

Estudo da secagem de cornichão em leito fixo com escoamento de ar paralelo

Akel Ferreira Kanaan

Lucas Carvalho de Oliveira

Camila Gomes Flores

João Carlos Pinto Oliveira

André Ricardo Felkl de Almeida

RESUMO

Estudo da Secagem de Cornichão em Leito Fixo com Escoamento de Ar Paralelo. Este estudo teve como objetivos avaliar o processo de secagem das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em secador de leito fixo com escoamento de ar paralelo. Para alcançar este objetivo, o trabalho foi desenvolvido nas seguintes etapas: caracterização física e fisiológica das sementes, análise do processo de reumidificação, estudo das isotermas de desorção das sementes reumidificadas e avaliação dos efeitos da variação da temperatura, da velocidade do ar e da altura da bandeja sobre a cinética de secagem. Os resultados obtidos para a umidade em base úmida das sementes secas ficaram na faixa de 5 % para as secagens realizadas a 60 °C e 8 % para as secagens realizadas a 40 °C. No que se refere à germinação, os valores encontrados foram na ordem de 44,0 a 59,0 % para as sementes que passaram pelo processo de secagem artificial, de 66,0 % para semente não reumidificada e de 55,6 a 68,0 % para sementes reumidificadas. Os dados experimentais obtidos mostraram que as condições de secagem podem influenciar significativamente a umidade de armazenamento e a qualidade fisiológica do produto final, refletida nos valores de germinação.

Palavras-chave: *Lotus corniculatus*. *Semente forrageira*. *Germinação*.

ABSTRACT

Study of Drying of birdsfoot trefoil seed in fixed bed dryer with parallel air flow. The objective of this research was to study the drying process of birdsfoot trefoil seed (*Lotus corniculatus* L.) in fixed bed dryer with parallel air flow. In order to achieve this objective, the research was developed in the following stages: physical and physiological characterization of seeds, the moisturizing process analysis, study the desorption isotherms of remoisted seeds and assessment of the effects of the variation of temperature, air speed and height of the tray on the kinetics of drying. The results obtained for the moisture in humid base dry seeds range 5 % to the drying held 60 °C and 8 % for dryings held 40 °C. As regarded to germination, the values found were in the order of 44.0 to 59.0 % for the dry seed, of remoisted seed not 66.0 % and 55.6 to 68.0 % for remoisted seeds. The experimental data obtained showed that the drying conditions can significantly influence the storage humidity and the physiological quality of the final product, reflected in the values of the germination.

Key words: *Lotus corniculatus*. *Forage seed*. *Germination*.

INTRODUÇÃO

A vegetação nativa do Rio Grande do Sul (RS) é composta por aproximadamente 75 % de pastagens nativas, as quais apresentam um crescimento vegetativo em condições de clima quente. No entanto, durante a estação de clima frio há uma diminuição na produção de pastagens (MOTA et al. 1981).

Para contornar este quadro, torna-se necessária o estabelecimento de forrageiras adaptadas ao clima frio. Dentre as forrageiras mais adaptáveis ao frio evidencia-se o cornichão (*Lotus corniculatus* L.). Trata-se de uma leguminosa forrageira hibernal utilizada em ampla escala no RS, destacando-se pela boa capacidade colonizadora e permissão para ser empregada em consórcio com outras espécies forrageiras (DIAZ et al. 2005).

Curtis & Mckersie (1984) informam que, apesar de suas qualidades, há alguns fatores negativos que influenciam o estabelecimento e persistência no cultivo do cornichão. No que se refere à qualidade das sementes, o fator limitante se deve a baixa germinação. De modo geral os valores encontrados para o cornichão são de aproximadamente 60 %, valor considerado baixo e que está vinculado ao processo de beneficiamento que tem como etapa limitante a secagem (KANNAN, 2014).

Em termos fundamentais, a secagem pode ser definida com a remoção de líquido de um sólido por evaporação. Sendo assim, o material úmido que entra em contato com o ar insaturado sofre uma transferência simultânea de calor e de massa promovendo uma diminuição do conteúdo de umidade do material e a umidificação do ar (HAGHI & AMANIFARD, 2008). Dois estágios definem o processo secagem, o aquecimento do material e a evaporação de umidade até alcançar a umidade de equilíbrio (OLIVEIRA et al. 2006).

Segundo Ferrari (2011) as principais vantagens da secagem artificial são a possibilidade de antecipação da colheita e redução da perda no campo ocasionada por condições e alterações climáticas e/ou pela ação de pragas e insetos. Além disso, a colheita antecipada também possibilita a comercialização em épocas de entressafra, permitindo uma oferta de produtos de melhor qualidade, pela alta porcentagem de germinação e vigor.

A vida útil de produtos da agroindústria está diretamente relacionada com os processos de secagem e de armazenamento. Logo a importância do conhecimento da relação entre a umidade do material e a umidade relativa do ar se torna imprescindível (SAMAPUNDO et al. 2007). O estudo da umidade relativa de materiais pode ser feito mediante a avaliação de isotermas de sorção, no qual as isotermas correspondem a uma relação física entre a umidade do material e a umidade relativa correspondente a uma determinada temperatura (ALEXANDRE et al. 2007).

Apesar de o cornichão (*Lotus corniculatus* L.) ser uma forrageira bem difundida no mercado, a literatura ainda não fornece informações técnicas sobre suas propriedades físicas e fisiológicas, isotermas de desorção e cinética de secagem. Estudos sobre esses parâmetros são necessários para otimizar o processo de beneficiamento deste material com o intuito de permitir a obtenção de um produto com melhor qualidade, menor custo e que satisfaça as exigências dos consumidores. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo realizar um estudo sobre o processo de secagem da semente de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em secador de leito fixo com escoamento de ar em paralelo.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) conforme ilustra a Figura 1, fornecidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Pecuária Sul localizada cidade de Bagé/RS. Todos os experimentos foram realizados a partir de um mesmo lote de sementes com o intuito de garantir um material com as mesmas características físicas e fisiológicas iniciais. As análises realizadas procederam nos laboratórios de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa.

