

ORIGINAL ARTICLE

Modelagem e propriedades termodinâmicas da secagem de fatias de acuri

Modelling and thermodynamic properties of the drying of acuri slices

Dyego da Costa Santos^{1*} , Daniela Dantas de Farias Leite², Jemima Ferreira Lisbôa², João Paulo de Lima Ferreira², Francislaine Suelia dos Santos², Thalís Leandro Bezerra de Lima², Rossana Maria Feitosa de Figueiredo², Tiago Nascimento da Costa¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Acre (IFAC), Departamento de Tecnologia em Agroindústria, Xapuri/AC - Brasil

²Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, Campina Grande/PB - Brasil

***Autor Correspondente:** Dyego da Costa Santos, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Acre (IFAC), Departamento de Tecnologia em Agroindústria, Rua Coronel Brandão, 1622, Centro, CEP: 69930-000, Xapuri/AC - Brasil, e-mail: dyego.csantos@gmail.com

Cite as: Santos, D. C., Leite, D. D. F., Lisbôa, J. F., Ferreira, J. P. L., Santos, F. S., Lima, T. L. B., Figueiredo, R. M. F., & Costa, T. N. (2019). Modelling and thermodynamic properties of the drying of acuri slices. *Brazilian Journal of Food Technology*, 22, e2018031. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.03118>

Resumo

O acuri é uma fruta pouco explorada industrialmente, mas com grandes perspectivas e possibilidades de uso. Para tanto, torna-se necessário reduzir o seu teor de água, aumentando então a sua vida útil, o que possibilitará sua utilização em mercados distantes dos locais de produção. Nesse sentido, objetivou-se secar fatias de acuri, com espessura de aproximadamente 4,07 mm, nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90 °C, ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais e determinar os coeficientes de difusão, a energia de ativação e as propriedades termodinâmicas. Observou-se que o aumento de temperatura de 30°C reduziu em 36% o tempo total de processo, sendo obtidas taxas de secagem máximas de 1,22; 1,88; 2,16, e 2,45 kg de água kg de matéria seca min⁻¹ nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90 °C, respectivamente. Dentre os modelos matemáticos testados, o modelo logarítmico apresentou os melhores parâmetros de ajustes aos dados experimentais e foi selecionado como o mais adequado para representar o fenômeno investigado. Os coeficientes de difusão efetivos aumentaram com o incremento de temperatura, apresentando-se na ordem de 10⁻¹⁰ m² s⁻¹, e sua dependência com a temperatura foi descrita pela Equação de Arrhenius, que apresentou energia de ativação de 17,66 kJ mol⁻¹. Os valores de entalpia e entropia reduziram com a elevação da temperatura de secagem, enquanto que a energia livre de Gibbs foi ampliada na faixa de temperatura avaliada.

Palavras-chave: *Attalea phalerata* Mart. ex Spreng.; Desidratação; Modelagem matemática; Difusividade; Energia de ativação; Entalpia.

Abstract

Acuri is a fruit little explored industrially with great perspectives and possibilities for use, but for this to occur the moisture content must be reduced, thus increasing its shelf life and enabling it to be used in markets far from its



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença [Creative Commons Attribution](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

place of production. Hence the objective here was to dry acuri slices with a thickness of approximately 4.07 mm at temperatures of 60, 70, 80 and 90 °C, adjust different mathematical models to the experimental data and determine the diffusion coefficients, the activation energy and the thermodynamic properties. It was observed that a temperature increase of 30 °C reduced the total process time by 36%, with maximum drying rates of 1.22; 1.88; 2.16 and 2.45 kg of water kg of dry matter min⁻¹ at the temperatures of 60, 70, 80 and 90 °C, respectively. Of the mathematical models tested, the Logarithmic model presented the best fit to the experimental data and was selected as the most adequate model to represent the phenomenon investigated. The effective diffusion coefficients increased with increase in temperature to the order of 10⁻¹⁰ m² s⁻¹ and the temperature dependence was described by the Arrhenius equation which presented an activation energy of 17.66 kJ mol⁻¹. The enthalpy and entropy values decreased with increase in drying temperature, while Gibbs free energy increased in the temperature range evaluated.

Keywords: *Attalea phalerata* Mart. ex Spreng.; Dehydration; Mathematical modeling; Diffusivity; Activation energy; Enthalpy.

1 Introdução

A espécie de palmeira *Attalea phalerata* Mart. ex Spreng., denominada localmente como acuri, bacuri ou uricuri, apresenta elevado potencial econômico, dada a diversidade de usos populares a ela associados, incluindo emprego como fonte alimentar, recurso forrageiro, material para construções e fonte de biodiesel (Negrelle, 2015). No Brasil, esta espécie pode ser encontrada desde o Acre até São Paulo, fazendo parte da composição de diferentes formações florestais (Negrelle, 2013). Os frutos dessa palmeira apresentam elevadas concentrações de compostos bioativos, presentes principalmente na polpa, motivo pelo qual tem despertado o interesse da indústria alimentícia e da comunidade científica (Mendoza et al., 2016).

Apesar de apreciada e consumida nos locais onde ocorre, a polpa de acuri é muito perecível mesmo sob refrigeração, sendo necessários estudos de tecnologias que promovam a extensão de sua vida útil. Dentre os métodos que podem ser utilizados, a secagem convectiva apresenta boas perspectivas de uso, uma vez que é de baixo custo, acessível a pequenos agricultores e eficiente para remover o excedente de água de produtos agrícolas, aumentando a sua estabilidade em condições de estocagem prolongada. Isso se deve à redução da atividade de água, que promove desaceleração das atividades metabólicas que culminam na depreciação do produto.

