



## **SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE MASSA EM TAMBOR HORIZONTAL PARCIALMENTE PREENCHIDO**

DAIANE B. FERREIRA<sup>1\*</sup>, JOÃO C. THOMÉO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e  
Ciência de Alimentos

\*e-mail: daiane.b.ferreira@unesp.br

**RESUMO** - Este trabalho apresenta um modelo bidimensional monofásico que descreve o transporte de massa em um ambiente isotérmico em tambor horizontal parcialmente preenchido com arroz tipo 1. O fluxo de ar é paralelo à superfície do leito, visando a aplicação na secagem dos esporos obtidos por cultivo em estado sólido em arroz. A difusividade efetiva ( $D_{eff}$ ) foi determinada experimentalmente, bem como a umidade de equilíbrio do sólido. As simulações foram realizadas em um tambor horizontal com grau de enchimento 0,5 usando baixas e altas taxas de fluxo de ar. Para atingir a umidade de interesse final da secagem de 0,111 kg-a/kg-ss, são necessárias 96 horas ou 50 dias e 92 horas ou 45 dias para atingir esta umidade na superfície do leito e na metade do leito para vazões de ar de 5 L/min e 50 L/min, respectivamente. Os resultados obtidos ajudarão a modelar processos de secagem em tambores horizontais sem a necessidade de muitos testes, economizando tempo, energia e materiais.

### **INTRODUÇÃO**

Com o aumento significativo da população mundial, atingindo aproximadamente 9,7 bilhões de pessoas até 2050 (Carvalho, 2019), a intensificação da produção agrônômica é necessária. No entanto, a sequência ininterrupta de cultivos contribui para o desenvolvimento de doenças e pragas. No Brasil, a cana-de-açúcar destaca-se como uma das culturas mais importantes desde a colonização do país (Neves; Nalaki, 2020), responsável pela produção de açúcar, etanol e diversos produtos secundários (CONAB, 2022). Embora a cana-de-açúcar tenha importância significativa para a economia, representando um mercado em constante expansão, ainda há muitos fatores que contribuem para a redução de sua produtividade. Dentre eles estão os danos causados por insetos-praga, principalmente a cigarrinha da cana-de-açúcar, *Mahanarva frimbiolata*, responsável pela redução de 25% na produtividade (Macedo *et al.*, 2012).

Visando a produção agrícola sustentável, promovendo alimentos mais saudáveis com maiores rendimentos por área e menor impacto ambiental, o controle biológico de pragas (CBP) se apresenta como uma alternativa viável e sustentável na busca da redução do uso de agroquímicos (Seiber, 2014). O Brasil está entre os principais países da América Latina que utilizam CBP, com mais de 10 milhões de hectares tratados anualmente, dos quais 2 milhões de hectares correspondem a cana-de-açúcar tratada pela aplicação do fungo entomopatogênico *Metarhizium anisopliae* (ABCBIO, 2019).

A produção em massa de esporos do fungo *M. anisopliae* é feita por cultivo em estado sólido (CES) e usa arroz como substrato. O processo de cultivo do fungo tem uma série de desafios, principalmente no que diz respeito ao seu sistema de produção e automação, com a etapas de produção sendo realizadas uma a uma e manualmente, exigindo muito tempo de preparação de insumos e mão de obra extensiva (Mendez-Gonzalez, 2018; Santa *et al.*, 2005). Isso se deve, em parte, à limitada tecnologia de

produção, bem como a falta de controles efetivos e principalmente a falta de compreensão dos mecanismos que governam a estabilidade física e biológica desses conídios (Pauli, 2014).

A secagem do material cultivado é uma das etapas do processo que precisa de grande melhoria. A secagem do material ainda é realizada na maioria das biofábricas brasileiras, abrindo as embalagens em ambiente climatizado, onde permanecem por cerca de 6 a 8 dias, sem controle efetivo. Considerando que a secagem é uma operação unitária que demanda uma quantidade intensa de energia, implicando um grande impacto comercial no custo do produto, o tambor rotativo apresenta-se como alternativa promissora para a secagem do material cultivado, dada sua alta capacidade de processamento e flexibilidade operacional, o que o torna este o equipamento mais utilizado entre todos os tipos de secadores (Sheehan *et al.*, 2005).

Modelos matemáticos têm sido usados como ferramenta para o projeto e operação de equipamentos. Modelos detalhados de uma e duas fases podem ser encontrados para leitos preenchidos (Sangsurasak; Mitchell, 1998; Mitchell *et al.*, 1999; Smits *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2010; Casciatori *et al.*, 2016), enquanto um número limitado de trabalhos é relatado para tambores horizontais em rotação ou estáticos. Alguns modelos de rotação dos tambores consideram a fase sólida bem misturada, desprezando os gradientes de temperatura e teor de umidade (Stuart, 1999, citado por Mitchell *et al.*, 2003; Nagel *et al.*, 2001). Este trabalho segue um estudo de

transferência de calor em tambores publicados por Tada *et al.* (2017), em que o efeito da assimetria do gradiente de temperatura radial foi extensivamente explorado. Um modelo para o sistema assimétrico foi introduzido e validado experimentalmente. Uma vez que, o tambor simulado por Tada *et al.* (2017) era relativamente grande (30 cm), a resistência térmica parede-leito foi significativa e heterogeneidades radiais e angulares foram bem pronunciadas. Além disso, este trabalho segue um estudo de transferência de calor em tambor horizontal para leitos de sílica e bagaço de cana-de-açúcar simulados por Tada *et al.* (2020) que apresentaram excelente concordância entre simulações e resultados experimentais para ambas as partículas.