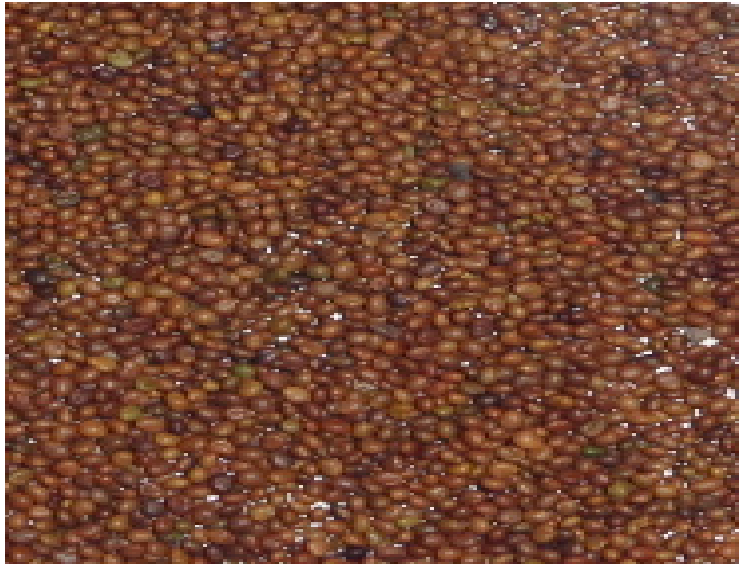


Figura 1: sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.).

Caracterização Física e Fisiológica

A umidade das sementes foi determinada através do método gravimétrico recomendado pela Association of Official Analytical Chemists - AOAC (1997). Os demais ensaios referente a caracterização física foram desenvolvido a partir da metodologia adotada por Cremasco, (2012). A técnica de picnometria gasosa para determinar a massa específica real (ρ_r), ensaio de proveta para determinar a massa específica *bulk* (ρ_b), ensaio de funil fixo para determinar o ângulo de repouso (θ), peneiramento para determinar o diâmetro médio de Sauter (d_s) e paquimetria para determinar o fator de forma esfericidade (ϕ). A porosidade do leito de sólidos (ϵ) foi determinada pela relação entre a massa específica real e a massa específica *bulk*.

Para a caracterização fisiológica foram efetuados testes de germinação seguindo a metodologia recomendada nas Regras para Análise de Sementes (Brasil., 1992). Esta análise constituiu na utilização de caixas gerbox juntamente com papel filtro embebido em água, onde foram distribuídas 100 sementes. As amostras foram submetidas a um confinamento controlado em uma germinadora da marca Nova Ética e modelo 403-3D, operando na temperatura de 20 °C na influência de luz solar natural. As contagens das plântulas procederam no quarto e décimo segundo dia após o início do teste.

Estudo de Reumidificação

As sementes de cornichão, fornecidas pela Embrapa Pecuária Sul, já haviam sido beneficiadas e tratadas para as condições ideais de mercado, logo, para a realização deste trabalho, foi necessário submetê-las a um processo de reumidificação. O estudo do processo de reumidificação foi realizado de acordo com a metodologia de saturação proposta por Arnost Jr. (1997). Essa consistiu em expor as sementes em ambiente fechado e saturado sob as temperaturas de 30, 35 e 40 °C. O equipamento utilizado para promover o ambiente fechado e saturado foi um banho termostaticado marca Quimis e modelo Q215M2. A cada 24 h e também no término do processo de reumidificação, foi determinado o teor de umidade das sementes pela metodologia da AOAC (1997) e os índices de germinação, pela Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 1992).

Isotermas de Dessorção

As isotermas de dessorção foram determinadas pelo método gravimétrico estático, utilizando-se soluções de ácido sulfúrico em onze diferentes concentrações que garantiram a variação da umidade relativa do ar de 5 a 89 %. Os experimentos foram conduzidos nas temperaturas (T) de 40, 50 e 60 °C. Cada análise foi realizada em triplicata, utilizando-se recipientes de vidros hermeticamente fechados, suporte e cadinho de plástico. No interior de cada recipiente foram inseridos 30 mL das soluções de ácido sulfúrico. Também foi inserido em cada cadinho de plástico aproximadamente 2,5 g de sementes de cornichão reumidificada.

Os recipientes de vidros hermeticamente fechados foram colocados em estufa de circulação forçada marca Nova Ética, modelo 400-5ND nas temperaturas de estudo, sendo realizadas pesagens em uma balança analítica marca Shimadzu e modelo AUY220 do cadinho plástico no primeiro, sétimo, décimo e décimo quarto dia de experimento. Essas pesagens foram feitas com o objetivo de verificar o equilíbrio mássico para cada atmosfera estudada. Com o equilíbrio mássico alcançado no décimo quarto dia, determinou-se a umidade em base úmida (U_{BU}) e a umidade em base seca (U_{BS}) das sementes através do método gravimétrico recomendado pela AOAC (1997). Os resultados obtidos nas isotermas foram analisados através do ajuste dos dados experimentais aos modelos de BET, GAB, Oswin e Peleg em substituição das Equações 1 a 4 respectivamente, através de um programa computacional.

$$X_e = \frac{[(X_m \cdot c \cdot a_w) \cdot [1 - (n + 1) \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1}]]}{(1 - a_w) \cdot [1 - (1 - c) \cdot a_w - c \cdot a_w^{n+1}]} \quad (1)$$

$$X_e = \frac{X_m \cdot Ct \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - k \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)} \quad (2)$$

$$X_e = \left[-\frac{\ln(1 - a_w)}{a} \right]^{1/b} \quad (3)$$

$$X_e = a \cdot \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^b \quad (4)$$

em que a , b , C , C_p , k e n , são constantes de modelo, a_w é a atividade de água e X_m é umidade de monocamada molecular.

Cinética de Secagem

Para o estudo da cinética de secagem das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus*) foi utilizado um secador de bandeja com escoamento paralelo de ar marca ECO Educacional, conforme mostra a Figura 2.



Figura 2: secador de leito fixo com escoamento de ar paralelo. (1) soprador centrífugo, (2) trocador de calor, (3) painel de controle, (4) balança digital e (5) anemômetro de ventoinha.

