simulação da secagem, a 60 °C, de coroas circulares de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão impregnação, a 40 °C, em soluções de sacarose e em xarope de açúcar invertido sem diluição.



**Figura 4.** Dispersão dos resíduos ( $RU_{exp} - RU_{est}$ ) obtidos a partir da utilização do modelo Exponencial simples de três parâmetros na simulação da secagem, a 60 °C, de coroas circulares de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão impregnação, a 40 °C, em soluções de sacarose e em xarope de açúcar invertido sem diluição.



**Figura 5.** Dispersão dos resíduos ( $RU_{exp} - RU_{est}$ ) obtidos a partir da utilização do modelo Exponencial triplo de seis parâmetros na simulação da secagem, a 60 °C, de coroas circulares de abacaxi in natura e pré-desidratadas a 40 °C. O, in natura e em soluções de sacarose; ■, em xarope de açúcar invertido sem diluição.

imersão-impregnação a 40 e 50 °C. Na Figura 6, encontram-se os valores experimentais e as curvas de secagem a 60 °C estimadas pelo modelo Wang e Singh para amostras submetidas à pré-desidratação por imersão-impregnação a 40 °C. Apresentam-se, na Tabela 4, os coeficientes do modelo de Wang e Singh para todos os tratamentos avaliados.

#### 4 Conclusões

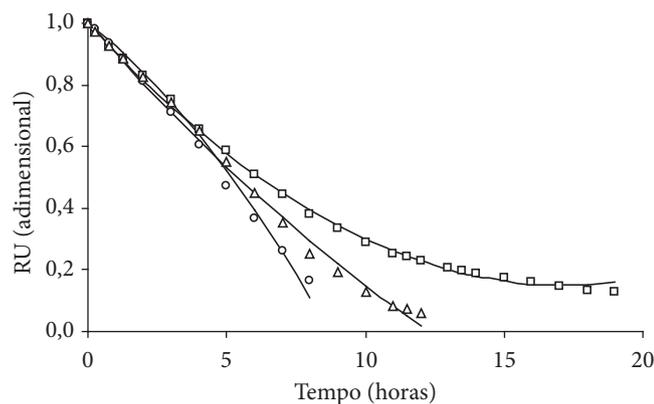
Fatias de abacaxi in natura apresentam maior taxa de secagem por convecção que aquelas pré-desidratadas por imersão-impregnação;

Quanto maior o teor de sólidos solúveis totais da solução usada na pré-desidratação osmótica, menor é a taxa de secagem das fatias de abacaxi;

O modelo de Wang e Singh foi o que melhor se ajustou às curvas experimentais de secagem de fatias de abacaxi.

#### Agradecimentos

Ao CNPq, Dulcini S.A., FAPERJ, FINEP, *International Foundation for Science* (IFS) e Usina Sapucaia S/A, pelo apoio técnico e financeiro.



**Figura 6.** Variação da razão de umidade em função do tempo de secagem por convecção a 60 °C (valores experimentais e curvas estimadas pelo modelo de Wang e Singh), para coroas circulares de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão-impregnação a 40 °C. □, em xarope de açúcar invertido sem diluição; △, em solução de sacarose 0,40 g.mL<sup>-1</sup>; ○, in natura (sem a pré-desidratação osmótica).

**Tabela 4.** Coeficientes do modelo de Wang e Singh na descrição da secagem por convecção, a 60 °C, de coroas circulares de abacaxi in natura e previamente desidratadas por 2 horas, a 40 e 50 °C, em soluções de sacarose a 0,40, 0,44 e 0,47 g.mL<sup>-1</sup> e em xarope de açúcar invertido sem diluição (AISD).

Coeficiente	Concentração das soluções de sacarose (g.mL <sup>-1</sup> ) e AISD								
	DII a 40 °C				DII a 50 °C				In natura
	0,40	0,44	0,47	AISD	0,40	0,44	0,47	AISD	
a	-0,1012	-0,1106	-0,1073	-0,0989	-0,1220	-0,1123	-0,2075	-0,1064	-0,0693
b	0,0016	0,0019	0,0010	0,0029	0,0014	0,0018	0,0116	0,0034	-0,0053