A secagem de produtos agrícolas pode ser descrita por modelos matemáticos teóricos, semiteóricos e empíricos. Os modelos teóricos consideram as transferências de calor e massa na interface produto-ar de secagem e no interior do produto, sendo que, quando a resistência convectiva é desprezível comparando-se com a resistência difusiva, é possível considerar transferências somente no interior do produto (difusão). Já os modelos semiteóricos e os empíricos consideram somente a resistência externa à temperatura e a umidade relativa do ar (Faria et al., 2012). Dentre os modelos teóricos aplicados ao processo de secagem, o da difusão é o mais estudado (Araújo et al., 2017), uma vez que este considera, como mecanismo principal, a difusão baseada na segunda Lei de Fick, que estabelece uma relação entre as taxas de variação temporal e espacial da concentração de água, por meio do coeficiente de difusão (Lisbôa et al., 2015).

A partir do uso do modelo da difusão, podem-se determinar as principais propriedades termodinâmicas envolvidas no fenômeno de desidratação, a exemplo da entalpia, da entropia e da energia livre de Gibbs (Araújo et al., 2017). O conhecimento das propriedades termodinâmicas na secagem é importante fonte de informação para projetar equipamentos, calcular a energia requerida no processo, estudar as propriedades da água adsorvida e avaliar a microestrutura dos alimentos, bem como para o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos mesmos (Corrêa et al., 2010).

A literatura especializada apresenta grande quantidade de pesquisas de secagem de frutas (Xanthopoulos et al., 2009; Doymaz, 2013; Bi et al., 2015; Baptestini et al., 2015; Cruz et al., 2015; Olanipekun et al., 2015; Oliveira et al., 2015; Udomkun et al., 2015; Botrel et al., 2016; Alves & Rodvalho, 2016; Aral & Beşe,

2016; Reis et al., 2017). Entretanto, não foram encontradas na literatura consultada referências acerca da secagem do acuri, tanto pesquisas de modelagem matemática quanto de propriedades termodinâmicas.

Ante o exposto e considerando-se a importância de estudos que contribuam para o desenvolvimento agroindustrial, na medida em que agrega valor a frutas nativas, objetivou-se secar fatias de acuri nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90 °C, ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais e determinar os coeficientes de difusão, a energia de ativação e as propriedades termodinâmicas.

2 Material e métodos

Acuris (*Attalea phalerata* Mart.) em estágio de maturação maduros, safra 2017, foram adquiridos na feira local da cidade de Rio Branco, Acre. Esses acuris foram transportados adequadamente ao laboratório, onde foram higienizados com solução de hipoclorito de sódio (100 ppm) por 15 min, submetidos à remoção manual da casca e, em seguida, cortados longitudinalmente com uso de facas de aço inoxidável, obtendo-se fatias com espessura média de 4,07 mm. As fatias foram acondicionadas em embalagens de PA/PE (poliamida e polietileno) sob vácuo e mantidas em freezer a -18°C até o momento da utilização nos experimentos. Antes do início das secagens, as fatias de acuri foram descongeladas sob refrigeração (10 °C) e, posteriormente, mantidas em bancada de laboratório até atingirem a temperatura ambiente, determinando-se então o teor de água inicial das amostras em estufa a 105 °C (±2 °C) por 24 h.

Cerca de 25 g de fatias de acuri foram dispostos em cestas montadas de aço inoxidável e conduzidos à secagem, em quadruplicada, em estufa com circulação forçada de ar nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90 °C, e velocidade do ar de cerca de 1,0 m s⁻¹. Monitorou-se a perda de água através de pesagens em tempos regulares de 5, 10, 20, 30 e 60 min, até que as fatias atingissem massa constante. Quando isso ocorria, determinava-se o teor de água final a fim de se calcularem as razões dos teores de água (Equação 1), o que possibilitou a construção das curvas de secagem em função dos tempos de secagem.

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

Em que: RX - razão do teor de água (adimensional); X - teor de água, b.s.; X_i - teor de água inicial, b.s.; X_e - teor de água de equilíbrio, b.s.

Os modelos matemáticos de Page, Henderson e Pabis, exponencial de dois termos, logarítmico e Midilli (Tabela 1) foram ajustados aos dados experimentais das cinéticas de secagem das fatias de acuri, usando-se o programa computacional Statistica versão 7.0, por meio de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton.

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para estimar as curvas de cinética de secagem.

Designação	Modelo	
Page	$RX = \exp(-k t^n)$	(2)
Henderson e Pabis	$RX = a \exp(-k t)$	(3)
Exponencial de dois termos	$RX = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k a t)$	(4)
Logarítmico	$RX = a \exp(-k t) + c$	(5)
Midilli	$RX = a \exp(-k t^n) + b t$	(6)

RX: razão do teor de água do produto, adimensional; k: constantes de secagem; a, b, c, n: coeficientes dos modelos; t: tempo de secagem (min).

Utilizaram-se, como critérios de ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais, a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), a distribuição dos resíduos e o desvio quadrático médio (DQM), segundo a Equação 2.

$$DQM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Em que: DQM - desvio quadrático médio; RX_{pred} - razão do teor de água predita pelo modelo; RX_{exp} - razão do teor de água experimental; n - número de observações.

De posse dos dados de teor de água (b.s.) das fatias de acuri em cada tempo de secagem, calcularam-se as taxas de secagem, de acordo com a Equação 3.

$$TX = \frac{X_{t+dt} - X_t}{dt} \quad (3)$$

Em que: TX - taxa de secagem, kg de água/kg de matéria seca min^{-1} ; X_{t+dt} - teor de água em $t + dt$, (kg de água/kg de matéria seca); X_t - teor de água em um tempo específico, b.s.; t - tempo, min.