As variáveis estudadas no processo de secagem foram a temperatura do ar de secagem (T) de 40, 50 e 60 °C, a velocidade do ar (v) em níveis de 1,0, 1,5 e 2,0 m/s e altura da bandeja (h) nas dimensões de 0,005, 0,075 e 0,01 m. Nas secagens a carga de sólidos na bandeja variava entre 22 e 45 g, aproximadamente, conforme altura da bandeja utilizada. Para cada condição estudada, o sistema foi monitorado de 5 em 5 minutos para os primeiros 30 minutos da secagem e de 10 em 10 minutos até o sistema alcançar o equilíbrio mássico.

As variáveis medidas durante os experimentos foram às temperaturas de bulbo seco (TBS) e bulbo úmido (TBU) do ar na entrada, a temperatura do ar de secagem (T) e a massa na bandeja (m). Com os valores da TBS e TBU na entrada do secador e com o valor da T do ar de secagem, determinou-se a umidade relativa (UR) e absoluta (UA) antes e após o aquecimento do ar de secagem. Para cada experimento realizado, os teores da U_{BU} das sementes, tanto antes como após o processo de secagem, foram obtidos através da metodologia recomendada pela AOAC (1997), também foram determinados os valores de germinação (G) do produto final pela metodologia recomendada nas Regras para Análise de Sementes (Brasil, 1992).

Foram analisadas as curvas de adimensional de umidade livre em função do tempo para cada ensaio proposto. A partir dos dados do adimensional de umidade livre em função do tempo determinaram-se as difusividades efetiva de cada ensaio de secagem pelo ajuste dos dados aos modelos da Lei de Fick, Page, Midilli e Henderson, em substituição das Equações 5 a 8, respectivamente.

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\left(\frac{\pi}{e_0}\right)^2 D_{ef} t\right] \quad (5)$$

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = \exp(-kt^n) \quad (6)$$

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = a_1 \cdot \exp(-k \cdot t) + b_1 \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c_1 \cdot \exp(-k_1 \cdot t) \quad (7)$$

$$\frac{X_t - X_e}{X_{t_0} - X_e} = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t \quad (8)$$

em que a_p , a , b_p , c_1 e n são constantes dos modelos, e_0 é a espessura de sólidos na bandeja, X_t é umidade média no tempo t , X_{t0} é a umidade no tempo inicial, X_e é a umidade de equilíbrio, k_o , k_1 e k são as constantes de secagem e t é o tempo.

O coeficiente de determinação (R^2) e o erro médio relativo (P_p), conforme mostra a Equação 10, foram os critérios abordados para decidir o modelo de isoterma de dessecção e o modelo da cinética de secagem que mais se adequou ao comportamento obtido para as sementes de cornichão.

$$P_p = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_{eExp} - X_{ePre}|}{X_{eExp}} \quad (10)$$

em que X_{eExp} é a umidade de equilíbrio obtida experimentalmente, X_{ePre} é a umidade de equilíbrio predita pelo modelo e n é o número de observações experimentais. Nessa perspectiva, para um bom ajuste matemático dos modelos, P_p deve ser menor que 10 % e R^2 próximo à unidade (MOHAPATRA e RAO, 2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos na caracterização física e fisiológica das sementes de cornichão fornecidas pela Embrapa Pecuária Sul.

Tabela 1: resultados da caracterização física e fisiológica das sementes de cornichão.

Propriedade	Valor*
U_{BU} (%)	10,00 ± 0,06
d_s (mm)	1,37 ± 0,01
ρ_r (kg/m ³)	1363,66 ± 0,67
ρ_b (kg/m ³)	858,28 ± 5,30
ε	0,37 ± 0,01
ϕ	0,98 ± 0,01
θ (°)	25,34 ± 0,01
G (%)	66,00 ± 3,33

*Valor médio ± desvio padrão (Triplicata).

Ao analisar a Tabela 1 verifica-se que o valor de U_{BU} obtido encontra-se na faixa indicada (10 a 12 %) para a comercialização de sementes (MACEDO et al. 1987). Os valores obtidos para o diâmetro de Sauter (d_s), massa específica real (ρ_r), massa específica de *bulk* (ρ_b), porosidade (ε), esfericidade (ϕ) e ângulo de repouso (θ) não houve comparação com a literatura devido à inexistência de dados deste tipo nas bibliografias consultadas. O ensaio de germinação das sementes de cornichão apresentou um valor médio de 66,00 % ficando dentro dos padrões exigidos comercialmente pela Secretaria da Agricultura do Estado.

Na Figura 3 são apresentados os resultados de umidade das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em base úmida em função do tempo de exposição na atmosfera saturada do processo de reumidificação.

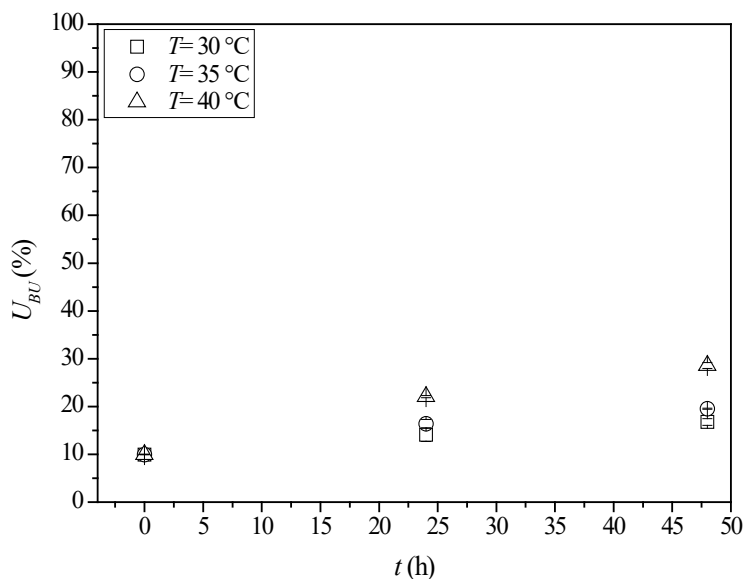


Figura 3: umidade das sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em base úmida em função do tempo.

