

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA GOIANO – CÂMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA

HIGROSCOPICIDADE, CINÉTICA DE SECAGEM E
QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE SORGO
SACARINO

Autor: Renan Ullmann
Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Resende

RIO VERDE - GO
Fevereiro – 2014

HIGROSCOPICIDADE, CINÉTICA DE SECAGEM E QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE SORGO SACARINO

Autor: Renan Ullmann
Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Resende
Coorientadoras: Prof.^a Dr.^a Juliana de Fátima Sales
Prof.^a Dr.^a Juliana Rodrigues Donadon

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde – (Área de Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado).

RIO VERDE - GO
Fevereiro - 2014

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)
Elaborada por Izaura Ferreira Neta CRB1-2771**

U37h Ullmann, Renan

Higroscopicidade, cinética de secagem e qualidade fisiológica de sementes de sorgo sacarino / Renan Ullmann. - 2014.

81f. : il., figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Resende. Co-orientadoras: Prof^ª. Dr^ª. Juliana de Fátima Sales e Prof^ª. Dr^ª. Juliana Rodrigues Donadon.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, 2014.

Biografia.

Inclui índice de tabelas e figuras.

1. Higroscopicidade. 2. Sorgo Sacarino. 3Pós-colheita. I. Título. II. Autor. III. Orientador. IV. Co-orientadoras.

CDU: 631.85+633.17

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CÂMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AGRÁRIAS-AGRONOMIA**

**HIGROSCOPICIDADE, CINÉTICA DE SECAGEM E
QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE SORGO
SACARINO**

Autor: Renan Ullmann
Orientador: Dr. Osvaldo Resende

TITULAÇÃO: Mestre em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de
Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em 24 de fevereiro de 2014.

Prof. Dr. Fernando Mendes Botelho
Avaliador externo
UFMT/MT

Prof. Dr. Alberto Leão de Lemos Barroso
Avaliador interno
UniRV/Rio Verde

Prof. Dr. Osvaldo Resende
Presidente da banca
IF Goiano/RV

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS, que esteve sempre presente em todos os momentos da minha vida, dando-me entendimento e clareza, proporcionando discernimento necessário para que esse sonho se tornasse possível.

Aos meus pais Luiz e Ivanete, pela união, humildade, simplicidade e apoio, sempre presentes na minha vida. E, por toda minha família, que sempre esteve presente nos momentos em que precisei. Sou e serei eternamente grato, pois sei que não mediram esforços para minha formação.

A minha irmã Larissa, pelo carinho, amor, companheirismo e pela amizade ao longo da minha vida.

Um agradecimento especial a Géssica, companheira irrestrita, pelo amor, apoio, carinho, confiança, companheirismo, afeto, compreensão e cumplicidade.

Ao professor Osvaldo Resende, pela orientação responsável e competente, pelo incentivo, dedicação, confiança, pela amizade e por contribuir de forma expressiva em minha formação profissional e pessoal.

A professora Juliana de Fátima Sales, a qual sempre esteve presente durante minha caminhada, incentivando sempre a continuar os estudos e a pesquisa.

A toda equipe do Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais: Douglas, Rafael, Kelly, Thais, Kaique, Denner, Lílian e a professora Juliana Donadon, pela

contribuição direta ou indireta na realização deste trabalho e pela amizade ao longo do tempo em que convivemos juntos.

Ao Laboratório de Sementes pela contribuição na realização deste trabalho, fornecendo infraestrutura necessária para o desenvolvimento da pesquisa e em especial as colegas: Lílian Abadia e Glicélia.

As colegas de mestrado Adrieli e Jaqueline, pela amizade e companheirismo durante a caminhada no programa de pós-graduação.

A colega de Iniciação Científica Gabriely, pela sua amizade, compreensão e ajuda na realização das análises.

Ao Daniel por contribuir diretamente no desenvolvimento da pesquisa e também aos amigos Wellington, Lucas e Évio, pela ajuda e pelo auxílio na condução do trabalho.

Um agradecimento especial ao meu amigo Tarcísio, pela sua amizade, esforço e dedicação, e por estar sempre presente ao longo desses anos de caminhada.

Aos meus amigos da República Taperão e demais agregados, pelo companheirismo, pela amizade, pela confiança, pelo apoio e por todos os momentos bons vividos ao longo dessa caminhada durante a construção desse ideal.

A todos meus amigos e professores pela sua confiança, apoio, conselhos e acima de tudo a amizade incondicional durante o decorrer dos anos.

À banca de avaliação da defesa de Dissertação: Prof. Dr. Osvaldo Resende (Orientador), Dr. Fernando Mendes Botelho e Dr. Alberto Leão de Lemos Barroso.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde e ao programa de pós-graduação em Ciências Agrárias - Agronomia, pela oportunidade de concretização deste ideal.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

BIOGRAFIA DO AUTOR

RENAN ULLMANN, filho de Luiz Carlos Ullmann e Ivanete Bonini Ullmann, nasceu em Rio Verde, estado de Goiás em 09 de julho de 1989.

Em agosto de 2007, iniciou no curso de Agronomia no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde, graduando-se em 2011.

Em março de 2012, iniciou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Ciências Agrárias do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	xiv
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUÇÃO GERAL	1
1. Sorgo Sacarino.....	1
2. Higroscopicidade	2
3. Secagem.....	5
4. Modelagem Matemática.....	6
5. Qualidade das Sementes.....	8
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	10
OBJETIVO GERAL.....	17
Capítulo 1. Higroscopicidade das sementes de sorgo sacarino.....	18
Resumo.....	18
Abstract.....	18
Introdução.....	19
Material e métodos.....	20
Resultados e discussão.....	23
Conclusões.....	29
Agradecimentos.....	29
Referências Bibliográficas.....	29

Capítulo 2. Cinética de secagem do sorgo sacarino.....	33
Resumo.....	33
Abstract.....	33
Introdução.....	34
Material e métodos.....	35
Resultados e discussão.....	39
Conclusões.....	45
Agradecimentos.....	45
Referências Bibliográficas.....	45
Capítulo 3. Qualidade fisiológica das sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem em diferentes condições de ar.....	49
Resumo.....	49
Abstract.....	50
Introdução.....	51
Material e métodos.....	52
Resultados e discussão.....	54
Conclusões.....	60
Agradecimentos.....	60
Referências Bibliográficas.....	60
CONCLUSÃO GERAL.....	62

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Capítulo I. Higroscopicidade das sementes de sorgo sacarino.....	18
Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a higroscopicidade de produtos vegetais.....	21
Tabela 2. Parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico para as sementes de sorgo sacarino, com seus respectivos erros médios estimado (SE) e relativo (P), teste de qui-quadrado (χ^2) e coeficientes de determinação (R ²)	23
Tabela 3. Atividades de água (decimal) para as sementes de sorgo sacarino estimadas pelo modelo de Chung-pfost em função da temperatura e do teor de água de equilíbrio.....	26
Capítulo II. Cinética de secagem das sementes de sorgo sacarino.....	33
Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno da secagem de produtos agrícolas	36

Tabela 2. Erros médio estimado (SE), relativo (P) e coeficientes de determinação (R^2) para os onze modelos analisados, durante a secagem do sorgo sacarino nas diversas condições de temperatura de ar ($^{\circ}\text{C}$)	40
Tabela 3. Coeficientes do modelo de Midilli ajustados para a secagem das sementes de sorgo sacarino em diferentes condições de secagem, com os respectivos valores médios.....	42
Tabela 4. Coeficiente de difusão efetivo obtido para a secagem das sementes de sorgo sacarino nas temperaturas de 40, 55, 70, 85 e 100 $^{\circ}\text{C}$	43
Capítulo III. Qualidade fisiológica das sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem em diferentes condições de ar.....	49
Tabela 1. Resumo da análise de variância para a condutividade elétrica (CE), germinação (GE), IVG, primeira contagem da germinação (PCG), emergência (EM), IVE e da primeira contagem da emergência (PCE) após a secagem do sorgo sacarino em diferentes condições de ar.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Capítulo I. Higroscopicidade das sementes de sorgo sacarino.....	18
Figura 1. Valores experimentais da atividade de água e isothermas de dessorção estimadas pelo modelo de Chung-pfost para as sementes de sorgo sacarino em diferentes condições de temperatura e atividades de água.....	25
Figura 2. Curvas do logaritmo neperiano da atividade de água (decimal), para o teor de água de equilíbrio (% b.s.), em função de valores de $1/T$ (K^{-1}) para as sementes de sorgo sacarino.....	27
Figura 3. Valores experimentais e estimados do calor isostérico integral de dessorção (Q_{st}) das sementes de sorgo sacarino em função do teor de água de equilíbrio.....	28
Capítulo II. Cinética de secagem das sementes de sorgo sacarino.....	33
Figura 1. Curvas de secagem para as sementes de sorgo sacarino nas temperaturas de 40; 55; 70; 85 e 100 °C.....	39
Figura 2. Valores do teor de água experimentais e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem das sementes de sorgo sacarino nas diversas condições de temperatura.....	42
Figura 3. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem, obtido durante a secagem das sementes de sorgo sacarino.....	44

Capítulo III. Qualidade fisiológica das sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem em diferentes condições de ar.....	49
Figura 1. Condutividade elétrica (CE) da solução dos exudados das sementes de sorgo sacarino após a secagem nas temperaturas (T) de 40, 55, 70, 85 e 100 °C..	55
Figura 2. Porcentagem de germinação (GE), e primeira contagem da germinação (PCG) das sementes de sorgo sacarino após a secagem nas temperaturas (T) de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.....	56
Figura 3. Porcentagem de emergência (EM), e primeira contagem da emergência (PCE) das sementes de sorgo sacarino após a secagem nas temperaturas (T) de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.....	57
Figura 4. Índice de velocidade de germinação (IVG) das sementes de sorgo sacarino após a secagem nas temperaturas (T) de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.....	58
Figura 5. Índice de velocidade de emergência (IVE) das sementes de sorgo sacarino após a secagem nas temperaturas (T) de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

a_w	Atividade de água	% b.s.
a, b, c, n	Coefficientes de modelos	
b.s.	Base seca	
b.u.	Base úmida	
D	Coefficiente de difusão líquida	$m^2.s^{-1}$
D_o	Fator pré-exponencial	
D	Dia	
E_a	Energia de ativação	$kJ.mol^{-1}$
GLR	Graus de liberdade do modelo	
IVG	Índice de velocidade de germinação	
k, k_1 , k_0	Constantes de secagem	h^{-1}
K	Kelvin	$^{\circ}C + 273,15$
L	Calor latente de vaporização da água livre	$kJ.kg^{-1}$
M_a	Massa de água	kg
M_e	Massa depois da embebição	kg
M_s	Massa seca	kg
N	Número de observações experimentais	
N	Número	
P	Erro médio relativo	%
Q_e	Calor isostérico integral de sorção	$kJ.kg^{-1}$
R	Raio equivalente	m
R	Constante universal dos gases	$8,134 (kJ.kmol^{-1}.K^{-1})$
R^2	Coefficiente de determinação	%