Os coeficientes de difusão efetivos foram determinados ajustando-se o modelo matemático da difusão líquida (Lei de Fick) com aproximação de três termos (Equação 4) aos dados experimentais da cinética de secagem das fatias de acuri em diferentes temperaturas, considerando-se a distribuição da água inicial uniforme e a ausência de resistência térmica. Este modelo é a solução analítica para a segunda Lei de Fick, considerando-se a forma geométrica das fatias de acuri como aproximada a uma placa plana.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 D \frac{t}{4L^2} \right] \quad (4)$$

Em que: D - coeficiente de difusão efetivo, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$; n - número de termos da equação; L - dimensão característica (meia espessura da fatia); t - tempo, s.

A relação entre os coeficientes de difusão efetivo e as temperaturas de secagem foi descrita por meio da Equação de Arrhenius (Equação 5).

$$D = D_o \exp \left(- \frac{E_a}{R(T + 273,15)} \right) \quad (5)$$

Em que: D_o - fator pré-exponencial, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$; E_a - energia de ativação, kJ mol^{-1} ; R - constante universal dos gases, $0,008314 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$; T - temperatura, $^{\circ}\text{C}$.

Os parâmetros da Equação de Arrhenius foram obtidos linearizando-se a Eq. 10 com a aplicação do logaritmo, de acordo com a Equação 6.

$$\text{Ln}D = \text{Ln}D_o - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T + 273,15} \quad (6)$$

Em que: $\text{Ln}D_o$ - logaritmo neperiano do fator pré-exponencial, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$; E_a - energia de ativação, kJ mol^{-1} ; R - constante universal dos gases, $0,008314 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$; T - temperatura, $^{\circ}\text{C}$.

As propriedades termodinâmicas de entalpia (Equação 7), entropia (Equação 8) e energia livre de Gibbs (Equação 9) relacionadas ao processo de secagem das fatias de acuri foram determinadas pelo método descrito pela constante universal dos gases (Silva et al., 2016).

$$\Delta H = E_a - R(T + 273,15) \quad (7)$$

$$\Delta S = R \left[\ln(D_o) - \ln\left(\frac{k_B}{h_p}\right) - \ln(T + 273,15) \right] \quad (8)$$

$$\Delta G = \Delta H - (T + 273,15)\Delta S \quad (9)$$

Em que: ΔH - entalpia específica, J mol^{-1} ; ΔS - entropia específica, $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$; ΔG - energia livre de Gibbs, J mol^{-1} ; k_B - constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$; h_p - constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$; T - temperatura, $^{\circ}\text{C}$.

3 Resultados e discussão

Na Figura 1, estão apresentadas as curvas de secagem das fatias de acuri em diferentes temperaturas, expressas através do teor de água (b.s.) em função do tempo. Observa-se que o teor de água inicial de 97,24% foi reduzido para aproximadamente 4,56%; 3,86%; 2,51% e 2,29%, ao término das secagens nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Ainda que, nos tempos finais do processo, os teores de água de equilíbrio tenham sido semelhantes, deve-se considerar que, em períodos inferiores a 300 min, esses valores apresentaram-se bem superiores nas menores temperaturas. No tempo de 100 min, o teor de água da amostra seca a 60 $^{\circ}\text{C}$ era de 21,88%, enquanto que a fatia exposta a 90 $^{\circ}\text{C}$ apresentava teor de 11,03%, o que garantiu uma maior exposição do acuri às condições de temperatura mais baixa, até equilíbrio higroscópico. À medida que a temperatura era aumentada, menores foram os tempos para que as fatias atingissem o equilíbrio higroscópico, correspondendo a 750, 690, 570 e 480 min, para as respectivas temperaturas. A elevação da temperatura de secagem de 60 $^{\circ}\text{C}$ para 90 $^{\circ}\text{C}$ reduziu em 36% o tempo total do processo, corroborando com diversos estudos de secagem de frutas que atestaram influência da temperatura no processo, a exemplo de figo (Xanthopoulos et al., 2009), pera (Doymaz, 2013), maçã (Cruz et al., 2015), morango (Oliveira et al., 2015), araticum (Botrel et al., 2016) e fruta do espinheiro (Aral & Beşe, 2016). A temperatura mais elevada produz uma maior força motriz para a transferência de calor e massa (Niamnuy et al., 2011). Assim, há um aumento da pressão de vapor na amostra, acelerando a remoção de água do seu interior para a superfície, o que, por consequência, reduz os tempos de secagem (Aral & Beşe, 2016; Udomkun et al., 2015). Apesar de o aumento de temperatura reduzir o tempo de secagem, sabe-se que tanto uma condição térmica elevada quanto a exposição excessiva ao calor podem degradar componentes termossensíveis. Assim, devem ser realizados novos estudos acerca da retenção de compostos bioativos do acuri em diferentes temperaturas, a fim de se estabelecer a melhor condição de secagem.

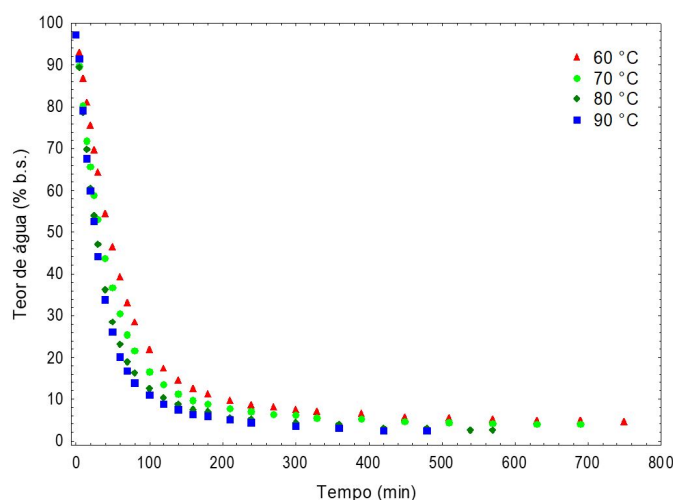


Figura 1. Curvas de secagem das fatias de acuri em diferentes temperaturas.