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo de transferência de massa monofásica para um leito de arroz tipo 1 na umidade final de cultivo, até alcance da umidade de interesse, buscando melhor entender a operação de secagem.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Partícula

Foram utilizados grãos de arroz tipo 1 adquiridos em sacos plásticos de 5 kg comercializados em supermercados. O teor inicial de umidade do arroz era de 0,67 kg-água/kg-sólido seco (daqui em diante kg-a/kg-ss), umidade alcançada após o período de incubação. A caracterização das partículas de arroz tipo 1 e as metodologias empregadas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: A caracterização das partículas de arroz tipo 1 e as metodologias empregadas.

Parâmetro	Valor	Método
Diâmetro (d)	2,08 mm $\pm$ 0,26 mm	Medição direta das dimensões de cem partículas com paquímetro
Comprimento (C)	8,31 mm $\pm$ 1,10 mm	Partículas assumidas como cilindros
Volume (V)	22,96 mm <sup>3</sup>	Medido por deslocamento de fluido
Porosidade ( $\epsilon$ )	0,54	

### Modelo de transferência de massa

Um balanço de massa bidimensional monofásico baseado na Lei de Fick de Difusão foi proposto para representar o teor de umidade do sólido em um tambor horizontal estático

parcialmente preenchido, conforme apresentado na Equação 1. Nesta equação, toda variação do teor de umidade ao longo do tempo é promovida apenas pela difusão da água através do meio poroso nas direções radial, angular e axial, onde X é o teor de umidade do

sólido (kg-a/kg-ss),  $D_{eff}$  é a difusividade efetiva da água no meio poroso ( $m^2/s$ ),  $r$  e  $z$  são as coordenadas radiais e axiais (m), respectivamente, e  $t$  é o tempo (min).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \left( \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right) \right] \quad (1)$$

Observe que nenhuma variação angular de  $X$  faz parte do modelo, uma vez que, foi escrito em função da coordenada radial, como proposto por Tada *et al.* (2017) para o modelo de transferência de calor.

O modelo proposto assume algumas simplificações descritas por Tada *et al.* (2020). As condições iniciais e de contorno são apresentadas na Equação 2 a Equação 6. Nestas equações, a posição radial  $r_{i(\theta)}$  refere-se a superfície do leito, onde uma condição de contorno convectiva é assumida devido ao fluxo de ar no *headspace* e às baixas velocidades do ar aqui utilizadas; a posição radial  $r = R$  refere-se a parede do tambor, em que  $R$  é o raio do tambor (m); da mesma forma, a entrada de ar ( $z = 0$ ) e a saída de ar ( $z = L$ ), a condição de contorno de impermeabilidade também foi assumida. Nas equações  $X_0$  é o teor inicial de umidade do sólido (kg-a/kg-ss),  $\rho_s$  é a densidade do sólido seco (kg-ss/ $m^3$ ),  $h$  é o coeficiente de transferência de massa convectiva aparente (m/s),  $K$  é o coeficiente de partição (kg-ss/ $m^3$ ) e  $X_{eq}$  é o teor de umidade de equilíbrio do sólido nas condições termodinâmicas do ar (kg-a/kg-ss).

$$t = 0, \quad X = X_0 \quad (2)$$

$$r = r_{i(\theta)}, \quad \rho_s D_{eff} \frac{\partial X}{\partial r} = hK(X - X_{eq}) \quad (3)$$

$$r = R, \quad D_{eff} \frac{\partial X}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$z = 0, \quad D_{eff} \frac{\partial X}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

$$z = L, \quad D_{eff} \frac{\partial X}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

Assumindo o ar como um gás ideal, o coeficiente de partição  $K$  é dado pela Equação 7, onde  $M$  é a massa molar do ar seco (kg/mol),  $P_{sat}$  é a saturação pressão do vapor de água (Pa),  $R^*$  é a constante universal do gás ( $m^3Pa/mol K$ ),  $T$  é a temperatura (K) e  $a_w$  é a atividade de

água (adimensional), cujas isotermas de sorção foram obtidas em laboratório.

$$K = \frac{M}{R^*T} \frac{P_{sat}}{a_w} \quad (7)$$

O coeficiente  $h$  foi calculado por analogia com as conhecidas correlações de Gnielinski (1975) para transferência de calor do ar fluindo sobre uma placa plana (Kast; Klan, 2010). Tada *et al.* (2017) estimou o coeficiente de transferência de calor entre uma cama de esferas de vidro e o ar fluindo a 5 L/min no *headspace* em um tambor horizontal. Usando as correlações de Gnielinski, os valores estimados combinaram muito bem com os resultados experimentais. As relações originais foram reescritas para transferência de massa, na qual os números Nusselt e Prandtl foram substituídos pelos correspondentes números de Sherwood e Schmidt, respectivamente, representados na Equação 7 a Equação 9, onde  $Sh$  é o número de Sherwood (adimensional),  $L$  é o comprimento do leito (m),  $D$  é a difusividade molecular do vapor de água no ar ( $m^2/s$ ) e  $Re$  e  $Sc$  são números de Reynolds e Schmidt (adimensional), respectivamente.