RX	Razão de teor de água, adimensional	
SE	Erro médio estimado	
T	Temperatura	°C
T _a	Temperatura absoluta	K
T	Tempo	h
V _g	Volume do grão	m ³
Y	Valor de RU	
\hat{Y}	Valor de RX estimado pelo modelo	
X [*]	Teor de água do produto	b.s.
Δh_{st}	Calor isostérico líquido de sorção	kJ.kg ⁻¹
Λ	Raízes da equação de Bessel de ordem zero	
%	Percentual	
°C	Graus Celsius	
π	Pi	3,1416

RESUMO

ULLMANN, Renan, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano-Câmpus Rio Verde, Fevereiro de 2014. **Estudo da higroscopicidade e da secagem das sementes de sorgo sacarino.** Orientador: Dr. Osvaldo Resende. Coorientadoras: Dr.^a Juliana de Fátima Sales e Dr.^a Juliana Rodrigues Donadon.

O Sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é nativo da África e algumas variedades atuais são originárias do continente africano, é um cereal que se assemelha à cana-de-açúcar, por armazenar em seus colmos relevantes quantidades de açúcar e fornecer bagaço, mais difere por ser cultivado por sementes e apresentar período de maturação menor. A atual demanda pela diversificação de matérias-primas para a produção de bioenergia faz com que o cultivo de sorgo sacarino tenha grande importância, por ser uma alternativa para a geração de biomassa para a produção de etanol. Dessa maneira, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar a higroscopicidade e o processo de secagem das sementes de sorgo sacarino para diferentes condições de ar, bem como avaliar a qualidade das sementes após a secagem, em virtude da carência de estudos relacionados a essa cultura, fornecendo subsídios teóricos e práticos importantes no manejo pós-colheita. Para o estudo da higroscopicidade, foram determinadas as isotermas de dessorção das sementes de sorgo sacarino, usando diversas condições de temperatura e atividades de água, sendo selecionado o modelo matemático que melhor representou o fenômeno e obtido o calor isostérico de dessorção em função do teor de água de equilíbrio do produto. Ao processo de secagem das sementes de sorgo sacarino, foram ajustados diversos modelos matemáticos, para a predição do fenômeno e também foi determinado o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação do processo. Após a secagem, foi realizada a análise da qualidade fisiológica das sementes, por meio

das análises de teor de água, condutividade elétrica, porcentagem de germinação, primeira contagem da germinação, índice de velocidade de germinação (IVG), porcentagem de emergência, primeira contagem da emergência e índice de velocidade de emergência (IVE). O modelo de Chung-pfost é o que melhor representa a higroscopicidade das sementes de sorgo sacarino. O calor isostérico integral de dessecção aumenta com a redução do teor de água, sendo que os valores, para as sementes de sorgo sacarino na faixa de teor de água de 7,9 a 28,0 (% b.s.), variam de 3.136,54 a 2.493,33 kJ.kg⁻¹. Os onze modelos analisados representam adequadamente as curvas de secagem das sementes de sorgo sacarino, sendo o modelo de Midilli que melhor descreve o fenômeno. O coeficiente de difusão efetivo aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem, no qual se verificou que a energia de ativação foi de 11,67 kJ.mol⁻¹. A qualidade fisiológica das sementes de sorgo sacarino é afetada pela temperatura do ar de secagem, e as temperaturas mais elevadas promovem maiores danos às sementes, podendo ser realizada a secagem até a temperatura do ar de 55 °C.

PALAVRAS-CHAVES: equilíbrio higroscópico, modelagem matemática, pós-colheita.

ABSTRACT

ULLMANN, Renan, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano-Câmpus Rio Verde, February of 2014. **Study of the hygroscopic and drying of sweet sorghumseeds.** Adviser: Ph.D. Osvaldo Resende. Co-adviser: Ph.D.. Juliana de Fátima Sales and Ph. D. Juliana Rodrigues Donadon.

The sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] is native from Africa and some current varieties are indigenous to the African continent. It is a cereal that resembles the cane sugar by storing in their stalks large amounts of sugar and provide bagasse, but differs by being cultivated by seed and has shorter period of maturation. The current demand for diversification of raw materials, for the production of bioenergy makes that the cultivation of sweet sorghum has great importance because, it is an alternative for the generation of biomass for ethanol production. Thus, the present work was to study the hygroscopicity and the process of drying of sweet sorghum seeds for different air conditions and to assess the seeds quality after drying due the lack of studies related to that culture, providing important theoretical and practical support in post-harvest management. To study the hygroscopicity, was determined the sorption isotherms of sweet sorghum seeds using various conditions of temperature and water activity. The mathematical model that best represented the phenomenon and obtained the isosteric heat of desorption was selected considering the equilibrium content of the product water. To the drying process of sweet sorghum seeds, several mathematical models were adjusted for the prediction of the phenomenon and was also determined the effective diffusion coefficient and the activation energy of the process. After drying, the analysis of seed quality through analyzes of moisture content, electrical conductivity, germination, first count of germination, germination speed index (GSI), percentage of

emergence, first count of the emergence and emergence rate index (EVI) were taken. The Chung-Pfost model is the one that best represents the hygroscopicity of sorghum seeds. The full isosteric heat of sorption increases with decreasing moisture content, and the values for the sorghum seed content in the range of 7.9 to 28.0 (b.s %) water, range from 3136.54 to 2493.33 kJ.kg⁻¹. Among the eleven models analyzed, Midilli was the one that best fit to describe the drying curves of sweet sorghum seeds. The effective diffusion coefficient increased with increasing temperature of the drying air, which revealed that the activation energy was 11.67 kJ.mol⁻¹. The seed quality of sweet sorghum is affected by the temperature of the drying air, and that higher temperatures promote greater damage to the seed:however drying can be performed until the air temperature of 55 °C.

KEY WORDS: hygroscopic equilibrium, modelling mathematic, postharvest.

INTRODUÇÃO GERAL

1. Sorgo Sacarino

O Sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é originário da África, assim como algumas variedades atuais (Fornasieri Filho & Fornasieri, 2009). Por sua versatilidade e facilidade de produção, é utilizado como base alimentar de milhões de pessoas, principalmente na África e na Ásia, chegando a suprir cerca de 70% da ingestão calórica diária, exercendo grande papel na segurança alimentar da população desses países (Dicko et al., 2006; Taylor et al., 2006).

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2014), a área cultivada com sorgo estimada para a safra 2013/14 é de 803,6 mil hectares, com concentração na região Centro-Oeste, cerca de 482,0 mil hectares, onde se localiza aproximadamente 60% da área nacional semeada com sorgo.

A produção nacional de sorgo esperada para esta safra deve alcançar 2,298 milhões de toneladas, quantidade 9,8 % inferior ao colhido na safra anterior. A produtividade média da produção nacional de sorgo prevista para esta safra deve ser de 2.860 kg.ha⁻¹, sendo a maior média entre os estados produtores a da região Centro-Oeste, com 3.143 kg.ha⁻¹ (Conab, 2014).

O estado de Goiás está entre os três estados com maior representação na produção total do sorgo, com 977,8 mil toneladas estimadas (+ 8,6 % em relação à safra anterior) em uma área de 291,8 mil hectares. Na segunda posição, Minas Gerais, com área estimada em 160,3 mil hectares e produção de 470,6 mil toneladas, e Mato Grosso, com produção de 445,0 mil toneladas em uma área de 163,2 mil hectares (Conab, 2014).

No Brasil, a cultura compreende uma alternativa de plantio para diversas regiões. No nordeste do Brasil, por exemplo, o uso do sorgo na alimentação humana tem grandes

potencialidades e pode contribuir consideravelmente para a economia, gerando renda a população (Souza et al., 2009).

A pressão pelo uso de fontes de energia alternativa aos combustíveis fósseis tem sido observada nas últimas décadas, sendo que a região dos Cerrados brasileiro vêm sendo considerada a nova fronteira para produção agroenergética do Brasil (Severiano et al., 2009; Rathmann et al., 2010), sendo assim, a perspectiva de sustentabilidade passa obrigatoriamente pela diversificação de matérias-primas, dentre as disponíveis para produção de energia, um destaque especial vem sendo dado ao sorgo tipo sacarino.

Em virtude da elevada demanda atual por etanol, o cultivo de sorgo sacarino surge como importante alternativa para a geração de biomassa e produção de etanol (Han et al., 2012; Ratnavathi et al., 2011; Zhao et al., 2009; Zegada-Lizarazu & Monti, 2012), principalmente na entressafra da cana-de-açúcar.

O sorgo sacarino se assemelha à cana-de-açúcar no armazenamento de açúcares nos colmos, os quais possibilitam a produção de etanol, e no fornecimento de quantidade de bagaço suficiente para geração de vapor na operação industrial (Teixeira et al., 1997; Almodares & Hadi, 2009).

Entretanto o sorgo sacarino difere de maneira acentuada da cana-de-açúcar por apresentar cultivo a partir de sementes e o seu ciclo vegetativo e estágio de maturação ser menor, variando de 120 a 130 dias (Fontes, 2011).

Além de atuar como cultura complementar à cana-de-açúcar, o sorgo sacarino se destaca por apresentar maior tolerância ao alumínio tóxico no solo, ao *déficit* hídrico e à salinidade, possibilitando seu cultivo em áreas consideradas marginais à agricultura (Amaducci et al., 2004; Prasad et al., 2007; Vasilakoglou et al., 2011).