As taxas de secagem das fatias de acuri desidratadas em diferentes temperaturas são mostradas na Figura 2. Não foi observado qualquer período de taxa constante de secagem para a secagem convectiva de fatias de acuri, significando que as desidratações ocorrem em períodos de queda de velocidade, nos quais a migração da água ocorreu através do mecanismo de difusão. A ausência de um período de secagem em taxa constante pode ser devida à fina espessura da amostra, que não forneceu uma fonte constante de água durante o período de tempo de secagem (Santos et al., 2015). Este comportamento está em acordo com os resultados apresentados para outras frutas, a exemplo de lichia (Reis et al., 2017), araticum (Botrel et al., 2016), fruta do espinheiro (Aral & Beşe, 2016), mamão (Udomkun et al., 2015), abacaxi (Olanipekun et al., 2015) e figo (Xanthopoulos et al., 2009). Esse tipo de curva evidencia um comportamento típico de estruturas porosas ou materiais de estruturas celulares, como frutas e hortaliças em fatias (Bi et al., 2015).

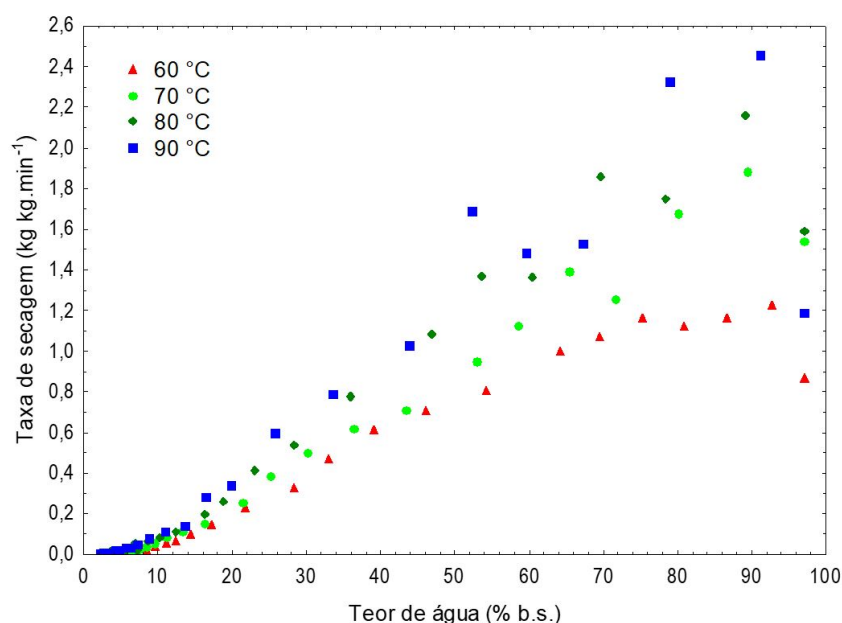


Figura 2. Taxas de secagem de fatias de acuri desidratadas em diferentes temperaturas.

As taxas de secagem aumentaram com incrementos da temperatura de desidratação, atingindo, no início do processo, magnitudes de 1,22; 1,88; 2,16, e 2,45 kg de água kg de matéria seca min⁻¹, para as temperaturas de 60, 70, 80 e 90 °C, respectivamente. Este fenômeno pode ser atribuído à pressão de vapor de água no interior das fatias, a qual aumentou proporcionalmente com a elevação da temperatura de secagem, visto que, em temperaturas mais elevadas, a energia térmica é transferida mais rapidamente do ar de secagem para a superfície e as camadas mais internas da amostra, o que aumenta a taxa de remoção de água (Deng et al., 2017). As taxas de secagem foram reduzidas com o decorrer dos tempos de desidratação, fenômeno também relatado por Aral & Beşe (2016) em frutas do espinheiro, em virtude do aumento da resistência às transferências de massa, enquanto que a transferência de calor foi menor por causa da força motriz mais baixa (Udomkun et al., 2015), podendo estar associada à contração volumétrica, que resulta no enrijecimento da amostra. Martins et al. (2014) relataram que, no final da secagem, a água encontra-se em regiões mais intrínsecas da amostra, necessitando de maior energia para a sua evaporação; assim, o processo ocorre mais lentamente, resultando em menores valores da taxa de secagem.

Estão dispostos, na Tabela 2, os parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais das curvas de cinética de secagem das fatias de acuri em diferentes temperaturas, com os respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM), bem como a distribuição dos resíduos (DR). O Modelo Logarítmico deteve os maiores valores de R^2 . Todavia, os demais modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais também apresentaram R^2 elevados, superiores a 0,99,

atestando, quanto a este parâmetro estatístico, uma representação satisfatória do fenômeno investigado. Entretanto, Mohapatra & Rao (2005) destacaram que o uso do R^2 como único critério de seleção na avaliação de modelos matemáticos não se constitui em bom parâmetro para representação do fenômeno de secagem. Por isso, ainda foram considerados o DQM e a tendência de distribuição dos resíduos.

Tabela 2. Parâmetros obtidos, coeficientes de determinação (R^2), desvios quadráticos médios (DQM) e distribuição dos resíduos (DR) dos modelos matemáticos ajustados às curvas de cinética de secagem das fatias de acuri em diferentes temperaturas.