Observa-se na Figura 3 que o processo de reumidificação foi eficiente, visto que permitiu elevar o teor de umidade das sementes de aproximadamente 10 % em base úmida para valores compreendidos entre 14 a 27 % em base úmida. Verifica-se também que o processo de reumidificação realizado na temperatura de 40 °C foi o mais eficiente, visto que possibilitou colocar as sementes em teores de umidade compreendidos entre 20 a 27 % em base úmida. Este valor de umidade encontra-se próximo ao valor das sementes forrageiras colhidas nas lavouras comerciais e que passaram pelo processo de limpeza antes de serem secas e enviadas ao mercado (HAMM, 2014).

Na Tabela 2 são apresentados os valores de germinação das sementes de cornichão antes da reumidificação e das sementes reumidificadas nas diferentes condições experimentais estudadas.

Tabela 2: germinação das sementes antes da reumidificação e das sementes reumidificadas nas diferentes condições experimentais.

Semente	Contagem 4º dia	Contagem 12º dia	Total	Média ± desvio
Não Reumidificada	69, 60, 63	1, 2, 3	70, 62, 66	66,0 ± 3,3 %
30 °C em 24 h	66, 66, 57	0, 3, 5	66, 69, 62	65,6 ± 3,5 %
30 °C em 48 h	53, 39, 54	19, 27, 12	72, 66, 66	68,0 ± 3,5 %
35 °C em 24 h	63, 50, 56	3, 4, 4	66, 54, 60	60,0 ± 6,0 %
35 °C em 48 h	50, 59, 49	4, 3, 2	54, 62, 51	55,6 ± 5,6 %
40 °C em 24 h	68, 60, 60	3, 1, 4	71, 61, 64	65,3 ± 5,1 %
40 °C em 48 h	66, 56, 59	2, 1, 3	68, 57, 62	62,3 ± 5,5 %

A Tabela 2 mostra que os valores de germinação obtidos para as sementes não reumidificadas são muito próximos aos das sementes reumidificadas. Por conta disso, foi possível afirmar que o processo de reumidificação não causou nenhum tipo de dano fisiológico nas sementes. Os resultados da Tabela 2, aliados aos da Figura 2, permitiram definir que o processo de reumidificação mais adequado para as sementes de cornichão (*Lotus corniculatus* L.) foi o que ocorreu nas condições de temperatura de 40 °C em um período de 24 h. Nessas condições, foi encontrado o maior percentual de vigor das sementes de cornichão, sendo as sementes mais vigorosas aquelas que germinaram de maneira mais uniforme e numerosa no 4º dia do processo.

A Tabela 3 apresenta os valores dos parâmetros calculados a partir do ajuste dos dados aos modelos de GAB, BET, Oswin, Peleg e Henderson, juntamente com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e o erro médio relativo (P_p).

Tabela 3: parâmetros calculados a partir do ajuste dos dados aos modelos de GAB, BET, Oswin, Peleg e Henderson em diferentes temperaturas.

Modelo	Valor do parâmetro a 40 °C	R^2	P_p (%)
BET	$X_m = 0,043, C = 1,244E+45, n = 6,457$	0,964	2,420
GAB	$X_m = 0,051, C = 172,256, k = 0,749$	0,995	1,093
Oswin	$a = 0,085, b = 0,273$	0,984	2,523
Peleg	$k_1 = 0,088, n_1 = 0,231, k_2 = 0,117, n_2 = 4,511$	0,997	0,817
Henderson	$a = 338,364 b = 2,573$	0,935	2,653
Modelo	Valor do parâmetro a 50 °C	R^2	P_p (%)
BET	$X_m = 0,038, C = 1,055E+45, n = 8,455$	0,964	3,547
GAB	$X_m = 0,045, C = 133,770, k = 0,815$	0,993	1,827
Oswin	$a = 0,081, b = 0,330$	0,981	2,916
Peleg	$k_1 = 0,091, n_1 = 0,306, k_2 = 0,162, n_2 = 5,933$	0,995	0,262
Henderson	$a = 107,215 b = 2,058$	0,931	3,139
Modelo	Valor do parâmetro a 60 °C	R^2	P_p (%)
BET	$X_m = 0,033, C = 4,172E+48, n = 8,728$	0,938	2,427
GAB	$X_m = 0,040, C = 70,328, k = 0,814$	0,974	2,222
Oswin	$a = 0,070, b = 0,342$	0,979	3,332
Peleg	$k_1 = 0,098, n_1 = 0,456, k_2 = 0,235, n_2 = 11,602$	0,989	1,686
Henderson	$a = 106,787 b = 1,941$	0,935	4,137

Pela análise da Tabela 3, observa-se que o modelo de Peleg foi o que melhor descreveu o comportamento das isotermas de dessecção das sementes de cornichão obtendo R^2 entre 0,989 a 0,997 e um P_p 0,268 a 1,686 para as três temperaturas em estudo. Os parâmetros de ajuste para o modelo de Peleg encontrados neste estudo estão de acordo com os valores de Vásquez et al. (2013) que encontrou para as constantes resultados de $n_1 < 1$ e $n_2 > 1$, em temperaturas similares.

A Figura 4 apresenta as curvas da umidade de equilíbrio em função da atividade de água das sementes de cornichão reumidificadas. Nessas curvas são mostradas as isotermas de desorção experimentais das sementes de cornichão nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C ajustadas aos modelo de Peleg.