$$Sh = \frac{hL}{D} = \sqrt{Sh_{lam}^2 + Sh_{turb}^2} \quad (7)$$

$$Sh_{lam} = 0.664Re^{1/2}Sc^{1/3} \quad (8)$$

$$Sh_{turb} = \frac{0.037Re^{0.8}Sc}{1 + 2.433Re^{-0.1}(Sc^{2/3} - 1)} \quad (9)$$

As variáveis espaciais foram aproximadas a elementos de igual tamanho pelo método das diferenças finitas, resultando em um conjunto de equações diferenciais ordinárias, que foram escritas na linguagem MATLAB R2016a (MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, EUA) para a geometria de um cilindro horizontal parcialmente preenchido e resolvido usando o solver ode15s. As simulações foram realizadas considerando um tambor de 0,28 m de diâmetro interno e 0,40m de comprimento e profundidade do leito de 0,14 m, correspondendo a 0,5 grau de enchimento. Mais detalhes sobre a aplicação do modelo nesta geometria podem ser encontrados em Tada *et al.* (2017).

Estimativa do teor de umidade de equilíbrio ( $X_{eq}$ ): A Figura 1 mostra a

configuração experimental usada para a determinação de  $X_{eq}$ . Um cilindro de PVC 2,54 cm de diâmetro e 4 cm de comprimento foi preenchido com as partículas com um teor de umidade inicial conhecido. O ar era fornecido por um compressor e teve sua vazão medida por um rotâmetro e percolado por uma coluna encamisada preenchida com sílica gel seca, deixando o ar com 15% de umidade relativa e 25 °C.

O ar seco fluiu em todo o cilindro de PVC até alcance de umidade constante. O termo-

higrômetro digital foi usado para avaliar a umidade relativa do ar. O tubo de PVC foi preenchido com 23 g de arroz tipo 1 (peso seco). Os teores iniciais de umidade adotados foram 0,15, 0,20 e 0,25 kg-a/kg-ss. As partículas eram periodicamente amostradas para a determinação do teor de umidade até alcance de peso constante. Os experimentos foram realizados em triplicata e foi feita uma análise de variância (ANOVA), seguida de uma comparação entre os valores médios pelo teste de Tukey ao nível de significância de 95%.

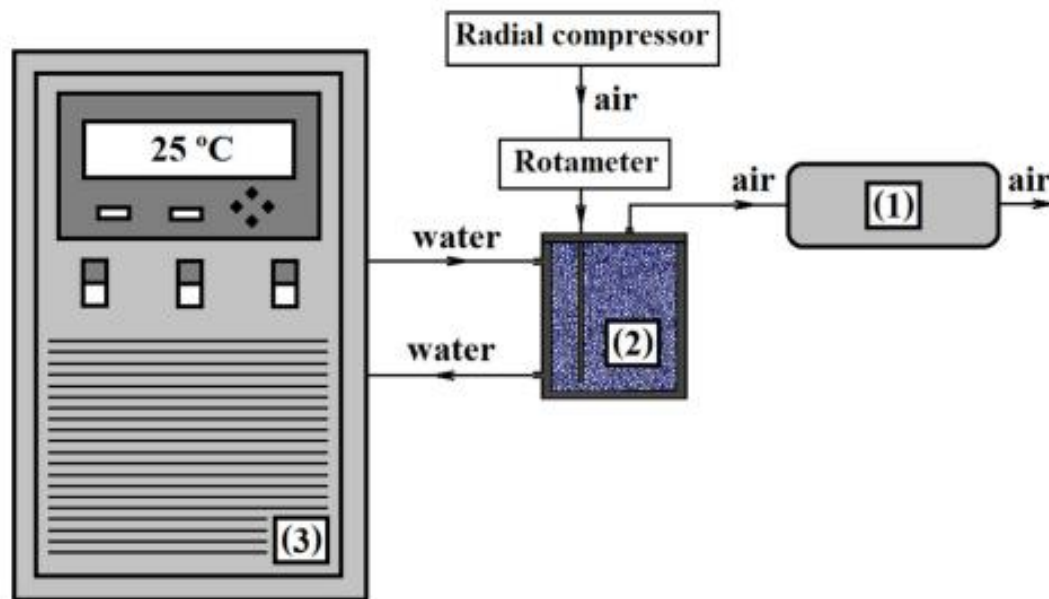


Figura 1: Configuração experimental para a determinação do teor de umidade de equilíbrio das partículas (1: tubo de PVC preenchido com as amostras; 2 – cilindro encamisado contendo sílica para remover a umidade do ar; 3 – banho termostático)