Dessa maneira, o sorgo sacarino apresenta como uma interessante opção para compor a matriz energética nacional, em complemento a cana-de-açúcar, possibilitando a expansão das áreas passíveis de utilização para produção de bioenergia e aumentando a eficiência da produção de etanol.

2. Higroscopicidade

Os produtos vegetais são materiais higroscópicos, ou seja, possuem a propriedade de realizar trocas de água sob a forma de vapor, com o ambiente que os envolve. Nesse processo, as trocas podem proceder por meio do ganho ou da perda de água, fenômenos conhecidos, respectivamente, por adsorção e dessorção, de acordo com as características higroscópicas recíprocas do produto e do ar (Brooker et al., 1992).

A disponibilidade de água em materiais biológicos, tais como grãos e frutos, é melhor indicada pela atividade de água (a_w) ou pelo teor de água de equilíbrio com a temperatura e umidade relativa do ar ambiente. A atividade de água e a umidade relativa, quando atingido o equilíbrio dinâmico, são numericamente iguais (Hall, 1980 e Brooker et al., 1992).

O teor de água livre é expresso pela atividade de água (a_w) que é dada pela relação entre a pressão de vapor de água em equilíbrio sobre o produto, e a pressão de vapor de água pura, na mesma temperatura (Mohsenin, 1986).

O conceito de atividade de água indica a intensidade das forças que unem a água com outros componentes não aquosos e, conseqüentemente, a água disponível para o crescimento de microrganismos podendo ocorrer diferentes reações químicas e bioquímicas (Ordoñez, 2005).

Cada microrganismo possui um limite mínimo de atividade de água para realizar as atividades metabólicas, sendo em torno de 0,7 para fungos, 0,8 para leveduras e 0,9 para bactérias (Oliveira et al., 2005).

Todos os produtos vegetais têm a capacidade de ceder ou absorver água do ambiente, convergindo, para uma relação de equilíbrio entre o seu teor de água e as condições do ar ambiente. O teor de água de equilíbrio é alcançado quando a pressão parcial de vapor de água no produtor se iguala ao ar que o envolve (Resende et al., 2006).

Além disso, a cultivar, o grau de maturidade e as condições físicas e sanitárias, bem como a maneira pela qual o equilíbrio foi obtido (adsorção ou dessorção), também são determinantes para o estabelecimento do teor de água de equilíbrio de produtos higroscópicos (Chen, 2000; Fan et al., 2000).

Atualmente, na literatura, existem mais de 200 equações propostas para representar o equilíbrio higroscópico dos produtos agrícolas. Estes modelos diferem na sua base teórica ou empírica e na quantidade de parâmetros envolvidos (Mulet et al., 2002).

Para Hall (1980), as curvas de equilíbrio higroscópico são importantes para definir limites de desidratação do produto, estimar as mudanças do teor de água sob determinada condição de temperatura e umidade relativa do ambiente e para definir os teores de água adequados ao início de atividade de microrganismos que podem provocar a deterioração do produto.

Segundo Corrêa et al., (2005), as curvas de teor de água de equilíbrio podem ser obtidas experimentalmente por meio dos métodos dinâmico e estático, no método dinâmico o grão é submetido a fluxos de ar sob condições controladas de temperatura e

umidade relativa até que seja atingido o equilíbrio. No método estático o equilíbrio higroscópico entre o produto e o ambiente sob condições controladas é atingido sem movimentação do ar (Chen, 2000; Côrrea et al., 2005).

O método estático possui as vantagens de se obter condições termodinâmicas constantes com maior facilidade e permitir o uso de soluções ácidas ou soluções salinas saturadas (Mortola et al., 2003), podendo também ser indireto, sendo a atividade de água determinada por meio de equipamentos e as condições termodinâmicas são constantes e pré-programadas.

As isotermas podem ser definidas como curvas que descrevem a relação de equilíbrio da quantidade de água sorvida por componentes constituintes da semente e a umidade de equilíbrio, a uma temperatura específica (Brooker et al., 1992).

As isotermas de sorção são importantes para definir limites de desidratação do produto, bem como estimar as mudanças de teor de água sob determinada condição de temperatura e umidade relativa do ambiente (Ayranci & Duman, 2005).

A determinação das isotermas de sorção de água constitui fator essencial nos projetos e estudos de sistemas de secagem, manuseio, processamento, armazenagem, embalagem e predição da vida-de-prateleira de produtos alimentícios (Lima et al., 2008)

Para o estabelecimento de isotermas que representam essa relação de equilíbrio são utilizados modelos matemáticos empíricos, uma vez que nenhum modelo teórico desenvolvido tem sido capaz de prever com precisão o teor de água de equilíbrio para uma ampla faixa de temperatura e atividade de água (Farahnaky et al., 2009; Henao et al., 2009; Chen & Weng, 2010).

De acordo com Aviara & Ajibola (2002) o calor isostérico é uma propriedade termodinâmica de sorção de água crucial na análise do fenômeno de transferência de calor e de massa. Constituindo dessa forma, um bom parâmetro para estimar as necessidades energéticas no processo de secagem, além de fornecer dados sobre o estado da água no produto (Wang & Brennan, 1991).

Segundo Lima et al. (2008) o calor isostérico é essencial nos estudos de secagem e armazenamento de produtos agrícolas servindo de bom parâmetro para se estimar a quantidade mínima de calor requerida para remover uma quantidade de água.

A quantidade de energia necessária para remoção de água também é dependente da composição química, física, sanitária e o teor de água dos produtos vegetais. Para Brooker et al. (1992), seria necessária uma quantidade de energia superior, para a

remoção de água em produtos com baixo teor de água, quando comparados a produtos úmidos.

3. Secagem

Baudet et al. (1999), sugerem a secagem como um processo fundamental da tecnologia de pós-colheita para a produção de sementes de alta qualidade, por permitir a redução do teor de água em níveis adequados para o armazenamento.

O processo de secagem visa diminuir o teor de água das sementes, reduzindo a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento a valores considerados adequados para a armazenagem segura e de qualidade, por longos períodos de tempo (Afonso Júnior & Corrêa, 1999).

Na secagem, o ar é usado para transportar a água para fora do sistema, utilizando o ar quente para aquecer as sementes, fazendo com que a água interna do produto migre para a superfície externa e seja evaporada (Peske & Villela, 2003).

O processo de secagem de produtos agrícolas, em camada delgada, tem por finalidade a determinação das taxas de secagem do produto utilizando para a coleta de dados o registro das perdas de massa ocorridas em uma amostra durante a remoção de água (Monte et al., 2008).

O fenômeno de redução do teor de água de grãos e sementes envolve simultaneamente a transferência de calor e massa, que podem alterar de forma substancial a qualidade, dependendo do método e das condições de secagem (Hall, 1980).

Assim, para que este processo seja realizado de forma rápida, segura e econômica é fundamental conhecer e monitorar os fenômenos físicos que ocorrem durante a secagem, sendo este, um processo dinâmico, em função da umidade relativa do ar (Villela & Peres, 2004).

Tendo em vista que a secagem prolonga o período germinativo das sementes, é de fundamental importância o conhecimento das variáveis deste processo essencialmente a temperatura e a umidade relativa do ar, pois esses dois fatores regulam a velocidade de saída de água do interior dos grãos.

A difusão de água em produtos agrícolas durante a secagem é um processo complexo que pode envolver diferentes mecanismos, como a difusão molecular, difusão capilar, difusão de superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica (Brooker et al., 1992).

Existem várias teorias para descrever o processo de remoção de água dos produtos agrícolas, dentre elas, a teoria da difusão líquida, descrita pela segunda lei de Fick, em que a água se movimenta em função do gradiente de concentração efetivo de teor de água (Campos et al., 2009; Goneli et al., 2009).

A difusão ocorre nos sólidos de estrutura fina, nos capilares, e nos poros. Contudo, a teoria de difusão não considera o encolhimento, e o endurecimento da casca (Barbosa-Cánovas & Veja-Mercado, 2000).

A teoria da difusão líquida (modelo teórico) assume que não há influência da capilaridade, despreza os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro, e também considera que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar, instantaneamente (Goneli et al., 2007).

As curvas de secagem obtidas experimentalmente, sob condições controladas, fornecem informações do mecanismo de transporte de água e são utilizadas para determinação do coeficiente de difusão (Gely & Santalla, 2007; Gely & Giner, 2007).

A difusividade é uma característica física associada à facilidade com que a água é removida do material, e pode variar conforme mudanças nas condições de secagem (temperatura, umidade relativa e velocidade do ar) e do próprio produto, e por isto não é intrínseca ao material, dessa maneira se convencionou a chamá-la de difusividade efetiva (Oliveira et al., 2006).

Pode-se dizer que o coeficiente de difusão descreve a velocidade de saída de água do produto, podendo ser usado quando os grãos são considerados como materiais homogêneos (Iguaz et al., 2003).

Para que o processo de difusão ocorra, é necessária a energia mínima para que se inicie a migração de água do interior para a periferia do produto, sendo essa energia denominada de energia de ativação.

Segundo Kayacier e Singh (2004), a energia de ativação diminui com a elevação do teor de água do produto, sendo que nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto (Corrêa et al., 2007).

4. Modelagem Matemática

A representação matemática do processo de secagem de diversos produtos vegetais vem, há algum tempo, sendo estudados e utilizados na tentativa de prever os fenômenos que acontecem durante este processo, nesse sentido, diversos modelos

matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas (Resende et al., 2008).

Segundo Erenturk et al. (2004), a utilização de modelos matemáticos que possam descrever a taxa de transferência de massa que ocorre entre o ar de secagem e o produto e o desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos de pós-colheita, principalmente aqueles utilizados para a secagem de sementes, é de fundamental importância para a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante esse processo.

A modelagem matemática é essencial para simular o comportamento dos materiais submetidos a determinado processo. Assim, durante a secagem, a utilização de modelos matemáticos auxilia na execução de projetos e no dimensionamento de equipamentos, contribuindo para a melhor compreensão dos mecanismos envolvidos (Resende, 2006).