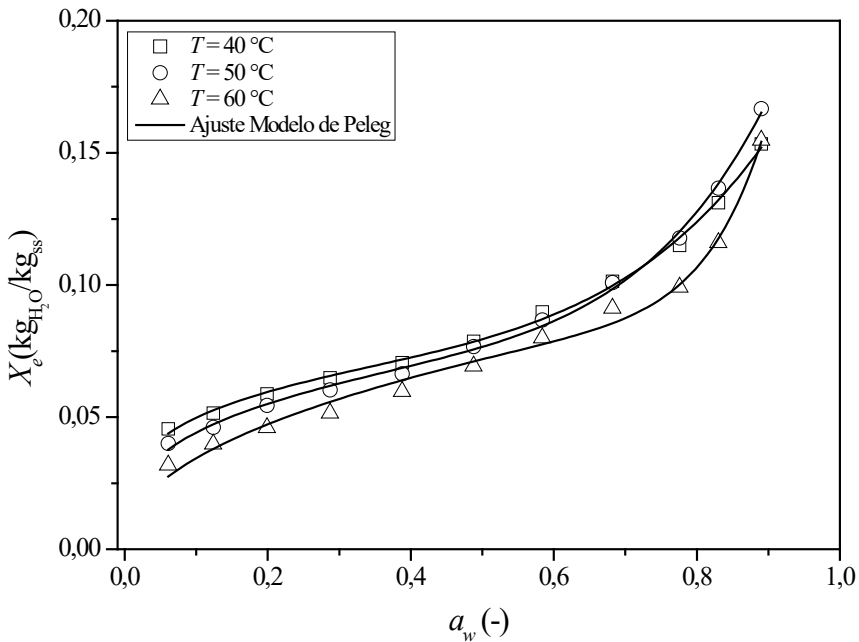


Figura 4: umidade de equilíbrio em função da atividade de água das sementes de cornichão reumidificadas, dados experimentais e ajuste do modelo de Peleg.

Através da análise do comportamento da isoterma apresentada na Figura 4, verifica-se que esta é classificada como tipo II, seguindo a abordagem de Brunauer et al. (1938). A forma sigmoidal da classificação do tipo II é característica de isotermas de produtos orgânicos (VEGA et al. 2005). Este tipo de isoterma resulta de adsorventes nos quais há uma extensa variação de tamanhos de poros. Esta variação permite ao adsorvente a capacidade de avançar de forma contínua de uma adsorção monocamada para multicamada, seguida de condensação capilar. Além disso, o aumento da a_w promove um aumento da X_e para cada temperatura, logo, a taxa de desorção é mais alta no início do processo e diminui continuamente à medida que se aproxima da X_e .

Nas Figuras 5 (a-d) são apresentadas as curvas do adimensional de água livre em função do tempo juntamente com os ajustes dos dados aos modelos da Lei de Fick, Page, Henderson e Midilli para as sementes cornichão reumidificadas e secas nas temperaturas de estudo deste trabalho.

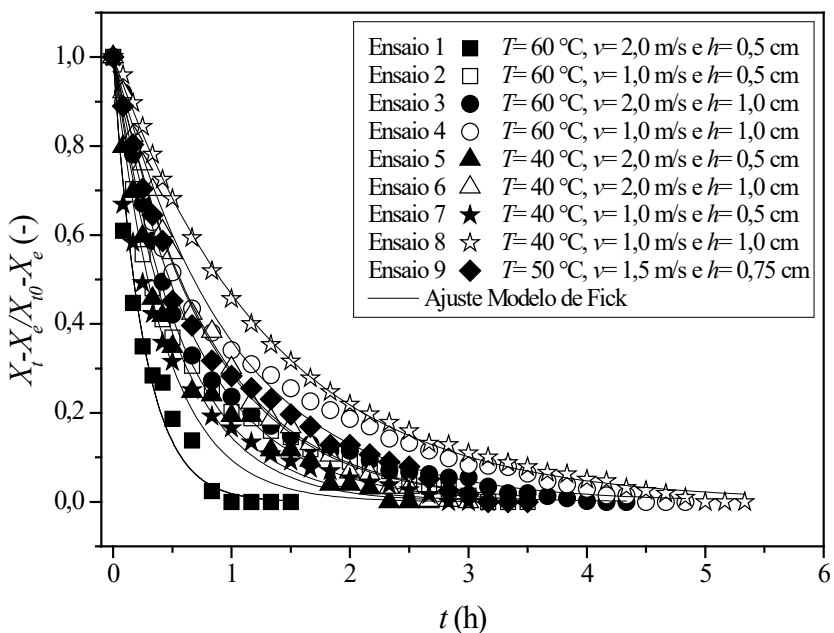


Figura 5 (a): curvas do adimensional de umidade livre em função do tempo, com ajuste ao modelo da Lei de Fick.

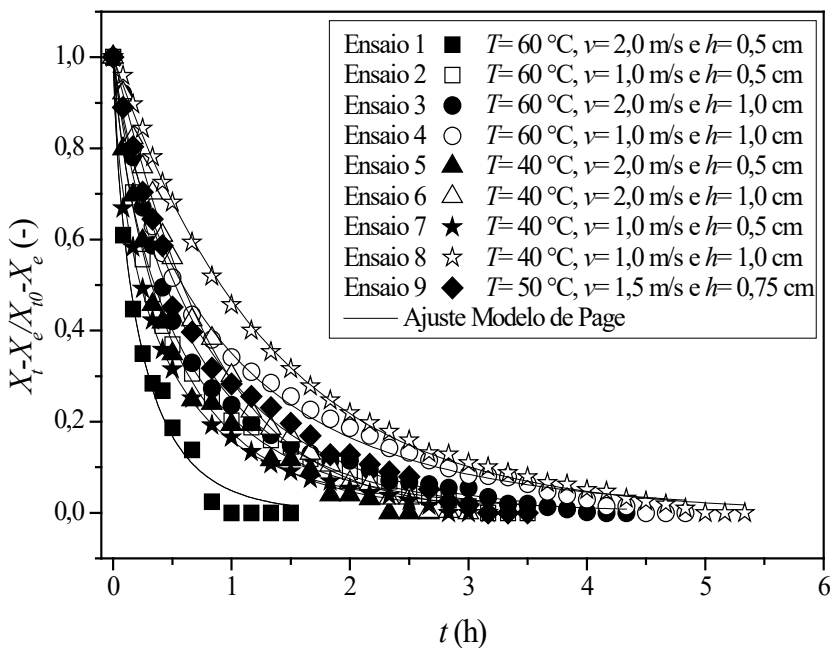


Figura 5 (b): curvas do adimensional de umidade livre em função do tempo, com ajuste ao modelo de Page.