Estimativa experimental de  $D_{eff}$ : O coeficiente  $D_{eff}$  foi determinado experimentalmente em um secador de bandejas com convecção forçada de ar paralelo à superfície do leito. O ar foi mantido a 15% de umidade relativa, 25 °C e 2,1 m/s  $\pm$  0,1 m/s. Um paralelepípedo de Plexiglas de 20 cm de comprimento, 20 cm de largura e 2 cm de altura foi preenchido com as partículas úmidas e colocado na câmara de secagem. Telas metálicas com abertura de 3 mm foram colocadas na parte superior e no fundo da caixa para conter as partículas. As cinéticas experimentais foram obtidas pesando o paralelepípedo ao longo do tempo. Os experimentos foram realizados em triplicata. O  $D_{eff}$  foi estimado ajustando o modelo fickiano

clássico (Crank, 1979) para a cinética experimental usando o coeficiente ( $R^2$ ) como critério de otimização. A geometria do paralelepípedo foi considerada como uma placa semi-infinita com fluxo de massa unidirecional. Foi imposta uma condição de contorno de primeiro tipo para resolver o modelo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Teor de umidade de equilíbrio

A Tabela 2 mostra o teor de umidade de equilíbrio dinâmico para as partículas de arroz tipo 1 em altas taxas de fluxo de ar. Considerando a precisão do analisador MB45 (0,001 g), o desvio padrão (DP) observados são

confiáveis e podem ser considerados baixos, assim como os coeficientes de variação (CV).

Tabela 2: Teor de umidade de equilíbrio de partículas de arroz tipo 1 em altas vazões de ar, 25 °C e 15% de umidade relativa.

$X_0$ (kg-a/kg-ss)	$X_{eq}$ (kg-a/kg-ss)	CV
0,183±0,006	0,0406 <sup>a</sup> ±0,0134	2,91%
0,335±0,002	0,0407 <sup>a</sup> ±0,0136	1,51%
0,684±0,014	0,0418 <sup>a</sup> ±0,0139	1,13%

Não observou-se tendência da  $X_{eq}$  com o teor de umidade inicial das amostras. Também não foi observada diferença significativa das  $X_{eq}$  em função da  $X_0$ , de acordo com o teste de Tukey com nível de confiança de 95%. Falta semelhante de tendência foi relatada por Tada *et al.* (2020) para leitos de sílica e bagaço de cana-de-açúcar, no qual os teores de umidade

iniciais das partículas não afetaram a capacidade máxima de retenção de água.

### Determinação experimental de $D_{eff}$

Na Figura 2 estão apresentadas as cinéticas de secagem sob diferentes temperaturas do ar de secagem do leito de partículas de arroz tipo 1. O ajuste da solução da Segunda Lei de Fick para difusão de massa em regime transiente foi feito, fornecendo os coeficientes  $D_{eff}$  para cada um dos leitos de partículas com  $R^2 = 0,99$ .

A dependência de  $D_{eff}$  de leitos porosos de partículas inorgânicas e orgânicas em relação à temperatura foi bem descrita através de relações do tipo Arrhenius ( $R^2 \geq 0,97$ ) como apresentado na Equação 8. Este tipo de equação representa a variação do parâmetro  $D_{eff}$  em relação à temperatura e tem sido amplamente reportada pela literatura (Banga; Singh, 1994; Simal *et al.*, 1997).