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros do modelo	R^2	DQM	DR
2	60	k: 0,0116; n: 1,0737	0,9988	0,0166	T
	70	k: 0,0247; n: 0,9532	0,9991	0,0135	A
	80	k: 0,0251; n: 0,9923	0,9981	0,0194	T
	90	k: 0,0216; n: 1,0527	0,9977	0,0214	A
3	60	a: 1,0329; k: 1,0329	0,9989	0,0159	T
	70	a: 0,9977; k: 0,0206	0,9987	0,0148	A
	80	a: 1,0139; k: 0,0248	0,9981	0,0190	T
	90	a: 1,0329; k: 0,0271	0,9980	0,0201	A
4	60	a: 0,0026; k: 6,0299	0,9983	0,0196	T
	70	a: 0,0039; k: 5,2306	0,9989	0,0148	T
	80	a: 0,0035; k: 7,0256	0,9980	0,0197	T
	90	a: 0,0030; k: 8,5659	0,9974	0,0229	A
5	60	a: 1,0247; c: 0,0132; k: 0,0169	0,9992	0,0136	A
	70	a: 0,9880; c: 0,0170; k: 0,0216	0,9995	0,0097	A
	80	a: 1,0024; c: 0,0200; k: 0,0263	0,9990	0,0138	A
	90	a: 1,0222; c: 0,0180; k: 0,0285	0,9986	0,0166	A
6	60	a: 1,0213; b: 0,0001; k: 0,0134; n: 1,0473	0,9991	0,0140	A
	70	a: 1,0189; b: 0,0001; k: 0,0272; n: 0,9357	0,9993	0,0114	A
	80	a: 1,0245; b: 0,0001; k: 0,0283; n: 0,9690	0,9985	0,0169	A
	90	a: 1,0288; b: 0,0001; k: 0,0250; n: 1,0239	0,9983	0,0184	A

T: Tendencioso; A: Aleatório.

Os valores de DQM ficaram compreendidos entre 0,0097 a 0,0229, sendo que o modelo logarítmico foi o que apresentou os menores valores, em qualquer condição de secagem, atestando maior proximidade entre os dados experimentais e teóricos de razão do teor de água. Em relação a DR, os modelos logarítmico e Midilli foram os únicos a terem uma distribuição aleatória, indicando adequação dos mesmos para representar o fenômeno estudado. De acordo com Baptestini et al. (2015), mesmo quando os parâmetros estatísticos apresentam bons resultados, o modelo pode ser ineficaz se apresentar distribuição de resíduo tendenciosa. Assim, o modelo logarítmico foi selecionado como o mais adequado para representar a secagem de fatias de acuri, na faixa de temperatura investigada, por ter apresentado os maiores R^2 , os menores valores de DQM e a distribuição aleatória dos resíduos. A Figura 3 compara os dados de razão do teor de água experimental e predito pelo modelo logarítmico para a secagem de fatias de acuri em diferentes temperaturas. Os dados preditos situaram-se próximos à linha reta que passa pela origem, o que, teoricamente, representa a igualdade entre os valores experimentais e preditos, confirmando a adequação do modelo para descrever a cinética de secagem das fatias de acuri (Kara & Doymaz, 2015).

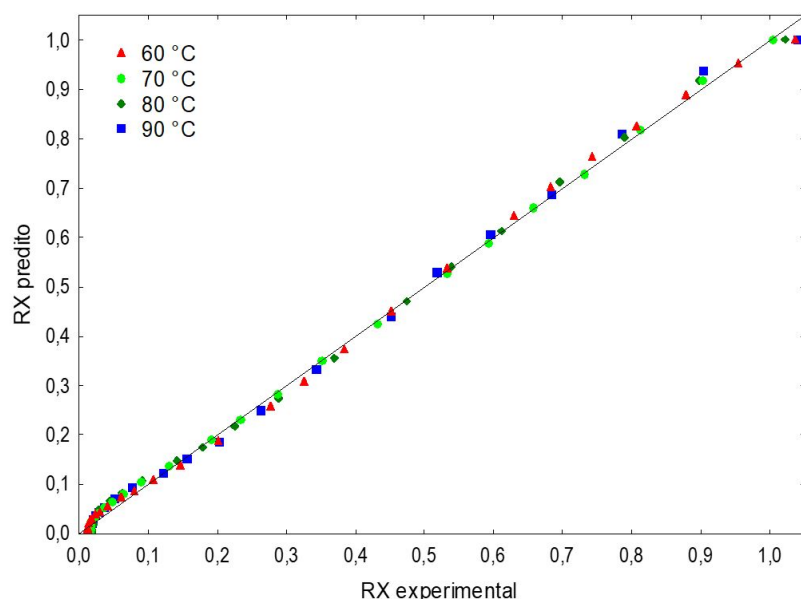


Figura 3. Relação entre os valores de razões de água experimentais e razões de água preditos pelo modelo logarítmico para a cinética de secagem de fatias de acuri.

Percebeu-se que à medida que a temperatura de secagem foi aumentada, houve incrementos na difusividade de água das amostras (Tabela 3), correspondendo a cerca de 68,60% comparando-se os extremos das temperaturas. Esse fenômeno se deve ao fato de que em temperaturas mais elevadas a energia cinética das moléculas de água é acelerada em virtude da maior energia de aquecimento (Deng et al., 2017; Aral & Beşe, 2016; Santos et al., 2014). Assim, o gradiente de água entre a amostra e o ar de secagem é elevado, promovendo um aumento da difusividade efetiva de água (Olanipekun et al., 2015). Além disso, Corrêa et al. (2010) destacaram que a medida que a temperatura de secagem é aumentada a viscosidade da água é reduzida, afetando diretamente a resistência do fluido ao escoamento, ou seja, a redução da viscosidade da água promove maiores facilidades da difusão das moléculas de água.

Tabela 3. Coeficientes de difusão efetivos obtidos na secagem de fatias de acuri em diferentes temperaturas.