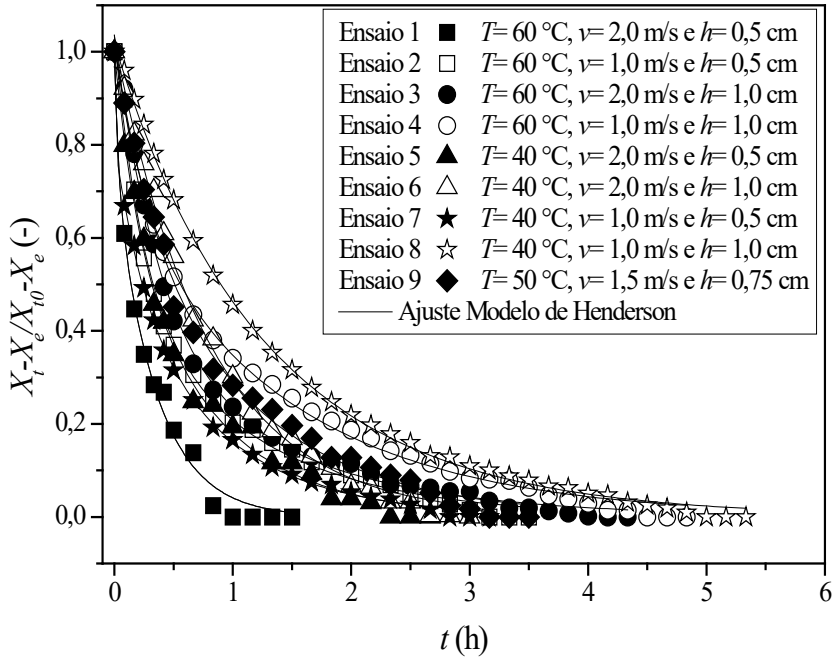


Figura 5 (c): curvas do adimensional de umidade livre em função do tempo, com ajuste ao modelo de Henderson.

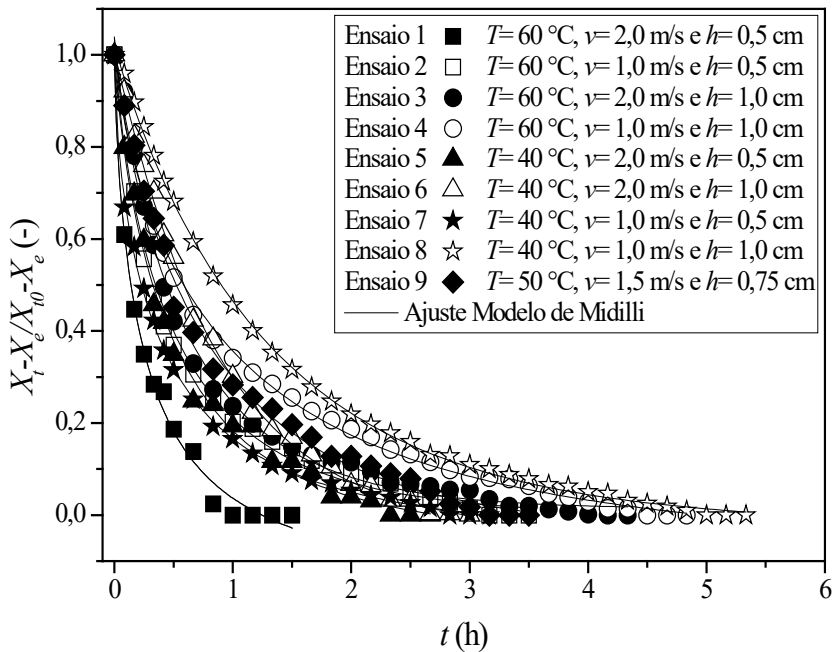


Figura 5 (d): curvas do adimensional de umidade livre em função do tempo, com ajuste ao modelo de Midilli.

Pelas Figuras 5 (a-d) ao analisar a influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem, é observado que o aumento dessas variáveis promoveu uma diminuição do tempo de secagem. Já o aumento da altura da bandeja promoveu um aumento do tempo do processo, resultado condizente com o esperado fisicamente. O aumento da temperatura e da velocidade do ar promove um aumento da força motriz do processo de secagem, facilitando assim a transferência de calor e de massa do sistema. Por outro lado, o aumento da altura de bandeja provoca uma resistência devido o aumento na quantidade de massa, o que dificulta a transferência de calor e de massa do sistema (ALMEIDA et al. 2012).

Sendo a secagem uma operação que envolve a transferência simultânea de calor e de massa, é esperado que modificações na temperatura do ar, na velocidade do ar e altura de bandeja ocasionem mudanças nos valores das parcelas condutiva e convectiva dos balanços dos fenômenos de transferência para o regime não permanente da secagem. Para a parcela condutiva, o aumento no valor da temperatura do ar promove uma diminuição na umidade relativa do ar de secagem. Esse fato ocasiona um aumento na diferença de concentração de umidade existente entre o ar de secagem e o material sólido, aumentando assim a força motriz do processo de transferência de massa e uma diminuição no tempo de secagem. Para a parcela convectiva, as mudanças que ocorrem quando a temperatura e a velocidade do ar são alteradas, podem ser explicados com base na lei de Newton do resfriamento. O aumento na temperatura do ar promove um aumento na diferença de temperatura existente entre o ar de secagem (T_{∞}) e o material sólido, aumentando assim a taxa de transferência de calor por convecção (q''). Já o aumento na velocidade do ar ocasiona uma elevação no valor do coeficiente de transferência de calor por convecção (h), aumentando também a taxa de transferência de calor por convecção. Esse aumento na taxa de transferência de calor por convecção promove um aumento na força motriz do processo e uma diminuição no tempo de secagem. Para a altura da bandeja, o seu aumento provoca uma resistência maior ao processo de secagem, e provoca um aumento no tempo de secagem (FOUST, 2012).

Os parâmetros dos ajustes das curvas Figuras 5 (a-d) e os valores de difusividade efetiva para cada condição de secagem ajustadas pelo modelo da Lei de Fick e pelos modelos semi-empíricos e empíricos de Page, Henderson e Midilli são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: parâmetros de ajuste e difusividades efetiva para cada condição de secagem analisada pelos modelos da Lei de Fick, Page, Henderson e Midilli.