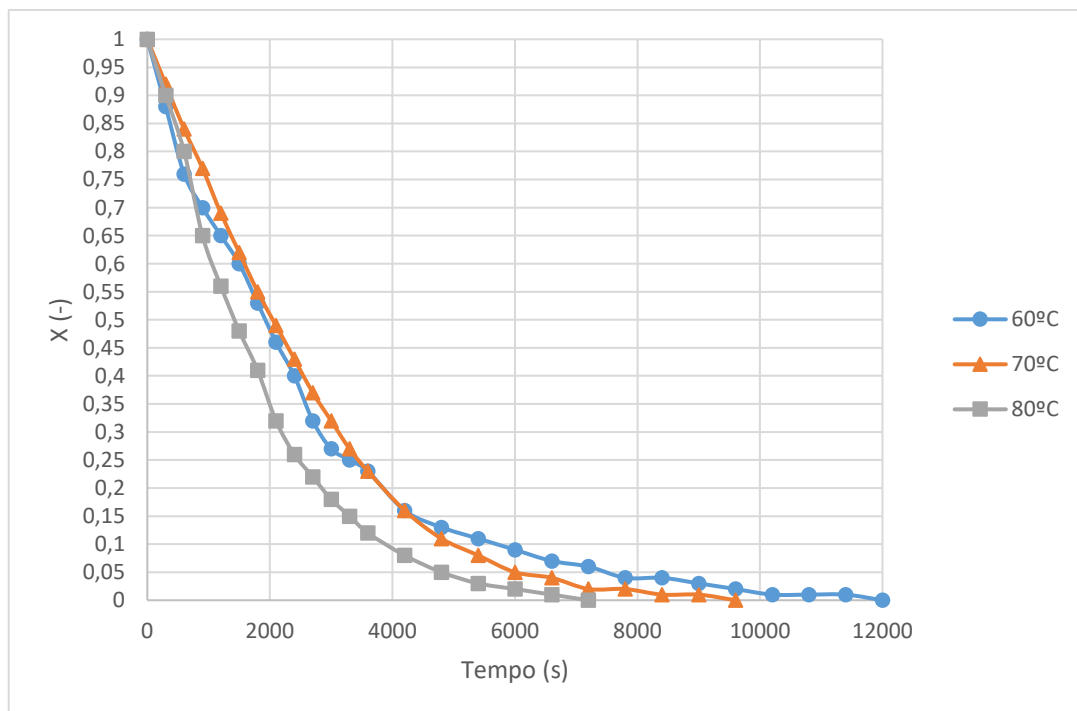


Figura 2: Cinéticas de secagem do leito de arroz tipo 1 obtidas em secagem em secador de bandejas com convecção forçada, para determinação do coeficiente efetivo de difusão de água no leito poroso,  $D_{eff}$ , para as temperaturas de 60 °C, 70 °C e 80 °C.

$$D_{eff} = 1,89 \times 10^{-4} \exp(-27265,03/R \cdot T) \quad (8)$$

A variação de 10 °C na temperatura dos ensaios promoveu variação de 40 minutos nos tempos de secagem, evidenciando a notável variação de tempo às alterações na temperatura. Os  $D_{eff}$  obtidos experimentalmente estão

apresentados na Tabela 3. A análise de variância não apontou influência estatisticamente significativa da temperatura sobre os valores de  $D_{eff}$ .

A extrapolação de  $D_{eff}$  a uma faixa de temperatura de 100 °C através da Equação 8 está apresentada na Figura 3.

Tabela 3: Valores para coeficientes efetivos de difusão ( $D_{\text{eff}}$ ) obtidos experimentalmente.

T (°C)	$D_{\text{eff}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
60	$1,001.10^{-08} \pm 8,302.10^{-13}$
70	$1,275.10^{-08} \pm 9,717.10^{-11}$
80	$1,748.10^{-08} \pm 1,588.10^{-10}$

Bedane *et al.* (2015) reportaram resultados experimentais de  $D_{\text{eff}}$  em diferentes materiais celulósicos, tais como celulose nanofibrilada e filmes de celulose regenerados obtidos de diferentes fontes, em função da umidade relativa do ar a 25 °C. Para todos os materiais, a dependência de  $D_{\text{eff}}$  foi descrita como um polinômio de segundo grau com concavidade para baixo, sendo que menores valores foram obtidos para a menor umidade relativa (10% UR) e maiores valores foram obtidos para UR em torno de 50%, com decréscimo de  $D_{\text{eff}}$  para UR superiores. A ordem de grandeza observada para o coeficiente  $D_{\text{eff}}$  foi de  $10^{-13}$  a  $10^{-14}$   $\text{m}^2/\text{s}$ .

Dado que o arroz tipo 1 é composto 30% por lignina e minerais, além da fração de celulose estima-se que os demais componentes, bem como a estrutura das fibras e do leito tenham contribuído para que os valores de  $D_{\text{eff}}$ , fossem distantes dos valores para os coeficientes de materiais celulósicos de Badane *et al.* (2015).

### Simulações de transferência de massa em tambor horizontal isotérmico parcialmente preenchido

Na Tabela 4 estão apresentados os parâmetros requeridos pelo modelo para simulação deste estudo de caso.

Na Figura 4 e Figura 5 estão apresentados perfis espaciais de umidade para um leito de arroz tipo 1 empregando as vazões de ar de 5 L/min e 50 L/min, em diferentes condições de interesse

O fluxo de massa se dá do interior para a superfície do leito e é provocado pelo gradiente de umidade instalado devido ao contato de sua superfície com o ar seco escoante. No interior do leito, o transporte é puramente difusivo e visualmente lento, gerenciado pelo baixo coeficiente de difusão efetivo. Após 96 horas e 92 horas, a camada de leito em contato com o ar escoante atingirá a umidade de interesse da operação, empregando ar a 5 L/min e 50 L/min, respectivamente. Segundo as simulações, são necessários 50 dias e 45 dias para que metade do leito atinja a umidade de interesse, estando o tambor em operação estática. Para ambas as situações não há diferença significativa no aumento da vazão de ar no tempo de secagem. Para validação do modelo faz-se necessário a verificação experimental.