Temp. (°C)	D (m ² s ⁻¹)	R ²
60	3,28 × 10 ⁻¹⁰	0,9688
70	4,34 × 10 ⁻¹⁰	0,9822
80	5,15 × 10 ⁻¹⁰	0,9760
90	5,53 × 10 ⁻¹⁰	0,9690

As magnitudes dos coeficientes de difusão efetivos variaram de 3,28 a 5,53 × 10⁻¹⁰ m² s⁻¹, situando-se na faixa relatada por Madamba et al. (1996) para produtos agrícolas, que é de 10⁻¹¹ a 10⁻⁹ m² s⁻¹. Baptestini et al. (2015), Doymaz (2013) e Xanthopoulos et al. (2009) também encontraram valores de coeficientes de difusão na ordem de 10⁻¹⁰ m² s⁻¹ ao secarem graviola, pera e figo, respectivamente. Diferenças nos resultados são explicadas devido ao efeito da espécie, da espessura da fatia, composição e características do tecido da fruta e do modelo proposto utilizado (Doymaz, 2013).

Têm-se na Figura 4 os valores de ln(D) em função do inverso da temperatura absoluta (1/K⁻¹) obtidos para a secagem de fatias de acuri em diferentes temperaturas.

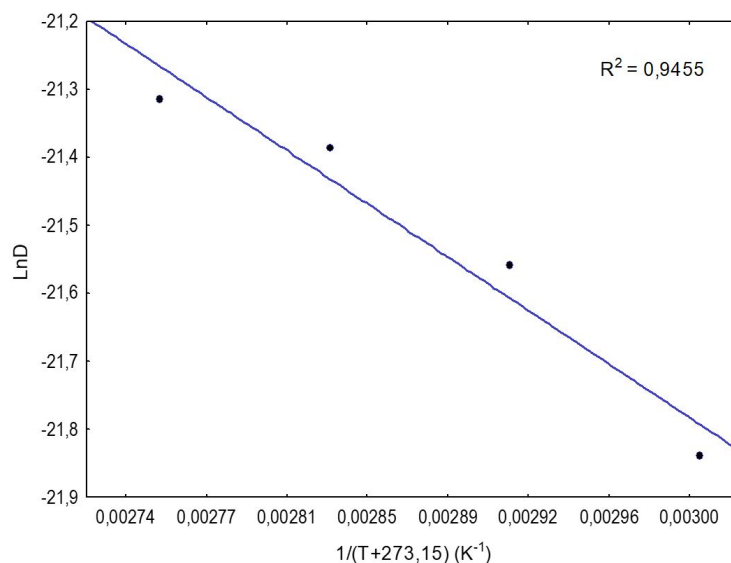


Figura 4. Representação de Arrhenius para os coeficientes de difusão de fatias de acuri secas em diferentes temperaturas de secagem.

Os coeficientes de difusão efetivos aumentaram linearmente e a sua dependência com relação à temperatura do ar de secagem foi descrita pela Equação de Arrhenius. A linearidade decrescente evidencia a uniformidade de variação da taxa de secagem dentro da faixa de temperatura estudada (Santos et al., 2013).

A energia de ativação (E_a) foi determinada a partir da inclinação da curva da representação da Equação de Arrhenius, fornecendo a relação ($-E_a/R$) ao se plotar os valores de $\ln(D)$ versus o recíproco da temperatura absoluta [$1/(T+273,15)$] das fatias de acuri, enquanto que o $\ln(D_0)$ foi obtido por sua interseção com o eixo das ordenadas (Figura 4). A dependência com a Equação de Arrhenius pode ser evidenciada na Eq. 10, que mostra o efeito da temperatura na difusividade efetiva com os seguintes coeficientes:

$$D = 2,0160 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{2124,100}{T + 273,15}\right) \quad (10)$$

A E_a encontrada para a secagem das fatias de acuri foi de 17,66 kJ mol⁻¹, apresentando-se dentro do intervalo de 12,7 a 110 kJ mol⁻¹ relatado por Zogzas et al. (1996) para produtos agrícolas. Esse valor foi inferior aos resultados apontados por Cruz et al. (2015) em maçãs das cultivares Golden Delicious (35,3 kJ mol⁻¹) e Granny Smith (32,8 kJ mol⁻¹), e Baptestini et al. (2015) em graviola (33,10 kJ mol⁻¹), indicando que o processo de secagem das fatias de acuri demandou menor energia para que se iniciasse a difusividade da água. Segundo Olanipekun et al. (2015), a E_a , que é a medida da energia necessária para iniciar a difusão de água das regiões internas do alimento, indica a sensibilidade do coeficiente de difusão efetivo à temperatura de secagem, sendo um apontador útil na avaliação do consumo total de energia no processo de secagem (Deng et al., 2017; Santos et al., 2014); note-se a relação: quanto menor o seu valor, maior será a difusividade de água no produto (Alves & Rodvalho, 2016).

Na Tabela 4, estão apresentadas as propriedades termodinâmicas obtidas na secagem de fatias de acuri em diferentes temperaturas. Os valores de entalpia (ΔH) foram positivos, apontando para reações endergônicas, isto é, houve necessidade de energia na forma de calor para que o processo ocorresse (Costa et al., 2016). Entretanto, essa demanda energética foi reduzida à medida que a temperatura de secagem era ampliada, evidenciada por decréscimos nos valores de ΔH , comportamento também reportado na secagem de outros produtos agrícolas (Corrêa et al., 2010; Corrêa et al., 2011; Alves & Rodvalho, 2016; Silva et al., 2016; Cagnin et al., 2017).

Tabela 4. Propriedades termodinâmicas obtidos na secagem de fatias de acuri em diferentes temperaturas.