Segundo Resende et al. (2009), os modelos matemáticos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto, não fornecem indicações detalhadas sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente.

Segundo Midilli et al. (2002), existem três tipos de modelos de secagem em camada delgada que visam descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas. O modelo teórico, que considera apenas a resistência interna, a transferência de calor e a água entre o produto e o ar quente; os modelos semiteóricos e os empíricos, que consideram somente a resistência interna, a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem.

Estes modelos são utilizados para se estimar o tempo de secagem de diferentes produtos e na descrição das curvas de secagem. As curvas de secagem em camada delgada variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores (Midilli et al., 2002).

Segundo Queiroz et al., (1995), o método empírico consiste em formar grupos físicos adimensionais que podem ser facilmente investigados por experimentos de laboratório e se baseia nas condições externas, já nos métodos teóricos consideram as condições externas e também os mecanismos internos de transferência de energia, de massa e seus efeitos.

Dentre os modelos empíricos, têm-se o de Thompson, Peart e Foster (1968) e o de Wang e Singh (1978), tradicionalmente utilizados nos estudos de secagem de produtos agrícolas e de alimentos (Martinazzo et al., 2007).

Brooker, et al., (1992) citam como exemplo de modelos teóricos o fluxo hidrodinâmico e as difusões: líquida, capilar, superficial, de vapor e térmica.

Os modelos semiteóricos se baseiam na Lei de Newton para resfriamento aplicada à transferência de massa, presumindo-se que as condições sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de água se restrinja apenas à superfície do produto (Brooker et al, 1992).

Entre os modelos semiteóricos, o modelo de Dois Termos (Henderson, 1974), o de Henderson e Pabis (1961) e o de Page (1949), têm sido amplamente utilizados (Panchariya et al., 2002).

Embora várias teorias tenham sido propostas para prever o comportamento da secagem de grãos e sementes, na maioria das vezes, as relações semiempíricas e empíricas têm-se mostrado como melhores opções para prever o processo de secagem, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (Brooker et al., 1992).

Embora diversas teorias tenham sido propostas e várias equações tenham sido elaboradas para prever a variação do teor de água durante a secagem de produtos agrícolas no período à taxa decrescente, é possível afirmar que apenas relações empíricas ou semiteóricas têm sido utilizadas nos projetos de secadores, elas representam com maior precisão o processo de secagem que qualquer das equações teóricas desenvolvidas posteriormente (Brooker et al., 1992).

Modelos mais fundamentados, teoricamente, foram apresentados por Bakker-Arkema et al. (1978) e são amplamente aplicados na simulação de secagem de grãos e sementes.

Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, necessita-se da utilização de um modelo matemático que representa, satisfatoriamente, a perda de água durante o período de secagem (Giner & Mascheroni, 2002).

5. Qualidade Fisiológica

Durante a fase de pós-colheita das sementes, a realização de um manejo inadequado pode resultar em rápida deterioração e perda da qualidade das sementes. A deterioração, em muitos casos, imperceptível na fase inicial, manifesta-se no decorrer do tempo, ocasionando reflexos negativos no vigor (Garcia et al., 2004).

Segundo Silva et al. (2008), o teor de água do produto, temperatura e a umidade relativa do ar são considerados fatores cruciais à interação de fatores bióticos e abióticos que promovem a deterioração de grãos.

O efeito combinado da umidade relativa e da temperatura em um determinado local de armazenamento determina a atividade dos componentes bióticos do sistema, os quais conduzem ao armazenamento seguro ou a perdas do produto (Elias, 2002).

De acordo com Menezes et al. (2012), o aumento na temperatura de secagem resulta em aumento na percentagem de sementes com fissuras, que, associado a outros efeitos de secagem, afetam, negativamente, a germinação.

A água presente nas sementes influencia tanto na percentagem quanto na velocidade e uniformidade do processo germinativo e tem relação direta com a atividade de insetos e microrganismos, cuja intensidade é proporcional ao teor de água nas sementes (Marcos Filho, 2005).

Caso a secagem seja realizada de forma errônea, poderão ocorrer modificações na estrutura e nos teores dos componentes das sementes, comprometendo a germinação e o estabelecimento da plântula no local de cultivo.

Diferenças no vigor, associadas às características das sementes, são, geralmente, atribuídas à composição química, principalmente com relação à quantidade de reservas, ou à eficiência no metabolismo (Bortolotto et al., 2008).

A deterioração da semente é um processo irreversível, não se pode impedir, mas é possível retardar sua velocidade por meio do manejo adequado e eficiente das condições ambientais durante o armazenamento (Baudet et al., 1999).

Naturalmente, as condições predominantes durante a produção, colheita, manuseio, secagem e armazenamento das sementes interferem na sua viabilidade, tanto do ponto de vista morfológico quanto fisiológico.

A atividade microbiana, agravada pelo alto teor de água, pode causar efeitos indesejáveis e contribuir para o aquecimento da massa armazenada, ocasionando perdas de matéria seca por meio da respiração (Magan & Aldred, 2007). Dependendo das condições climáticas predominantes, o processo de deterioração é acelerado, com consequente perda da qualidade fisiológica (Vieira, 2004).

Segundo Corrêa et al. (2006), o desenvolvimento de microrganismos pode causar fermentações indesejáveis e contaminações por toxinas, que inviabilizam a utilização do produto para consumo humano e animal.

A redução do teor de água de sementes como resultado do processo de secagem atua diretamente na diminuição do metabolismo, podendo contribuir para diminuir a taxa de deterioração e aumentar o período em que podem ser armazenadas por longos períodos, sem perda da sua qualidade fisiológica (Carlesso et al., 2008).

O intervalo de tempo entre a colheita e o processo de secagem deve ser reduzido, pois as sementes com teor de água elevado apresentam altas taxas de atividade respiratória, ocasionando baixos índices de germinação e vigor (Garcia, 2004).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaducci, S.; Monti, A.; Venturi, G. Nonstructural carbohydrates and fibre components in sweet and fibre sorghum as affected by low and normal input techniques. *Industrial Crops Products*, Tucson, v. 20, n. 1, p. 111-118, 2004.
- Aviara, N. A.; Ajibola, O. O. Thermodynamics of moisture sorption in melon seed and cassava. *Journal of Food Engineering*, v.55, n.2, p.107-113. 2002.
- Ayranci, E.; Duman, O. Moisture sorption isotherms of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and its protein isotate at 10, 20 and 30°C. *Journal of Food Engineering*, v.70, n.1, p.83- 91, 2005.
- Afonso Júnior, P.C.; Corrêa, P.C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.3, n.3, p.349-353, 1999.
- Almodares, A.; Hadi, M. R. Production of bioethanol from sweet sorghum: a review. *African Journal of Agricultural Research*, Washington, v. 4, n. 9, p. 772- 780, 2009.
- Bakker-Arkema, F. W., Lerew, L. E., Brook, R. C., Brooker, D.B. Energy and capacity performance evaluation of grain dryers. St. Joseph, Michigan, ASAE, (ASAE Paper, 78-3523), 1978. 13p.;
- Barbosa-Cánovas, G.V.; Veja-Mercado, H. *Deshidratación de alimentos*. Ed. Acribia S.A. 2000, 297p.
- Baudet, L. M. L.; Villela, F. A.; Cavariani, C. Princípios de secagem. *Seed News*, Pelotas, v.3, n.10, p. 20-27, 1999.
- Brooker, D.B.; Bakker-Arkema, F.W.; Hall, C.W. *Drying and storage of grains and oilseeds*. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.

- Bortolotto, R. P.; Menezes, N. L.; Garcia, D.C.; Mattioni, N. M. Teor de proteína e qualidade fisiológica de sementes de arroz. *Bragantia*, Campinas, v. 67, n. 2, p. 513-520, 2008.
- Campos, S.C.; Corrêa, P.C.; Botelho, F.M.; Nogueira, B.L.; Oliveira, G.H.H.; Paixão, A.A. Avaliação da secagem dos grãos de café de diferentes etapas do processamento via úmida. *Revista Brasileira de Armazenamento*, v.34, n.2, p. 88-98, 2009.
- Chen, C. A rapid method to determine the sorption isotherms of peanuts. *Journal Agricultural Engineering Research*, New York, v.75, n. 4, p.401-408, 2000.
- Chen, C.; Weng, Y. Moisture sorption isotherms of Oolong Tea. *Food Bioprocess Technology*, v.3, n.2, p.226-233, 2010.
- Carlesso, V. O.; Berbert, P.A.; Silva, R.F.; Detmann, E. Secagem, armazenamento e qualidade fisiológica de sementes de maracujá-amarelo. *Revista Brasileira de Armazenamento*, Viçosa, MG, v.33, n.1, p. 9-18, 2008.
- Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, 2014. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 1 – Safra 2013/14, n. 4 - Quarto Levantamento, jan. 2014. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_01_10_15_07_19_boletim_graos_janeiro_2014.pdf, Acesso em: 13 de janeiro de 2014.
- Corrêa, P. C.; Goneli, A. L. D.; Resende, O.; Martinazzo, A. P.; Botelho, F. M. Comparação entre os métodos estático e dinâmico na determinação do equilíbrio higroscópico das espigas de milho. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.7, n.1, p.153-161, 2005.
- Corrêa, P.C.; Júnior, P. C. A.; Ribeiro, D. M.; Silva, F.S. Equilíbrio higroscópico de milheto, alpiste e painço: Obtenção e modelagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.10, n.1, p.162–167, 2006.
- Corrêa, P. C.; Resende, O.; Martinazzo A. P.; Goneli, A. L. G.; Botelho, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. *Engenharia Agrícola*, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.
- Dicko, M. H.; Gruppen, H.; Traoré, A. S.; Voragen, A. G. J.; Berkel, W. J. H. Sorghum grain as human food in Africa: relevance of content of starch and amylase activities. *African Journal of Biotechnology*, Nairobi, v. 5, n. 5, p. 384-395, 2006.
- Elias, M.C. Armazenamento e conservação de grãos em médias e pequenas escalas. Pelotas, 2002. Pólo de Inovação Tecnológica em Alimentos da Região Sul. UFPEL-FAEM-DCTA, 2002. 218 p.