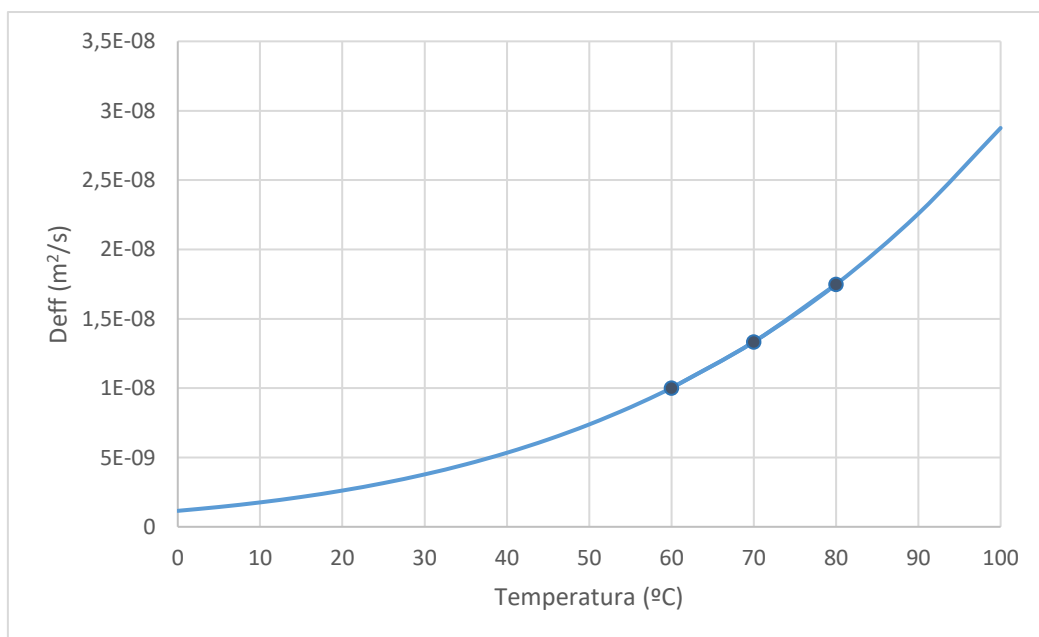


Figura 3: Comportamento de  $D_{\text{eff}}$  em leito de arroz tipo 1 em relação às variações de temperatura

Tabela 4: Parâmetros requeridos pelo modelo para simulação de transporte de massa em tambor horizontal parcialmente preenchido.

Símbolo	Descrição	Valor
<i>Variáveis independentes</i>		
GE	Grau de enchimento	0.5
R	Raio do tambor	0.14 m
L	Comprimento do tambor	0.40 m
<i>Parâmetros operacionais</i>		
Q	Vazão de ar	5 L/min    50 L/min
T	Temperatura do leito	30°C
T <sub>g</sub>	Temperatura do ar de entrada	30°C
T <sub>w</sub>	Temperatura da parede do tambor	30°C
X <sub>abs</sub>	Umidade absoluta do ar na temperatura	0,064 kg-a/kg-ar seco
<i>Parâmetros iniciais, de equilíbrio e de interesse</i>		
X <sub>0</sub>	Umidade inicial do arroz tipo 1	0,667 kg-a/kg-ss
X <sub>eq</sub>	Umidade de equilíbrio do arroz tipo 1	0,014 kg-a/kg-ss
X <sub>f</sub>	Umidade de interesse do arroz tipo 1	0,111 kg-a/kg-ss
<i>Parâmetros de transporte</i>		
D <sub>eff</sub>	Coefficiente efetivo de difusão da água no leito	3.779.10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s

Os tempos elevados para secagem do leito devem-se a ocorrência do transporte de massa apenas através da superfície do leito. Uma vez que o ar fluindo no *headspace* é a única força motriz para a remoção da água, e a parede do tambor foi considerada impermeável nas simulações. De qualquer forma, tendo em vista que os conídios sobrevivem melhor a altas temperaturas do campo quando o processo de secagem é realizado de forma gradativa e lenta, resultados estes evidenciados por Hong, Jenkins e Elis (2020), temperaturas brandas devem ser escolhidas.

Mesmo que temperaturas muito baixas aumentem o tempo de secagem, resultando em um alto consumo de energia (Arora, 2018), deve-se priorizar a qualidade do produto final. Desta forma a seleção cuidadosa da temperatura de secagem considerando, o consumo

energético, a viabilidade técnica e econômica e a manutenção das características desejadas no produto, devem ser realizadas. Além disso, levando-se em consideração que na produção tradicional, porções de 400g de material cultivado demandam de 144 a 192 horas para atingir a umidade de interesse, a secagem em tambor pela passagem de ar seco já se mostra vantajosa (Jenkins et al., 1998).

Rotações serão empregadas futuramente a operação de secagem, podendo ser contínuas ou intermitentes a depender da tolerância do microrganismo à agitação mecânica, pois cisalhamentos excessivos podem ser prejudiciais às suas estruturas miceliais (Raghavarao *et al.*, 2003). Estas devem ser suficientes para que se intensifiquem as taxas de transferências de calor e massa e favoreçam o processo (Reu *et al.*, 1993).

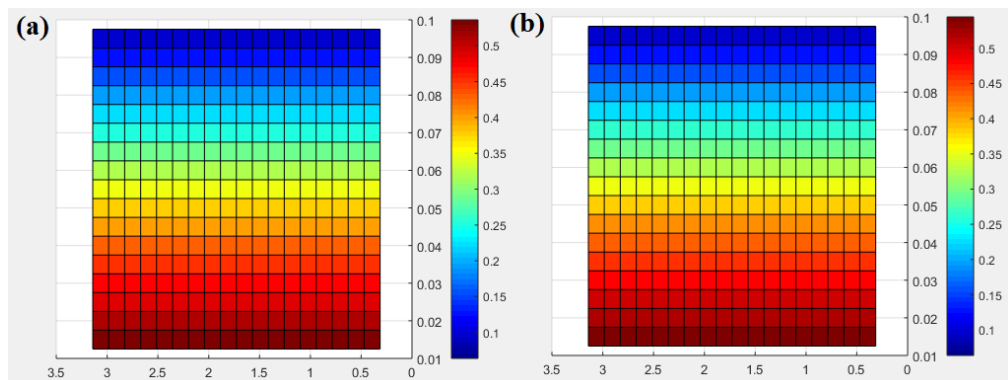


Figura 4: Perfis espaciais de umidade com introdução de ar até alcance da X<sub>f</sub> na superfície do leito a (a) 5 L/min e (b) 50 L/min.