Temp. (°C)	ΔH (J mol ⁻¹)	ΔS (J mol ⁻¹ K ⁻¹)	ΔG (J mol ⁻¹)
60	14.889,13	-374,01	139.489,30
70	14.805,99	-374,25	143.230,59
80	14.722,85	-374,49	146.974,32
90	14.639,71	-374,72	150.720,39

A entropia (ΔS) ficou compreendida entre -374,72 e -374,01 J mol⁻¹ K⁻¹, sendo observada redução dessa propriedade à medida que a temperatura foi aumentada. Isso ocorre durante o processo de secagem em razão de que o teor de água diminui e, portanto, o movimento das moléculas de água fica mais restrito, pois há menos sítios disponíveis (Corrêa et al., 2011). Oliveira et al. (2015) encontraram valores de ΔS de -238,35; -238,61, e -238,86 J mol⁻¹ K⁻¹ para a secagem de morangos nas temperaturas 40, 50 e 60 °C, respectivamente, com redução da ΔS com incrementos de temperatura, comportamento coerente ao observado para as fatias de acuri. Os valores de ΔS negativos foram atribuídos à existência de adsorção química e/ou modificações estruturais do adsorvente (Moreira et al., 2008).

Observa-se que a energia livre de Gibbs (ΔG) aumentou com incrementos de temperatura, com valores passando de 139.489,30 a 150.720,39 J mol⁻¹, para a faixa de temperatura investigada. Os valores positivos da ΔG indicam que a secagem das fatias de acuri não foi espontânea, sendo necessária a adição de energia proveniente do ar em que a amostra esteve envolvida, para que ocorresse a redução do teor de água (Alves & Rodovalho, 2016), o que caracteriza a existência de reação endergônica (Corrêa et al., 2010). Silva et al. (2016) e Corrêa et al. (2011) constataram, ao secarem, respectivamente, pimenta ‘Cabacinha’ e espigas de milho, que a ΔG foi positiva e aumentou com a elevação da temperatura de secagem, comportamento de acordo com o ocorrido para a secagem das fatias de acuri.

4 Conclusões

Incrementos de temperatura promoveram reduções dos tempos de secagem e dos teores de água de equilíbrio das fatias de acuri, e aumento das magnitudes das taxas de secagem no início do processo. Mostram-se necessários novos estudos para se estabelecer a melhor condição térmica de secagem, levando-se em consideração também a retenção de compostos termossensíveis.

Dentre os modelos matemáticos testados, o modelo logarítmico foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da cinética da secagem das fatias de acuri em todas as condições avaliadas, apresentando os maiores valores de R², menores DQM e distribuição aleatória dos resíduos.

As fatias de acuri apresentaram coeficientes de difusão na ordem de 10⁻¹⁰ m² s⁻¹, aumentando com incrementos da temperatura de secagem. Esta relação foi descrita pela Equação de Arrhenius, que apresentou energia de ativação de 17,66 KJ mol⁻¹.

As propriedades termodinâmicas da secagem das fatias de acuri apontaram para um processo não espontâneo, com valores positivos de entalpia (ΔH) e energia livre de Gibbs (ΔG), e valores negativos de entropia (ΔS). Os valores de ΔH e ΔS reduziram com a elevação da temperatura de secagem, enquanto que os valores de ΔG foram ampliados na faixa de temperatura avaliada (60 a 90 °C).

Referências

- Alves, J. J. L., & Rodovalho, R. S. (2016). Cinética de secagem em camada de espuma da polpa de abacate CV ‘Quintal’ (*Persea Americana* Mill). *Revista Agrotecnologia*, 7(1), 86-98. <http://dx.doi.org/10.12971/2179-5959/agrotecnologia.v7n1p86-98>
- Aral, S., & Beşe, A. V. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chemistry*, 210(1), 577-584. PMID:27211684. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.128>