- Erenturk, S.; Gulaboglu, M.S.; Gultekin, S. The Thinlayer Drying characteristics of roship. *Biosystems Engineering*, Oxford, v.89, n.2, p.159-166, 2004.
- Fan, J.; Siebenmorgen, T.J.; Marks, B.P. Effects of variety and harvest moisture content on equilibrium moisture contents of rice. *Applied Engineering in Agriculture*, St. Joseph, v.16, n.3, p.245-251, 2000.
- Farahnaky, A.; Ansari, S.; Majzoobi, M. Effect of glycerol on the moisture sorption isotherms of figs. *Journal of Food Engineering*, v.93, n.4, p.468-473, 2009.
- Filho, D. F.; Fornasieri, J.L. (Ed.). *Manual da Cultura do Sorgo*. Jaboticabal: Funep, 2009. 202p.
- Fontes, M.M.; Silva, B.A.; Dantas, J.P.; Silveira, D.C.; Cavalcanti, M.T. Caracterização físico-química do melado de sorgo granífero sacarino [*Sorghum biolor* (L) Moench]. *Revista Verde*, Mossoró, RN, v.6, n.1, p. 216 - 219 janeiro/março de 2011.
- Garcia, D. C.; Barros, A. C. S. A.; Peske, S. T.; Menezes, N. L. Secagem de sementes. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 603-608, 2004.
- Gely, M. C.; Santalla, E. M.; Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds. *Journal of Food Engineering*, London, v. 78, n.3, p. 1029–1033, 2007.
- Gely, M. C; Giner, S. A. Diffusion Coefficient Relationships during Drying of Soya Bean Cultivars. *Biosystems Engineering*, Oxford, v. 96 n. 2), p. 213–222, 2007.
- Giner, S. A.; Mascheroni, R. H. Diffusive drying kinetics in wheat, part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. *Biosystems Engineering*, Oxford, v. 81, n. 1, p. 85-97, 2002.
- Goneli, A. L. D.; Corrêa, P. C.; Resende, O.; Reis Neto, S. A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. *Ciência Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 27, n. 1, p. 135-140, 2007.
- Goneli, A.L.D, Corrêa, P.C., Afonso Júnior, P.C.; Oliveira, G.H.H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. *Revista Brasileira de Armazenamento*, v.34, n.2, p. 64-73, 2009.
- Hall, C.W. *Drying and storage of agricultural crops*. Westport: AVI, 1980. 381p.
- Han, K. J.; Pitman, W. D.; Alison, M. W.; Harrell, D. L.; Viator, H. P.; McCormick, M. E.; Gravois, K. A.; Kim, M.; Day, D. F. Agronomic considerations for sweet sorghum biofuel production in the South-Central USA. *Bioenergy Research*, New York, v. 5, n.3, p. 748-758, 2012.

- Henao, J. D.; Queiroz, M. R. De; Hajisa, N. M. A. Umidade de equilíbrio de café cereja descascado baseada em métodos estáticos e dinâmicos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.4, p.470-476, 2009.
- Henderson, S. M.; Pabis, S. Grain drying theory: temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 06, p. 169-174, 1961.
- Henderson, S. M. Progress in developing the thin layerdrying equation. *Transactions of the ASAE*, v.17, n.6, p. 1167-1168, 1974.
- Iguaz, A.; San Martin, M. B.; Maté, J. I.; Fernandez, T.; Vírseda, P. Modelling effective moisture diffusivity of rough rice (Lido cultivar) at low drying temperatures. *Journal of Food Engineering*, London, v. 59, n.2, p. 253–258, 2003.
- Kayacier, A.; Singh, R. K. Application of effective diffusivity approach for the moisture content prediction of tortilla chips during baking. *Swiss Society of Food Science and Technology*, v. 37, n. 2, p. 275-281, 2004.
- Lima, E. E. De; Silva, A. S.; Figueiredo, R. M. De F.; Queros, A.J. De M. Estudo das isotermas e calor isostérico de adsorção da farinha do coroa de frade. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.10, n.2, p.163-170, 2008.
- Magan, N.; Aldred, D. Post-harvest control strategies: Minimizing in the food chain. *International Journal of Food Microbiology*, v.119, n.1-2, p.131-139, 2007.
- Marcos Filho, J. *Fisiologia de sementes de Plantas cultivadas*. Piracicaba: FEALQ, 2005. 495 p.
- Martinazzo, A.P.; Correa, P. C.; Resende, O.; Melo, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.11, n.3, p.301–306, 2007.
- Menezes, N.L.; Cicero, S.M.; Villela, F.A.; Bortolotto, R.P. Using X-Rays to evaluate fissures in rice seeds dried artificially. *Revista Brasileira de Sementes*, Londrina, v. 34, n. 1, p. 70-77, 2012.
- Midilli, A.; Kucuk, H.; Yapar, Z. A. New model for single-layer drying. *Drying Technology*, v.20, n 7. p.1503–1513, 2002.
- Mohsenin, N.N. *Physical properties of plants and animals materials*. 2. ed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1986, 841 p.
- Monte, J. E. C.; Martins, J. H.; Lopes, D. C.; Monteiro, P. M. B.; Pinto, P. R. Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.30, n.3, p.307-312, 2008.

- Mortola, V. B.; Meili, L.; Pinto, L. A. A. Determinação das isotermas de equilíbrio para cebola, gelatina e farinha de pescado: Análise dos modelos de GAB, BET e Henderson. *Revista Vetor*, v.13, n.2, p.79-91, 2003.
- Mulet, A.; Garcya-Pascual, P.; Sanjuán, N.; Garcya-Reverter, J. Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). *Journal of Food Engineering*, London, v.53, n.1, p.75-81, 2002.
- Oliveira, M. M.; Campos, A. R. N.; Gomes, J. P.; Silva, F. L. H. Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial de casca do abacaxi (*Ananas comosus* L. Mer). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 9, n.4, p. 565-569, 2005.
- Oliveira, R.A.; Oliveira, W.P.; Park, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, v.26, n.1, p.181-189, 2006.
- Ordoñez, J. A. *Tecnologia de alimentos*. Porto Alegre: Artmed, p.25-31, 201-203. 2005.
- Page, G. E. *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. West Lafayette: Purdue University, 1949.
- Panchariya, P. C.; Popovic, D.; Sharma, A. L. Thinlayer modeling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, v. 52, n. 04, p. 349-357, 2002.
- Peske, S.T.; Villela, F. Secagem de sementes. In: PESKE, S. T.; ROSENTHAL, M.; ROTA, G.R.M. *Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos*. Pelotas: UFPel, 2003, p. 283-322.
- Prasad, S.; Singh, A.; Jain, N.; Joshi, H. C. Ethanol production from sweet sorghum syrup for utilization as automotive fuel in India. *Energy and Fuels*, Washington, v. 21, n.4, p. 2415-2420, 2007.
- Queiroz, D. M.; Pereira, J.A.M., Melo, E. C. *Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos*. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1995. 59p.
- Rathmann, R.; Szklo, A.; Schaeffer, R. Land use competition for production of food and liquid biofuels: an analysis of the arguments in the current debate. *Renewable Energy*, Oxford, v. 35, n. 1, p. 14-22, Jan. 2010.
- Ratnavathi, C. V.; Chakravarthy, S. K.; Komala, V. V.; Chavan, U. D.; Patil, J. V. Sweet sorghum as feedstock for biofuel production: a review. *Sugar Tech*, Heidelberg v. 13, n. 4, p. 399-407, 2011.
- Resende, O.; Côrrea, P.C.; Goneli, A.L.D.; Ribeiro, D.M. Isotermas e calor isostérico de sorção do feijão. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.26, n.3, p.626-631, 2006.

- Resende, O., Corrêa, P. C., Goneli, A. L. D., Botelho, F. M., Rodrigues, S.; Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.10, n.1, p.17-26, 2008.
- Resende, O.; Arcanjo, R. V.; Siqueira, V. C.; Rodrigues, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. Acta Scientiarum. Agronomy, v.31, n.2, p.189-196, 2009.
- Severiano, E.C.; Oliveira, G.C.; Curi, N.; Dias Junior, M.S. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, v. 33, n. 1, p. 159-168, jan./fev. 2009.
- Silva, J. S.; Afonso, A.D.L.; Donzelles, S.M.L. Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas, Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. Capítulo 5, 559 p.
- Souza, G. F. M. V.; Santos, C. M.; Santana, D. G.; Júnior, A. S. Armazenamento de sementes de sorgo submetidas a diferentes graus de umidade de colheita. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 30, n. 4, p. 745-752, 2009.
- Taylor, J. R. N.; Schober, T. J.; Bean, S. R. Novel food and non-food uses for sorghum and millets. Journal of Cereal Science, London, v. 44, n. 3, p. 252-271, 2006.
- Teixeira, C. G.; Jardine, J. G.; Darcy, A. Utilização do sorgo sacarino como matéria-prima complementar à cana-de-açúcar para obtenção de etanol em microdestilaria. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v. 17, n. 3, p. 248-251, 1997.
- Thompson, T. L.; Peart, R. M.; Foster, G. H. Mathematical simulation of corn drying: a new model. Transactions of ASAE, v. 11, n. 04, p. 582-586, 1968.
- Vasilakoglou, I.; Dhima, K.; Karagiamnidis, N.; Gatsis, T. Sweet sorghum productivity for biofuels under increased soil salinity and reduced irrigation. Field Crops Research, Amsterdam, v. 120, n.1, p. 38-46, 2011.
- Villela, F. A.; Peres, W. B. Coleta, secagem e beneficiamento de sementes. In: Ferreira, A. G.; Borguetti, R. Germinação: do básico ao aplicado. Porto Alegre: Artmed, 2004. p. 265-281.
- Vieira, R. D. Influência do ambiente na qualidade de sementes. In: Seminário Pan Americano De Semillas, 19, 2004. Asunción-Paraguay. Conferencias y resúmenes de trabajos presentados. Asunción-Paraguay: Federación Latinoamericana de Asociaciones de Semillistas. Asociación de Productores de Semillas del Paraguay, p. 93-99, 2004.