Ajuste do Modelo da Lei de Fick				
Ensaio	k (h ⁻¹)	R^2	P_p (%)	D_{ef} (m ² /h)
(1)	3,994	0,970	9,45	1,012x10 ⁻⁵
(2)	1,757	0,968	9,65	4,452x10 ⁻⁶
(3)	1,458	0,968	7,67	1,477x10 ⁻⁵
(4)	1,018	0,972	9,45	1,031x10 ⁻⁵
(5)	1,931	0,980	9,15	4,893x10 ⁻⁶
(6)	1,222	0,995	0,54	1,238x10 ⁻⁵
(7)	2,361	0,952	7,27	5,983x10 ⁻⁶
(8)	0,762	0,998	3,24	7,724x10 ⁻⁶
(9)	1,245	0,988	8,45	7,100x10 ⁻⁶

Ajuste do Modelo de Page									
Ensaio	k (h ⁻¹)	n	R^2	P_p (%)	D_{ef} (m ² /h)				
(1)	3,023	0,762	0,987	6,16	7,657x10 ⁻⁶				
(2)	1,558	0,770	0,988	1,90	3,947x10 ⁻⁶				
(3)	1,385	0,893	0,992	1,84	3,907x10 ⁻⁶				
(4)	1,049	0,779	0,994	3,35	1,062x10 ⁻⁵				
(5)	1,734	0,817	0,992	3,52	4,394x10 ⁻⁶				
(6)	1,233	1,078	0,998	1,93	1,249x10 ⁻⁵				
(7)	1,844	0,669	0,997	0,88	4,671x10 ⁻⁶				
(8)	0,761	1,001	0,998	3,34	7,718x10 ⁻⁶				
(9)	1,228	0,884	0,993	4,25	7,001x10 ⁻⁶				
Ajuste do Modelo de Henderson									
Ensaio	a	b	c	k (h ⁻¹)	k_o (h ⁻¹)	k_i (h ⁻¹)	R^2	P_p (%)	D_{ef} (m ² /h)
(1)	0,253	0,295	0,450	30,058	2,896	2,897	0,987	4,80	3,027x10 ⁻⁵
(2)	0,246	0,246	0,541	0,899	0,900	4,278	0,993	1,51	5,132x10 ⁻⁶
(3)	0,315	0,315	0,405	2,655	2,656	0,752	0,996	1,59	2,048x10 ⁻⁵
(4)	0,169	0,170	0,676	3,923	3,920	0,684	0,996	2,11	2,880x10 ⁻⁵
(5)	0,181	0,181	0,637	4,977	4,977	1,279	0,991	2,96	9,485x10 ⁻⁶
(6)	0,341	0,341	0,341	1,256	1,256	1,256	0,996	0,88	1,273x10 ⁻⁵
(7)	0,310	0,189	0,499	3,981	5,489	1,168	0,998	5,59	8,983x10 ⁻⁶
(8)	0,473	0,473	0,070	0,738	0,738	1,905	0,998	2,40	5,231x10 ⁻⁶
(9)	0,302	0,292	0,417	0,951	3,233	0,951	0,992	3,43	9,760x10 ⁻⁶
Ajuste do Modelo de Midilli									
Ensaio	a	b	k (h ⁻¹)	n	R^2	P_p (%)	D_{ef} (m ² /h)		
(1)	0,997	-0,042	2,529	0,669	0,991	3,75	6,408x10 ⁻⁶		
(2)	1,035	-0,000	1,590	0,739	0,988	1,56	4,027x10 ⁻⁶		
(3)	1,039	0,002	1,457	0,835	0,992	2,17	1,476x10 ⁻⁵		
(4)	1,027	-0,008	1,034	0,702	0,996	1,36	1,047x10 ⁻⁵		
(5)	1,011	-0,010	1,650	0,766	0,992	2,16	4,180x10 ⁻⁶		
(6)	1,005	-0,009	1,185	1,025	0,998	0,95	1,201x10 ⁻⁵		
(7)	0,997	-0,009	1,738	0,629	0,998	0,63	4,404x10 ⁻⁶		
(8)	1,022	-0,003	0,781	0,943	0,999	3,05	7,920x10 ⁻⁶		
(9)	1,022	-0,008	1,201	0,819	0,993	3,05	6,847x10 ⁻⁶		

A Tabela 4 demonstra que o modelo de Midilli apresentou os melhores ajustes em relação aos demais modelos utilizados. Os valores dos R^2 foram todos acima de 0,99 que segundo Madamba et al. (1996), significa um bom ajuste do modelo para a representação do fenômeno de secagem. Analisando os valores referentes ao P_p , o modelo de Midilli também foi o que apresentou os menores valores se comparado com os demais modelos utilizados, corroborando os resultados verificados por Costa et al. (2012) para o estudo da secagem sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.). Ao analisar os valores da difusividade efetiva em relação à mudança na velocidade do ar de secagem, foi verificado que a modificação no valor de 1,0 m/s para 2,0 m/s provocou um aumento no Def devido ao aumento na força motriz de secagem. Em relação à mudança na altura de bandeja,

foi observado que a modificação no valor de 0,5 cm para 1,0 cm também causou um aumento no *Def* devido ao aumento da altura da bandeja proporcionar uma maior massa de material, fazendo com que haja uma maior quantidade de água livre para o processo evaporativo. Por fim, ao se analisar os valores do *Def* em relação à mudança de temperatura, foi visto que a modificação no valor de 40 °C para 60 °C acarretou também um aumento na difusividade, devido a elevação na temperatura causar um aumento na força motriz de secagem, aumentando assim a transferência de calor e de massa do sistema.

A Tabela 5 apresenta os valores da umidade final em base úmida (U_{BU}) e da germinação (G) das sementes que passaram pelo processo de secagem nas diferentes condições experimentais estudadas neste trabalho.

Tabela 5: germinação das sementes de cornichão com suas respectivas umidades final.

Ensaio	Total de cada caixa gerbox (triplicata)	G (%)*	U_{BU} (%)*
<i>In natura</i>	54, 60, 63	59,0 ± 4,0	9,89 ± 0,01
1	57, 54, 60	57,0 ± 2,0	5,06 ± 0,01
2	55, 52, 58	55,0 ± 2,0	5,68 ± 0,04
3	59, 54, 44	52,3 ± 5,5	7,34 ± 0,15
4	47, 51, 50	49,3 ± 1,5	5,35 ± 0,04
5	52, 57, 51	53,3 ± 2,4	9,04 ± 0,11
6	55, 39, 38	44,0 ± 7,3	8,95 ± 0,12
7	41, 53, 52	48,6 ± 5,1	7,01 ± 1,28
8	65, 54, 58	59,0 ± 4,0	8,44 ± 0,01
9	47, 43, 51	47,4 ± 3,1	6,79 ± 0,07

*Valor médio ± desvio padrão (Triplicata).