#### Referências bibliográficas

- ABALONE, R. et al. Thin layer drying of amaranth seeds. *Biosystems Engineering*, v. 93, n. 2, p. 179-188, 2006.
- BOLIN, H. R. et al. Effect of osmotic agents and concentration on fruit quality. *Journal of Food Science*, v. 48, n. 1, p. 202-205, 1983.
- BYLER, R. K.; ANDERSON, C. R.; BROOK, R. C. Statistical methods in thin layer parboiled rice drying models. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v. 30, n. 2, p. 533-538, 1987.
- CHEN, C.; WU, P. Thin-layer drying model for rough rice with high moisture content. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 80, n. 1, p. 45-52, 2001.
- CORRÊA, P. C. et al. Modelo matemático para representação da higroscopicidade de plantas medicinais. *Revista Brasileira de Armazenamento*, v. 27, n. 1, p. 8-15, 2002.
- DANDAMRONGRAK, R.; YOUNG, G.; MASON, R. Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *Journal of Food Engineering*, v. 55, n. 2, p. 139-146, 2002.
- EL-AOUAR, Â. A.; AZOUBEL, P. M.; MURR, F. E. X. Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Food Engineering*, v. 59, n. 1, p. 85-91, 2003.
- ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, v. 63, n. 3, p. 349-359, 2004.
- FORNI, E. et al. Influence of osmosis time on the quality of dehydrofrozen kiwifruit. *Acta Horticulturae*, v. 282, p. 425-434, 1990.
- FORNI, E. et al. The influence of sugar composition on the colour stability of osmodehydrofrozen intermediate apricots. *Food Research International*, v. 30, n. 2, p. 87-94, 1997.
- GIANGIACOMO, R. et al. Use of osmodehydrofrozen fruit cubes in yogurt. *Italian Journal of Food Science*, v. 3, n. 6, p. 345-350, 1994.
- GOYAL, R. K. et al. Thin-layer drying kinetics of raw mango slices. *Biosystems Engineering*, v. 95, n. 1, p. 43-49, 2006.
- KARATHANOS, V. T. et al. Air-drying kinetics of osmotically dehydrated fruits. *Drying Technology*, v. 13, n. 5, p. 1503-1521, 1995.
- KAYA, A.; AYDIN, O.; DEMIRTAŞ, C. Drying kinetics of Red Delicious apple. *Biosystems Engineering*, v. 96, n. 4, p. 517-524, 2007.
- KOBAYASHI, K.; SALAM, M. U. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agronomy Journal*, v. 92, n. 2, p. 345-352, 2000.
- KROKIDA, M. K.; TSAMI, E.; MAROULIS, Z. B. Kinetics on color changes during drying of some fruits and vegetables. *Drying Technology*, v. 16, n. 3, p. 667-685, 1998.
- LAHSASNI, S. et al. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, v. 61, n. 2, p. 173-179, 2004.
- LAZARIDES, H. N.; GEKAS, V.; MAVROUDIS, N. Apparent mass diffusivities in fruit and vegetable tissues undergoing osmotic

- processing. **Journal of Food Engineering**, v. 31, n. 3, p. 315-324, 1997.
- LENART, A. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: Technology and application. **Drying Technology**, v. 14, n. 2, p. 391-413, 1996.
- LEWICKI, P. P.; LUKASZUK, A. Effect of osmotic dewatering on rheological properties of apple subjected to convective drying. **Journal of Food Engineering**, v. 45, n. 3, p. 119-126, 2000.
- LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A. S.; LABUZA, T. P. Evaluations of food moisture isotherm equations. Part 1: Fruit, vegetables and meat products. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 18, n. 2, p. 111-117, 1985.
- MADAMBA, S. P.; DRISCOLL, H. R.; BUCKLE, K. A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.
- MALTINI, E. et al. Functional properties of reduced moisture fruits as ingredients in food systems. **Food Research International**, v. 26, n. 6, p. 413-419, 1993.
- MOREIRA, R.; SERENO, A. M. Evaluation of mass transfer coefficients and volumetric shrinkage during dehydration of apple using sucrose solutions in static and non-static conditions. **Journal of Food Engineering**, v. 57, n. 1, p. 25-31, 2003.
- NIETO, A.; CASTRO, M. A.; ALZAMORA, S. M. Kinetics of moisture transfer during air drying of blanched and/or osmotically dehydrated mango. **Journal of Food Engineering**, v. 50, n. 3, p. 175-185, 2001.
- PALOU, E. et al. The use of Peleg's equation to model osmotic concentration of papaya. **Drying Technology**, v. 12, n. 4, p. 965-978, 1994.
- 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, n. 1, p. 97-103, 2002.
- RAMASWAMY, H. S.; NSONZI, F. Convective-air drying kinetics of osmotically pre-treated blueberries. **Drying Technology**, v. 16, n. 3-5, p. 743-759, 1998.
- RAOULT-WACK, A. L. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. **Trends in Food Science and Technology**, v. 5, n. 8, p. 255-260, 1994.
- SACILIKI, K.; UNAL, G. Dehydration characteristics of Kastamonu garlic slices. **Biosystems Engineering**, v. 92, n. 2, p. 207-215, 2005.
- SANKAT, C. K.; CASTAIGNE, F.; MAHARAJ, R. The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 31, n. 2, p. 123-135, 1996.
- SILVEIRA, E. T. F.; RAHMAN, M. S.; BUCKLE, K. A. Osmotic dehydration of pineapple: kinetics and product quality. **Food Research International**, v. 29, n. 3-4, p. 227-233, 1996.
- SOYSAL, Y.; ÖZTEKIN, S.; EREN, Ö. Microwave drying of parsley: Modelling, kinetics, and energy aspects. **Biosystems Engineering**, v. 93, n. 4, p. 403-413, 2006.
- TOĞRUL, I. T.; PEHLIVAN, D. Modelling of drying kinetics of single apricot. **Journal of Food Engineering**, v. 58, n. 1, p. 23-32, 2003.
- TORREGGIANI, D. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. **Food Research International**, v. 26, n. 1, p. 59-68, 1993.
- TORREGIANNI, D.; BERTOLO, G. High-quality fruit and vegetable products using combined processes. In: FITO, P. et al. (Ed.). **Osmotic Dehydration & Vacuum Impregnation – Application in Food Industries**. Lancaster: Technomic Publishing Co., Inc., 2001. p. 3-9.