- Wang, N.; Brennan, J.G. Moisture sorption isotherm characteristics of potato at four temperatures. *Journal of Food Engineering*, v.14, n.1, p.269-287, 1991.
- Wang, C. Y.; Singh, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. *Transaction of ASAE*, v. 11, n.29, p. 668-672, 1978.
- Zegada-Lizarazu, W.; Monti, A. Are we ready to cultivate sweet sorghum as a bioenergy feedstock. A review on field management practices. *Biomass and Bioenergy*, Oxford, v. 40, s/n, p. 1-12, 2012.
- Zhao, Y. A.; Dolat A.; Steinberger, Y.; Wanga, X.; Osman, A.; Xie, G. H. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 111, n.1-2, p. 55-64, 2009.

OBJETIVO GERAL

Considerando a importância do estudo de pré-processamento dos produtos agrícolas e a escassez de informações a respeito dos fenômenos que ocorrem durante a fase pós-colheita das sementes de sorgo sacarino, além da atual demanda pela diversificação de matérias-primas para a produção de bioenergia, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar o processo de secagem e a higroscopicidade das sementes de sorgo sacarino (*Sorghum Bicolor* L. Moench), para diferentes condições de ar, bem como avaliar a qualidade das sementes após a secagem.

CAPÍTULO I

Higroscopicidade das sementes de sorgo sacarino

Resumo: Objetivou-se neste trabalho, determinar as isotermas de dessorção das sementes de sorgo sacarino para diversas condições de temperatura e atividades de água e obter o calor isostérico de dessorção. As sementes foram submetidas à secagem em estufa com ventilação de ar forçada a 40 °C até atingir os teores de água de aproximadamente 24; 19; 15; 12 e 8 (% b.s.). As isotermas de dessorção das sementes de sorgo sacarino foram obtidas pelo método estático indireto, sendo a atividade de água (a_w) determinada por meio do equipamento Hygropalm Model Aw 1. Para o controle da temperatura, utilizou-se B.O.D., regulada a 10, 20, 30 e 40 °C. Aos dados experimentais, foram ajustados modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da higroscopicidade de produtos vegetais. Verificou-se que o modelo de Chung-pfost é o que melhor representa a higroscopicidade das sementes de sorgo sacarino. O calor isostérico integral de dessorção aumenta com a redução do teor de água, sendo que os valores, para as sementes de sorgo sacarino na faixa de teor de água de 7,9 a 28,0 (% b.s.), variam de 3.136,54 a 2.493,33 kJ.kg⁻¹.

Palavras-chave: modelagem, calor isostérico, isotermas

Hygroscopicity of sweet sorghum seeds

Abstract: The objective of this work was to determine the sorption isotherms of sweet sorghum seeds in various conditions of temperature and water activity and obtain the isosteric heat of desorption. The seeds were dried in an oven with air forced ventilation

at 40 ° C until the water content of approximately 24, 19, 15, 12 and 8% (d.b.). Desorption isotherms of sorghum seeds were obtained by indirect static method, and the water activity (a_w) determined by the equipment Hygropalm Aw Model 1. For temperature control, there were used a B.O.D, set at 10, 20, 30 and 40 °C. The experimental data were fitted using mathematical models often adopted to represent the hygroscopicity of plant products. It was found that the Chung-Pfost model is the one that best represents the hygroscopicity of sorghum seeds. The full isosteric heat of sorption increases with decreasing water content, and the values for the sorghum seed content in the range of 7.9 to 28.0% (d.b.) water, range from 3136.54 to 2493.33 kJ.kg⁻¹.

Key-words: Modeling, isosteric heat, isotherms

INTRODUÇÃO

Cerca de 40% de toda a energia consumida no mundo provém de combustíveis de origem fóssil. Essas fontes são limitadas e, portanto, a busca por fontes de energias alternativas são de extrema importância (Ferrari et al., 2005)

Diversas plantas vêm sendo estudadas como fontes de energia renovável para diversificar a matriz energética, dentre estas, o sorgo sacarino está surgindo como potencial matéria-prima e em complemento a cultura da cana-de-açúcar, para a produção de etanol e bagaço.

Dentre esses estudos, os relacionados à pós-colheita são de extrema importância para garantir a manutenção da qualidade dos produtos vegetais colhidos. Dentro dessas etapas, a armazenagem se destaca como uma das principais.

Durante o armazenamento, podem ocorrer mudanças químicas, físicas e biológicas, que dependendo da interação entre estes fatores e com o meio ambiente, podem ocasionar perdas na qualidade das sementes (Resende et al., 2006).

Dessa maneira, torna-se necessário o conhecimento das relações existentes entre as sementes, a temperatura, a umidade relativa do ar e o teor de água em que se encontra o produto, visando amenizar as variações que podem vir a deteriorar o material.

Quando a pressão de vapor da água presente no produto e a pressão de vapor de água da atmosfera são iguais, ocorre o equilíbrio higroscópico (Araújo et al., 2005).

As condições de umidade relativa e temperatura durante o armazenamento, em que os produtos alcançarão o equilíbrio higroscópico, determinarão a manutenção de sua qualidade fisiológica, por maior ou menor tempo (Borges et al., 2009).

A relação entre o teor de água de equilíbrio e a umidade relativa de equilíbrio, também designada por atividade da água, constitui um fator essencial na elaboração de projetos e estudos de sistemas de secagem, armazenamento, transporte e modelagem da longevidade e preservação das sementes (Araújo et al., 2001).

O comportamento das isotermas é necessário para se conhecer a sua relação com as características físicas, químicas e de estabilidade dos produtos desidratados ou parcialmente desidratados (Hubinger et al., 2009).

Diversos trabalhos têm sido realizados recentemente com a finalidade de estudar a higroscopicidade de diferentes produtos vegetais, tais como pimenta malagueta (Silva & Rodvalho, 2012), crambe (Costa et al., 2013), caju (Caetano et al., 2012) e milho (Smaniotto et al., 2012).

Diante da importância do conhecimento e do estudo da higroscopicidade dos produtos agrícolas, nota-se que na literatura não são encontrados estudos relacionados ao sorgo sacarino. Assim, o objetivo neste trabalho foi determinar as isotermas de sorção das sementes de sorgo sacarino para diversas condições de temperatura e atividades de água e obter o calor isostérico de dessorção.

METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido nos Laboratórios de Pós-Colheita de Produtos Vegetais, e no Laboratório de Sementes do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano - Câmpus Rio Verde), situados no município de Rio Verde, GO.

As sementes de sorgo sacarino foram colhidas manualmente depois da maturação, com teor de água de aproximadamente 28% (b.s.), e posteriormente foram encaminhadas para o processo de secagem em estufa com ventilação de ar forçada a 40 °C até atingir os teores de água de aproximadamente 24; 19; 15; 12 e 8% (b.s.).

Para a obtenção dos dados para a modelagem da dessorção das sementes de sorgo sacarino, utilizou-se o método estático indireto, no qual 12 gramas de produto foram inseridas dentro de câmara isolada, e foi determinada a atividade de água (a_w) por meio do equipamento Hygropalm Model Aw.

Para o controle da temperatura, utilizou-se B.O.D., regulada nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40 °C.

Os teores de água das sementes de sorgo sacarino foram determinados por gravimetria, utilizando a estufa a 105 ± 1 °C, durante 24 horas, em três repetições segundo Brasil (2009).

Aos dados experimentais foram ajustados modelos matemáticos que são frequentemente utilizados para representação da higroscopicidade de produtos vegetais, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a higroscopicidade de produtos vegetais

Designação do modelo	Modelo	
$Xe^* = \exp\{a - (b \cdot T) + [c \cdot \exp(a_w)]\}$	Sigma Copace	(1)
$Xe^* = (a + b \cdot T) / [(1 - a_w) / a_w]^{\frac{1}{c}}$	Oswin Modificado	(2)
$Xe^* = [\ln(1 - a_w) / (-a \cdot (T + b))]^{\frac{1}{c}}$	Henderson Modificado	(3)
$Xe^* = \exp[a - (b \cdot T) + (c \cdot a_w)]$	Copace	(4)
$Xe^* = a - b \cdot \ln[-(T + c) \cdot \ln(a_w)]$	Chung-Pfost	(5)
$Xe^* = [\exp(a - b \cdot T) / -\ln(a_w)]^{\frac{1}{c}}$	Halsey Modificado	(6)
$Xe^* = [\ln(1 - a_w) / (-a \cdot (T + 273,16))]^{\frac{1}{b}}$	Henderson	(7)
$Xe^* = a \cdot \left(\frac{a_w}{T}\right)^b$	Sabbah	(8)
$Xe^* = (a \cdot b \cdot c \cdot a_w) / [(1 - c \cdot a_w) \cdot (1 - c \cdot a_w + b \cdot c \cdot a_w)]$	GAB	(9)
$Xe^* = [\log(1 - a_w) / (a \cdot (T^b))]^{\frac{1}{c}}$	Cavalcanti Mata	(10)
$Xe^* = \left\{ 1 / \left[(1 - a_w) \cdot \left(\frac{1}{a} \cdot b + \left(\frac{a-1}{a \cdot b} \right) \right) \right] \right\}$	BET	(11)
$Xe^* = (a + bT) / [(1 - a_w) / a_w]^{\frac{1}{c}}$	Oswin	(12)

em que:

Xe^* : teor de água de equilíbrio, % b.s.;

a_w : atividade de água, decimal;

T: temperatura, °C; e

a, b, c: coeficientes de ajuste dos modelos que depende do produto.

Os modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais por meio de análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton. Os modelos foram selecionados considerando a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), o erro médio relativo (P), o erro médio estimado (SE) e o teste de qui-quadrado (χ^2).

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (13)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (14)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR} \quad (15)$$

em que,

Y : valor experimental;

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo;

N: número de observações experimentais; e

GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações experimentais menos o número de coeficientes do modelo).