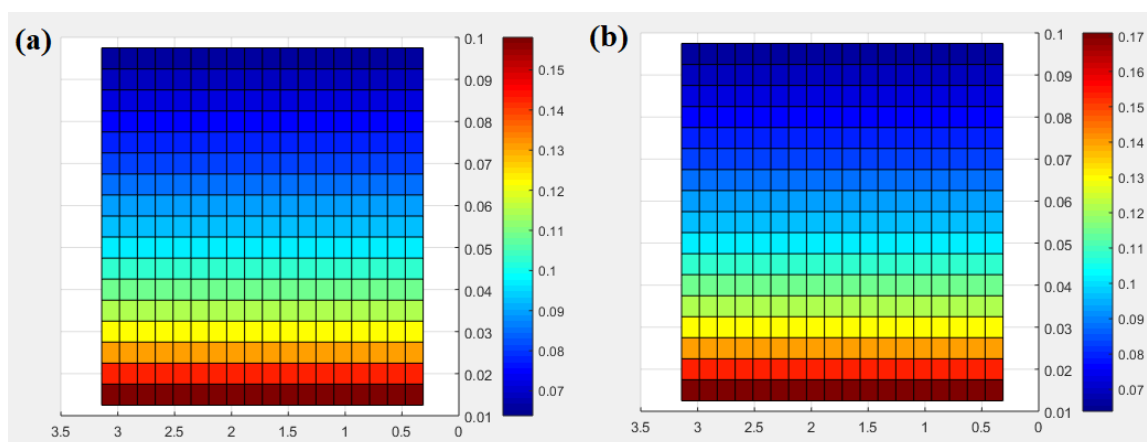


Figura 5: Perfis espaciais de umidade com introdução de ar até alcance da  $X_f$  até a metade do leito a (a) 5 L/min e (b) 50 L/min.

## CONCLUSÃO

Um balanço de massa bidimensional foi proposto para prever perfis espaciais e temporais de teor de umidade em um tambor horizontal isotérmico parcialmente preenchido com partículas, com fluxo de ar em baixa e altas taxas de fluxo em todo o *headspace*. Para o processo de simulação, valores experimentais da difusividade efetiva de transferência de massa ( $D_{eff}$ ) para o leito de arroz tipo 1 foram determinados. As simulações empregando uma temperatura de secagem de 30°C demandaram 96 e 92 horas para a secagem da superfície do leito, 50 e 45 dias para a secagem da metade do leito, operando estaticamente com ar seco escoando a 5 L/min e 50 L/min, respectivamente. Estes são tempos elevados para a secagem, justificados pela operação estática e temperatura branda adotada. No entanto, já se mostram vantajosos quando comparado ao tempo demandado na produção tradicional. Experimentos em um tambor horizontal estático preenchido com arroz tipo 1 devem ser realizados para baixas e altas vazões de ar seco para validação do modelo. O leito em baixas e altas vazões de ar demandam tempos extensivos para alcance da umidade final de interesse, no entanto estes podem ser drasticamente reduzidos através da rotação do tambor, que deverão posteriormente ser caracterizados.

## REFERÊNCIAS

- ABC BIO. Biodefensivos: Mercado E Percepção Do Produtor Brasileiro. n. ABCBio, p. 32–37, 2019.
- ARORA, S. Effect of mixing events on the production of a thermo-tolerant and acid-stable phytase in a novel solid-state fermentation bioreactor. *Process Biochemistry*, v. 61, p. 12–23, 2018.
- BANGA, J. R.; SINGH, R. P. Optimization of air drying of foods. *Journal of Food Engineering*, v. 23, n. 2, p. 189–211, 1994.
- BEDANE, A. H.; EIC, M.; FARMAHINI-FARAHANI, M.; XIAO, H. Water vapor transport properties of regenerated cellulose and nanofibrillated cellulose films. *Journal of Membrane Science*, v. 493, p. 46–57, 2015.
- CARVALHO, J. A. M. Crescimento populacional e estrutura demográfica no Brasil. Cedeplar, Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- CASCIATORI, F. P.; BÜCK, A.; THOMÉO, J. C.; TSOTSAS, E. Two-phase and twodimensional model describing heat and water transfer during solid-state fermentation within a packed-bed bioreactor. *Chemical Engineering Journal*, v. 287, p. 103–116, 2016.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Produção de grãos chega a 251,9 milhões de toneladas e mantém recorde da safra. (2020). Disponível em: < [https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/3282-producao-de-graos-chega-a-251-9-](https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/3282-producao-de-graos-chega-a-251-9-milhoes-de-toneladas-e) milhoes-de-toneladas-e