- Araújo, W. D., Goneli, A. L. D., Corrêa, P. C., Hartmann Filho, C. P., & Martins, E. A. S. (2017). Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. *Ciência Agronômica*, 48(3), 448-457.
- Baptistini, F. M., Corrêa, P. C., Junqueira, M. S., Ramos, A. M., Vanegas, J. D. B., & Costa, C. F. (2015). Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(12), 1203-1208. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1203-1208>
- Bi, J., Yang, A., Liu, X., Wu, X., Chen, Q., Wang, Q., Lv, J., & Wang, X. (2015). Effects of pretreatments on explosion puffing drying kinetics of apple chips. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie*, 60(2), 1136-1142. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.006>
- Botrel, D. A., Rodrigues, I. C. B., Souza, H. J. B., & Fernandes, R. V. B. (2016). Application of inulin in thin-layer drying process of araticum (*Annona crassiflora*) pulp. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie*, 69(1), 32-39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2016.01.018>
- Cagnin, C., Lima, M. S., Silva, R. M., Silva, M. A. P., Plácido, G. R., Freitas, B. S. M., & Oliveira, D. E. C. (2017). Garlic: Kinetic drying and thermodynamic properties. *Bioscience Journal*, 33(4), 905-913. <http://dx.doi.org/10.14393/BJ-v33n4a2017-36886>
- Corrêa, P. C., Botelho, F. M., Oliveira, G. H. H., Goneli, A. L. D., Resende, O., & Campos, S. C. (2011). Mathematical modeling of the drying process of corn ears. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 33(1), 575-581.
- Corrêa, P. C., Oliveira, G. H. H., Botelho, F. M., Goneli, A. L. D., & Carvalho, F. M. (2010). Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. *Revista Ceres*, 57(5), 595-601. <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2010000500005>
- Costa, C. F., Corrêa, P. C., Vanegas, J. D. B., Baptistini, F. M., Campos, R. C., & Fernandes, L. S. (2016). Mathematical modeling and determination of thermodynamic properties of jabuticaba peel during the drying process. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(6), 576-580. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n6p576-580>
- Cruz, A. C., Guiné, R. P. F., & Gonçalves, J. C. (2015). Drying kinetics and product quality for convective drying of apples (cvs. Golden Delicious and Granny Smith). *International Journal of Fruit Science*, 15(1), 54-78. <http://dx.doi.org/10.1080/15538362.2014.931166>
- Deng, L. Z., Yang, X. H., Mujumdar, A. S., Zhao, J. H., Wang, D., Zhang, Q., Wang, J., Gao, Z. J., & Xiao, H. W. (2017). Red pepper (*Capsicum annuum* L.) drying: Effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and microstructure. *Drying Technology*, 36(8), 893-907. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2017.1361439>
- Doymaz, I. (2013). Experimental study on drying of pear slices in a convective dryer. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(9), 1909-1915. <http://dx.doi.org/10.1111/ijfs.12170>
- Faria, R. Q., Teixeira, I. R., Devilla, I. A., Ascheri, D. P. R., & Resende, O. (2012). Cinética de secagem de sementes de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(5), 573-583. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000500014>
- Kara, C., & Doymaz, I. (2015). Thin layer drying kinetics of by-products from pomegranate juice processing. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(5), 480-487. <http://dx.doi.org/10.1111/jfpp.12253>
- Lisbôa, J. F., Silva, J. N., Cavalcanti, M. T., Silva, E. M. C. A., & Gonçalves, M. C. (2015). Análise da hidratação de grãos de alpiste. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(3), 218-223. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p218-223>
- Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1996). Thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29(1), 75-97. [http://dx.doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00062-3](http://dx.doi.org/10.1016/0260-8774(95)00062-3)
- Martins, J. J. A., Marques, J. I., Santos, D. C., & Rocha, A. P. T. (2014). Modelagem matemática da secagem de cascas de mulungu. *Bioscience Journal*, 30(6), 1652-1660.
- Mendoza, V. S., Santos, L. L., & Sanjinez-Argadoña, E. J. (2016). Elaboração de granola com adição de polpa e castanha de bacuri para consumo com iogurte. *Evidência*, 16(2), 83-100.
- Mohapatra, D., & Rao, P. S. (2005). A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, 66(4), 513-518. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.023>
- Moreira, R., Chenlo, F., Torres, M. D., & Vallejo, N. (2008). Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. *Journal of Food Engineering*, 88(4), 514-521. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.011>
- Negrelle, R. R. B. (2013). Estrutura populacional e potencial de regeneração de *Attalea phalerata* Mart. ex Spreng. (acuri). *Ciência Florestal*, 23(4), 727-734. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509812356>
- Negrelle, R. R. B. (2015). *Attalea phalerata* Mart. ex Spreng.: Aspectos botânicos, ecológicos, etnobotânicos e agrônômicos. *Ciência Florestal*, 25(4), 1061-1066. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509820669>
- Niamnuy, C., Nachaisin, M., Laohavanich, J., & Devahastin, S. (2011). Evaluation of bioactive compounds and bioactivities of soybean dried by different methods and conditions. *Food Chemistry*, 129(3), 899-906. PMID:25212316. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.05.042>
- Olanipekun, B. F., Tunde-Akintunde, T. Y., Oyelade, O. J., Adebisi, M. G., & Adenaya, T. A. (2015). Mathematical modeling of thin-layer pineapple drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 1431-1441. <http://dx.doi.org/10.1111/jfpp.12362>
- Oliveira, G. H. H., Aragão, D. M. S., Oliveira, A. P. L. R., Silva, M. G., & Gusmão, A. C. A. (2015). Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos. *Brazilian Journal of Food Technology*, 18(4), 314-321. <http://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.5315>

Reis, F. R., Ivahashi, M. M., & Rosa, A. H. G. (2017). Effect of vacuum drying temperature on drying kinetics, effective moisture diffusivity and quality of peeled litchi (*Litchi chinensis* Sonn.). *Journal of Food Process Engineering*, 40(2), e12419. <http://dx.doi.org/10.1111/jfpe.12419>

Santos, D. C., Queiroz, A. J. M., Figueirêdo, R. M. F., & Oliveira, E. N. A. (2013). Mathematical modeling for the annatto (*Bixa orellana* L.) seed drying process. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 73(3), 320-326. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392013000300017>

Santos, D. C., Queiroz, A. J. M., Figueirêdo, R. M. F., & Oliveira, E. N. A. (2014). Difusividade efetiva e energia de ativação em farinhas de grãos residuais de urucum. *Comunicata Scientiae*, 5(1), 75-82.

Santos, D. C., Queiroz, A. J. M., Figueirêdo, R. M. F., & Oliveira, E. N. A. (2015). Sun drying of residual annatto seed powder. *Acta Scientiarum. Technology*, 37(1), 161-166. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v37i1.20582>

Silva, H. W., Rodovalho, R. S., Velasco, M. F., Silva, C. F., & Vale, L. S. R. (2016). Kinetics and thermodynamic properties related to the drying of 'Cabacinha' pepper fruits. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(2), 174-180. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n2p174-180>

Udomkun, P., Argyropoulos, D., Nagle, M., Mahayothee, B., Janjai, S., & Müller, J. (2015). Single layer drying kinetics of papaya amidst vertical and horizontal airflow. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie*, 64(1), 67-73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.022>

Xanthopoulos, G., Yanniotis, S., & Lambrinos, G. R. (2009). Water diffusivity and drying kinetics of air drying of figs. *Drying Technology*, 27(3), 502-512. <http://dx.doi.org/10.1080/07373930802686149>

Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B., & Marinos-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14(10), 2225-2253. <http://dx.doi.org/10.1080/07373939608917205>

Financiamento: Universidade Federal de Campina Grande.

Received: Feb. 07, 2018; Accepted: Oct. 02, 2018