Para obter o calor isostérico de desorção os valores de atividade de água, temperatura e teor de água de equilíbrio foram obtidos a partir das isotermas de desorção das sementes de sorgo sacarino, utilizando o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Para os cálculos do calor isostérico líquido de sorção, para cada teor de água de equilíbrio, utilizou-se a equação de Clausius-Clayperon (Iglesias & Chirife, 1976):

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial T} = \frac{\Delta h_{st}}{RT_a^2} \quad (16)$$

em que,

a_w : atividade de água, decimal;

T_a : temperatura absoluta, K;

Δh_{st} : entalpia diferencial, kJ.kg^{-1} ;

R: constante universal dos gases, $0,287 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$., sendo para o vapor d'água = $0,4619 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Integrando a Equação 16 e assumindo que o calor isostérico líquido de sorção seja independente da temperatura, o calor isostérico líquido de sorção, para cada teor de água de equilíbrio, foi obtido conforme a Equação 17 (Wang & Brennan, 1991):

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{\Delta h_{st}}{R}\right) \cdot \frac{1}{T_a} + C \quad (17)$$

em que,

C: constante de integração

O calor isostérico integral de sorção foi obtido adicionando-se aos valores de calor isostérico líquido de sorção (Equação 17) o valor do calor latente de vaporização da água livre de acordo com a Equação 18.

$$Q_{st} = \Delta h_{st} + L = a \cdot \exp(-b \cdot X e^*) + L \quad (18)$$

em que:

Q_{st} : calor isostérico integral de sorção, kJ.kg^{-1} ;

L: calor latente de vaporização da água livre, kJ.kg^{-1} ;

$X e^*$: teor de água de equilíbrio, % b.s.; e

a, b: coeficientes do modelo.

O calor latente de vaporização da água livre (kJ.kg^{-1}), à temperatura de equilíbrio ($^{\circ}\text{C}$), foi calculado, utilizando a temperatura média (T) na faixa em estudo, em $^{\circ}\text{C}$, por meio da seguinte equação:

$$L = 2502,2 - 2,39 \cdot T \quad (19)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, estão apresentados o coeficiente de determinação (R^2), os valores do erro médio relativo, erro médio estimado e do teste de Qui-quadrado (χ^2) para os teores de água de equilíbrio das sementes de sorgo sacarino, obtidos por dessorção, para diferentes condições de temperatura e atividades de água.

Tabela 2. Parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico para as sementes de sorgo sacarino, com seus respectivos erros médios estimado (SE) e relativo (P), teste de qui-quadrado (χ^2) e coeficientes de determinação (R^2)

Modelos	SE	P	χ^2	R^2
Chung-pfost	1,31	7,67	1,72	96,65
Copace	1,59	8,72	2,54	95,06
GAB	2,08	11,16	4,34	91,55
Halsey Modificado	1,42	9,25	2,01	96,09
Sabbah	1,82	8,38	3,31	93,56
Sigma Copace	1,53	8,99	2,34	95,45
Oswin Modificado	1,31	8,52	1,72	96,66
Cavalcanti Mata	1,43	8,08	2,03	96,04
Henderson Modificado	1,35	7,91	1,83	96,44
Henderson	1,65	9,33	2,71	94,41

BET	6,39	36,29	40,83	15,82
Oswin	1,31	8,52	1,72	96,66

Com relação ao erro médio estimado (SE), todos os modelos com exceção de BET e GAB apresentaram valores inferiores a ($<2,0$), os quais foram considerados como um parâmetro importante para o bom ajuste dos modelos aos dados experimentais. De acordo com Draper & Smith (1981), a capacidade de um modelo representar adequadamente um determinado processo é inversamente proporcional ao valor do erro médio estimado.

Analisando os valores de erro médio relativo (P), verifica-se que exceto os modelos de GAB e BET, os demais apresentaram magnitudes inferiores a 10% para os modelos estudados, no qual segundo Mohapatra & Rao (2005), indica uma adequada representação do fenômeno. Ressalta-se que os valores do erro médio relativo (P) indicam o desvio médio entre os valores experimentais em relação à curva estimada pelo modelo (Kashaninejad et al., 2007).

Em relação ao teste de Qui-quadrado (χ^2), os doze modelos analisados com exceção de BET se encontram no intervalo de confiança de 95%. Entretanto, comparando as magnitudes dos valores, os modelos de Chung-pfost, Oswin Modificado e Oswin apresentaram o menor valor (1,72).

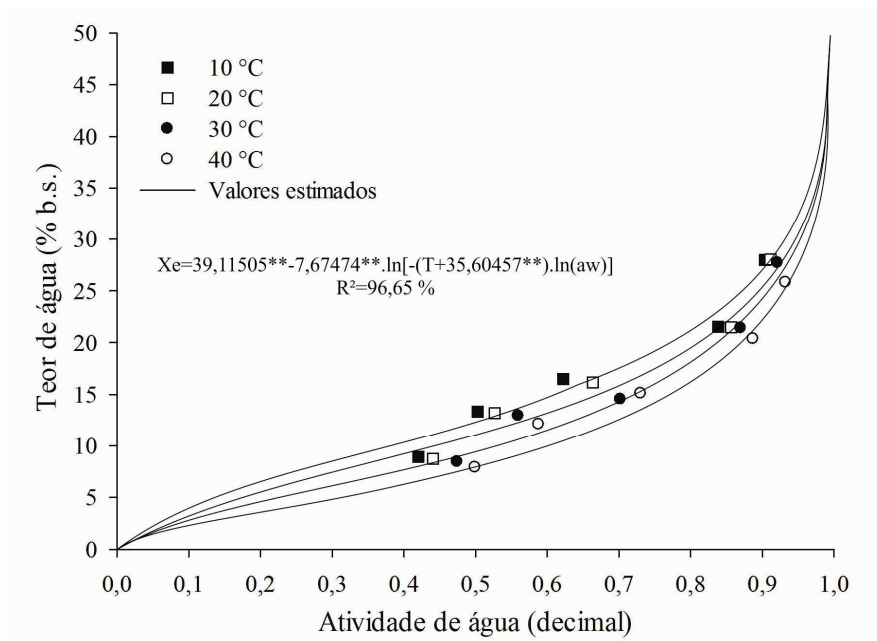
O coeficiente de determinação (R^2) apresentou, com exceção de BET, valores superiores a 91,5%, no qual segundo Madamba et al. (1996) expressa uma representação satisfatória do processo em estudo, porém estes pesquisadores afirmam que a utilização do coeficiente de determinação isoladamente para a seleção dos modelos não lineares não constitui um bom parâmetro de representação.

Aviara et al. (2004) afirmam que apenas o coeficiente de determinação (R^2) e erro estimado (SE) não são suficientes para provar a qualidade do ajuste de um determinado modelo.

Entre os modelos que apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais, o modelo de Chung-pfost apresentou os menores valores de SE, P, χ^2 e o maior valor do coeficiente de determinação (R^2), e por ser um modelo usado tradicionalmente para produtos amiláceos, foi selecionado para representar a higroscopicidade das sementes de sorgo sacarino.

Na Figura 1, estão apresentados os valores experimentais do teor de água de equilíbrio das sementes de sorgo sacarino, obtidos por dessorção, bem como as

isotermas de desorção estimadas pelo modelo de Chung-pfost para as temperaturas de 10, 20, 30 e 40 °C.



**Significativo a 5% pelo teste t

Figura 1. Valores experimentais da atividade de água e isotermas de desorção estimadas pelo modelo de Chung-pfost para as sementes de sorgo sacarino em diferentes condições de temperatura e atividades de água.

Verificou-se, que para a atividade de água constante, o aumento da temperatura promove a redução do teor de água de equilíbrio, seguindo a tendência da maioria dos produtos agrícolas (Corrêa et al., 2006 a; Hubinger et al. 2009; Lima et al., 2008; Resende et al., 2006).

As isotermas de desorção obtidas para as sementes de sorgo sacarino SE apresentaram na forma típica sigmoidal (tipo II), como observado por diferentes autores para diversos produtos agrícolas, como exemplos: feijão (Resende et al., 2006), trigo (Corrêa et al., 2005), arroz em casca (Iguaz & Vírseda, 2007) e também para gêneros alimentícios, como sardinha, macarrão e pasta de pistache (Furmaniak et al., 2007).

Diversos pesquisadores também verificaram que o modelo de Chung-pfost foi o que melhor se ajustou aos seus dados experimentais, para diversos produtos amiláceos, como trigo (Corrêa et al., 2005), arroz em casca (Basunia & Abe 2001), milho doce (Araújo et al., 2001), alpiste e painço (Corrêa et al., 2006 b), e demais outros produtos agrícolas, como sementes de quiabo (Goneli et al., 2010) e caju-de-árvore-do-cerrado (Caetano et al., 2012).

Diante da representação satisfatória do equilíbrio higroscópico das sementes de sorgo sacarino, o modelo de Chung-pfost foi utilizado para o cálculo dos valores de atividade de água, necessários para a determinação dos valores do calor isostérico líquido de dessorção.

Na Tabela 3, estão apresentadas as atividades de água, obtidas por meio do modelo de Chung-pfost, para as sementes de sorgo sacarino com teores de água variando de 7,9 a 28 (% b.s.), entre a faixa de temperatura de 10 a 40 °C.

Tabela 3. Atividades de água (decimal) para as sementes de sorgo sacarino estimadas pelo modelo de Chung-pfost em função da temperatura e do teor de água de equilíbrio

Teor de água de equilíbrio (% b.s.)	Temperatura (°C)			
	10	20	30	40
7,9	0,27	0,34	0,40	0,46
8,4	0,30	0,37	0,43	0,48
8,7	0,31	0,39	0,45	0,50
8,9	0,32	0,39	0,45	0,50
12,1	0,47	0,54	0,59	0,63
12,9	0,51	0,57	0,62	0,66
13,2	0,52	0,59	0,63	0,67
13,4	0,53	0,59	0,64	0,68
14,5	0,58	0,64	0,68	0,72
15,1	0,60	0,66	0,70	0,73
16,2	0,64	0,69	0,73	0,76
16,5	0,65	0,71	0,74	0,77
20,3	0,77	0,81	0,83	0,85
21,4	0,80	0,83	0,85	0,87
21,5	0,80	0,83	0,85	0,87
25,8	0,88	0,90	0,91	0,92
27,7	0,90	0,92	0,93	0,94
28,0	0,91	0,92	0,93	0,94

Observou-se que com aumento do teor de água e da temperatura ocorreu acréscimo da atividade da água. Considerando que, de modo geral, os fungos têm o início do seu desenvolvimento com as atividades da água de pelo menos 0,7 (Oliveira et al., 2005), ressalta-se que o teor de água ideal para o armazenamento das sementes de sorgo sacarino está compreendido abaixo dos valores de 13,4 e 16,5% (b.s.), de acordo com a variação da temperatura entre 10 e 40 °C.