Pela Tabela 5 observa-se que o aumento da temperatura de 40 °C (ensaios 5, 6, 7 e 8) para 60 °C (ensaios 1, 2, 3 e 4) causou uma diminuição no valor da umidade final em base úmida das sementes de cornichão. Em relação à germinação, é observado que os valores encontrados estão na ordem de 44 a 59 % para as amostras secas artificialmente. Dentre as secagens, a amostra que obteve o maior valor médio de germinação, com valor de 59 %, foi a realizada no ensaio 8, sendo esse valor próximo ao obtido pelas sementes fornecidas pela Embrapa Pecuária Sul.

CONCLUSÃO

Na caracterização física das sementes foi obtido um valor do diâmetro de *Sauter* de 1,37 mm, uma massa específica real de 1363,66 kg/m³, uma massa específica *bulk* de 858,28 kg/m³, uma porosidade de 0,37, uma esfericidade de 0,98, um ângulo de repouso de 25,34 °, uma umidade em base úmida de 10,00 % e germinação de 59,00 %.

O processo de reumidificação demonstrou que as sementes de Cornichão estudadas mantiveram sua qualidade fisiológica, obtendo um bom índice de germinação. Dentre todos os ensaios de secagem realizados, o maior valor de germinação, com valor de 59,00 %, foi a realizada na condição de T de 40 °C, v de 1,0 m/s e h de 1,0 cm.

Os valores para as germinações obtidas estão muito próximo aos das sementes fornecidas pela Embrapa Pecuária Sul-Bagé/RS, indicando que a secagem artificial não modificou a qualidade fisiológica das sementes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela ajuda financeira, Embrapa Pecuária Sul pela concessão da matéria-prima e apoio didático e a Universidade Federal do Pampa pelo espaço físico cedido.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, H. V.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Isotermas de adsorção de umidade da pitanga em pó. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Vol. 7, p. 11-20, 2007.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC. **Official methods of analysis**. Washington, D.C., 1997. 2 vol.

ALMEIDA, A. R. F. de.; FRANCO, D. S. P.; MARTINS, J. M.; RODRIGUES, L. M. Análise do Processo de Secagem de Sementes de Mamão Utilizado como Biomassa Adsorvente no Tratamento de Efluentes. **Revista de Ciências Exatas**, RJ, EDUR, Vol. 27/31, n. 2, p. 44-59, 2012.

ARNOSTI JR., S. **Desenvolvimento de um Secador Transportador do Tipo Esteira com Escoamentos Cruzados e Caracterização de Sementes de Gramíneas**. 1997. 232p. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Química Universidade, Federal de São Carlos.

BRASIL, M. A. R. A. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília: SNDA/DNDV/CLAV, 1992. 365p.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layer. **Journal of American Chemistry Society**, Vol. 60, p. 309-312, 1938.

CREMASCO, M.A. **Operações unitárias em sistemas particulados**. São Paulo: Editora Blucher, 2012.

COSTA, C. M. L.; SOUZA, C. A. G.; VALENTE, M. C. C. Cinética de secagem em leito fluidizado de sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.). **Revista de Ciências Exatas**, RJ, EDUR, Vol. 27/31, n. 2, p. 110-120, 2012.

CURTIS, K.; MCKERSIE, B. O. Growth potential of the axis as a determinant of seeding vigor in birdsfoot trefoil. **Crop Science**, Vol. 24, p. 47-50, 1984.

DÍAZ, P.; MONZA, J.; MÁRQUEZ, A. Drought and saline stress in *Lotus japonicus*. In: MÁRQUEZ, A. (Ed.). **Lotus japonicus Handbook**. Oxford: Springer, 2005.

FERRARI F., E. **Métodos e temperaturas de secagem sobre a qualidade físico-química e microbiológica de grãos de milho no armazenamento**. 2011. 50p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HAGHI, A. K.; AMANIFARD, N. Analysis of heat and mass transfer during microwave drying of food products. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, Vol. 25, p. 491-501, 2008.

HAMM, J. B. S. **Análise da Secagem de Azevém (*Lolium multiflorum*) em Leito Fixo com Escoamento de Ar Paralelo**. 2013. 37p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Pampa.

KANNAN, AKEL FERREIRA. **Análise da secagem de Cornichão (*Lotus corniculatus* L.) em Leito Fixo com Escoamento de ar Paralelo**. 2014. 1-3p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Pampa.

MACEDO, G. A. R.; MARQUES NETO, J. E.; BATISTA, J. S. Secagem à sombra e ao sol de sementes de gramíneas forrageiras. **Revista Brasileira de Sementes**, Vol. 9, p. 29-37, 1987.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, Vol. 29, p. 75-97, 1996.

MOTA, F. S.; BERNY, Z. B.; MOTA, J. F. A. S. Índice climático de crescimento de pastagens naturais no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Vol. 16, p. 453-472, 1981.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, Vol. 66, p. 513-518, 2005.

OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Revista Engenharia Agrícola**, Vol. 26, p. 181-189, 2006.

SAMAPUNDO, S.; DEVLIEGHIERE, F.; MEULENAER, B.; ATUKWASE, A.; LAMBONI, Y.; DEBEVERE, J. M. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. **Journal of Food Engineering**, Vol. 79, p. 168, 2007.

VÁSQUEZ, C.; DIAZ-CALDERON, P.; ENRIONE, J.; MATIACEVICH, S. State diagram, sorption isotherm and color of blueberries as a function of water content. **Journal of Food Engineering**, Vol. 52, p. 8-15, 2013.

VEGA, A.; ANDRES, A.; FITO, P. Modelado de la cinética de secado del pimiento Rojo (*Capsicum annuum* L.). **Información tecnológica**, Vol. 16, p. 3-11, 2005