- mantem-recorde-da-safra-brasileira >. Acesso em 28 de julho de 2022.
- CRANK, J. *The mathematics of diffusion*, 2<sup>a</sup> ed. Oxford University Press. 1979.
- GNIELINSKI, V. New equations for heat and mass transfer in the turbulent flow in pipes and channels. NASA STI/Recon Technical Report A, v. 75, p. 8-16, 1975.
- KAST, W.; KLAN, H. Heat transfer by free convection: external flows. In: VDI Heat Atlas, Abschnitt M7, Auflage. Springer Verlag: Berlin, 2010.
- MACEDO, N. et al. Manejo de pragas e nematoides. Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol. Viçosa, 2. ed. UFV, p. 120-143, 2012.
- MENDEZ-GONZALEZ, F.; LOERA, O.; FAVELA-TORRES, E. Conidia production of *Metarhizium anisopliae* in bags and packed column bioreactors. *Current Biotechnology*, v. 7, n. 1, p. 65–69, 2018.
- MITCHELL, D. A.; PANDEY, A.; SANGSURASAK, P.; KRIEGER, N. Scale-up strategies for packed-bed bioreactors for solid-state fermentation. *Process Biochemistry*, v. 35, p. 167-178, 1999.
- MITCHELL, D. A.; VON MEIEN, O. F.; KRIEGER, N. Recent developments in modeling of solid-state fermentation: heat and mass transfer in bioreactors. *Biochemical Engineering Journal*, v. 13, n. 2-3, p. 137-147, 2003.
- NAGEL, F. J. J. I.; TRAMPER, J.; BAKKER, M. S. N.; RINZEMA, A. Model for On-Line Moisture-Content Control During Solid-State Fermentation. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 72, n. 2, p. 231-243, 2001.
- NEVES, M. F.; NALAKI, R. B. *Bioenergy from sugarcane*. 1. ed. Guariba, SP: Socicana, 2020.
- PAULI, G. Incremento da vida de prateleira de *Metarhizium anisopliae* e *Beauveria bassiana* em dispersões oleosas através de secagem de conídios, surfactantes e aditivos. 2014. 159 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- RAGHAVARAO, K. S. M. S.; RANGANATHAN, T. V.; KARANTH, N. G. Some engineering aspects of solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, v. 13, p. 127-135, 2003.
- REU, J. C.; ZWIETERING, M. H.; ROMBOUTS, F. M.; NOUT, M. J. R. Temperature control in solid substrate fermentation through discontinuous rotation. *Applied Microbiology and Technology*, v. 40, p. 261-265, 1993.
- SANGSURASAK, P.; MITCHELL, D. A. Validation of a model describing twodimensional heat transfer during solid-state fermentation in packed bed bioreactors. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 60, n. 6, p. 739-749, 1998.
- SANTA, H. S. D. et al. Spore production of *Beauveria bassiana* from agro-industrial residues. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 48, n. SPEC. ISS., p. 51–60, 2005.
- SEIBER, J. N.; COATS, J.; DUKE, S. O.; GROSS, A. D. Biopesticides: state of the art and future opportunities. *Journal of agricultural and food chemistry*, v. 62, n. 48, p. 11613-11619, 2014.
- SHEEHAN, M. E.; BRITTON, P. F.; SCHNEIDER, P. A. A model for solids transport in flighted rotary dryers based on physical considerations. *Chemical Engineering Science*, v. 60, n. 15, p. 4171–4182, 1 ago. 2005. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2005.02.055>.
- SIMAL, S.; DEYA, E.; FRAU, M.; ROSSELLO, C. Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes. *Journal of Food Engineering*, v. 33, n. 1-2, p. 139-150, 1997.
- SMITS, J. P.; RINZEMA, A.; TRAMPER, J.; CAN SONSBEK, H. M.; HAGE, J. C.; KAYNAK, A.; KNOL, W. The influence of temperature on kinetics in solid-state fermentation. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 22, p. 50-57, 1998.
- STUART, D. M.; MITCHELL, D. A.; JOHNS, M. R.; LITSTER, J. D. Solid-state fermentation In rotating drum

bioreactors: Operating variables affect performance through their effects on transport phenomena. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 63, n. 4, p. 382-391, 1999.

TADA, E. F. R.; BÜCK, A.; CASCIATORI, F. P.; TSOTSAS, E.; THOMÉO, J. C. Investigation of heat transfer in partially filled horizontal drums. *Chemical Engineering Journal*, v. 316, p. 988-1003, 2017.

TADA, É. F. R., BÜCK, A., TSOTSAS, E., THOMÉO, J. C. Mass transport in a partially filled horizontal drum: modelling and experiments. *Chemical Engineering Science*, v. 214, p. 115448, 2020.

WANG, E. Q., LI, S., TAO, L., GENG, X., LI, T. Modeling of rotating drum bioreactor for anaerobic solid-state fermentation. *Applied Energy*, v. 87, n. 9, p. 2839-2845, 2010.