Na Figura 2, são apresentadas as curvas do logaritmo neperiano da atividade da água para específicos valores de teor de água de equilíbrio (% b.s.), em função do inverso da temperatura absoluta (K), para as sementes de sorgo sacarino.

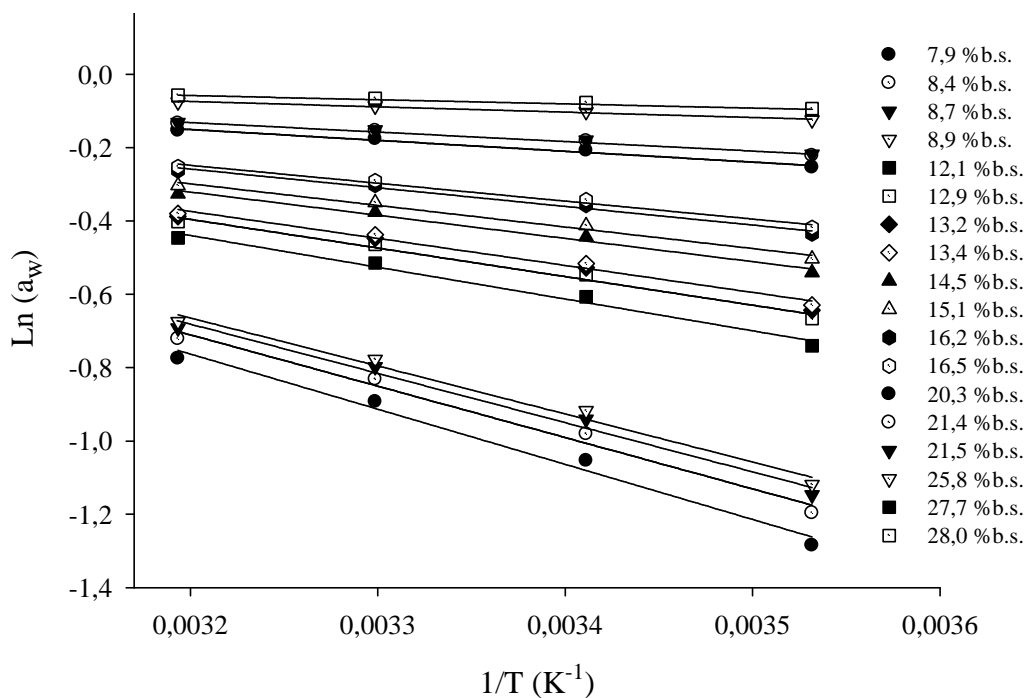


Figura 2 - Curvas do logaritmo neperiano da atividade de água (decimal), para o teor de água de equilíbrio (% b.s.), em função de valores de $1/T$ (K^{-1}) para as sementes de sorgo sacarino.

Na Figura 3, está apresentada a curva do calor isostérico integral de dessorção, em função do teor de água de equilíbrio (% b.s.), para as sementes de sorgo sacarino.

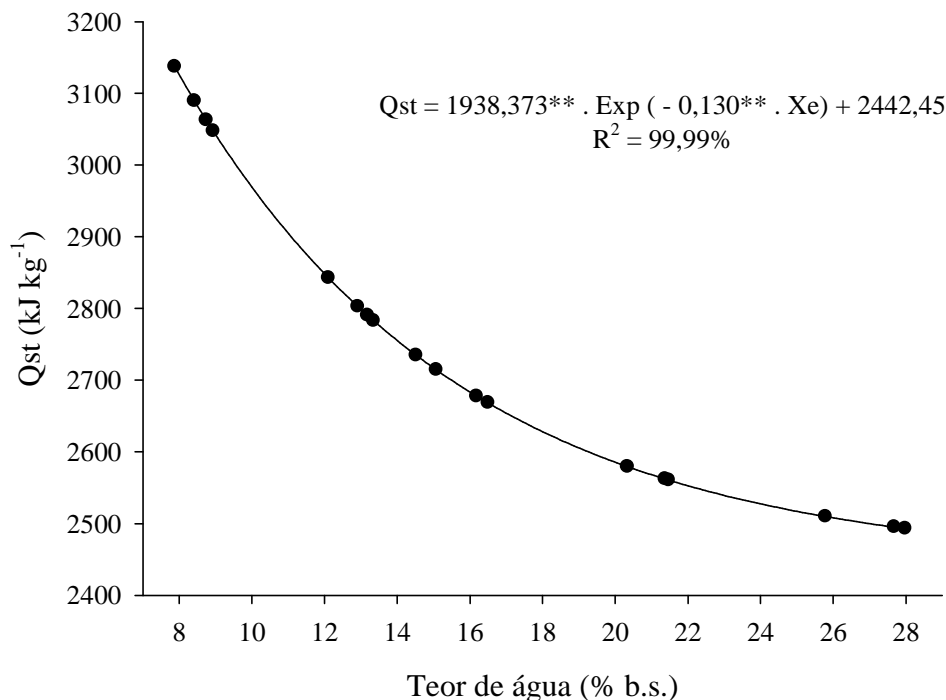


Figura 3 - Valores experimentais e estimados do calor isostérico integral de dessorção (Q_{ST}) das sementes de sorgo sacarino em função do teor de água de equilíbrio.

Observa-se na Figura 3, que os valores de calor isostérico integral de dessorção para as sementes de sorgo sacarino, entre os teores de água de equilíbrio de 7,9 e 28,0 % (b.s.), variaram de 3.136,54 a 2.493,33 kJ.kg^{-1} .

Verificou-se que com a redução do teor de água, ocorreu o aumento da energia necessária para a remoção de água do produto representada pelos valores do calor isostérico integral de dessorção, conforme relatado para diversos produtos agrícolas, como feijão (Resende et al., 2006), crambe (Costa et al., 2013), trigo (Corrêa et al., 2005), pimenta malagueta (Silva & Rodovalho, 2012), pinhão (Oliveira et al., 2010) e quinoa (Tolaba et al., 2004).

Costa et al., (2013), encontram magnitudes compreendidas entre 10.183,33 a 3.538,74 kJ.kg^{-1} , trabalhando com crambe para o teor de água de equilíbrio entre 1,22 a 3,39% (b.s.), já Ayranci & Duman (2005), obtiveram valores de calor isostérico semelhantes aos obtidos neste trabalho, variando de 3.361 a 2.472 kJ.kg^{-1} , trabalhando com feijão caupi na faixa de teor de água entre 4 e 16% (b.s).

Tagawa et al., (1993) e Brooker et al., (1992) afirmam que para retirar água de sementes com baixo teor de água é necessário uma quantidade de energia superior aquela necessária para produtos com elevado teor de água. De acordo com Aviara & Ajibola (2002), esses resultados confirmam o fato de que nos produtos com maior teor

de água a força de ligação entre as moléculas de água e a matéria seca diminui sensivelmente. Al-Muhtaseb et al., (2004) afirmam que isso ocorre porque na fase inicial de sorção (menor teor de água) existe uma camada monomolecular que necessita de elevadas quantidades de energia para remover essas moléculas de água do produto.

Wang & Brennan, (1991) relatam ainda, que à medida que as moléculas de água vão se ligando quimicamente aos sítios de sorção ativos a sorção passa a ocorrer em sítios menos ativos em que estão com elevado teor de água, com menor energia de interação e, conseqüentemente, menor calor isostérico de sorção.

O calor isostérico integral de dessorção para as sementes de sorgo sacarino podem ser representados de forma adequada pela equação de regressão exponencial, a qual apresentou elevado coeficiente de determinação (99,9%), como também foi constatado por Costa et al. (2013) e Caetano et al. (2012).

CONCLUSÕES

1. O teor de água de equilíbrio diminui com o aumento da temperatura, para uma mesma atividade de água.
2. As isotermas de dessorção obtidas para as sementes de sorgo sacarino possuem formato sigmoideal, padrão para o equilíbrio higroscópico de produtos agrícolas amiláceos.
3. O modelo de Chung-pfost é o que melhor representa a higroscopicidade das sementes de sorgo sacarino.
4. O calor isostérico integral de dessorção das sementes de sorgo sacarino varia de 3.136,54 a 2.493,33 kJ.kg⁻¹, para a faixa de teor de água de 7,9 a 28,0 (% b.s.)

AGRADECIMENTOS

A CAPES, pela bolsa de estudos e ao CNPq, FAPEG e IF Goiano – Câmpus Rio Verde pelo auxílio financeiro e disponibilidade de infraestrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Muhtaseb, A.H.; Mcminn, W.A.M.; Magge, T.R.A. Water sorption isotherms of starch powders. Part 2: Thermodynamic characteristics. *Journal of Food Engineering*, v.62, n.2, p.135-142, 2004.

- Araújo, L.F.; Corrêa, P.C.; Silva, R. F. Comparação de modelos matemáticos para descrição das curvas de dessorção de sementes de milho-doce. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, n.7, p.991-995, 2001.
- Araújo, L.F.; Oliveira, L.S.C.; Neto, A.P.; Alsina, O.L.S.; Silva, F.L.H. Equilíbrio higroscópico da palma forrageira: Relação com a umidade ótima para fermentação sólida. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.3, p.379-384, 2005.
- Aviara, N. A.; Ajibola, O. O. Thermodynamics of moisture sorption in melon seed and cassava. *Journal of Food Engineering*, v.55, n.2, p.107-113. 2002.
- Aviara, N. A.; Ajibola, O. O.; Oni, S. A. Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean. *Biosystems Engineering, London*, v. 87, n.2, p. 179–190, 2004.
- Ayranci, E.; Duman, O. Moisture sorption isotherms of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and its protein isolate at 10, 20 and 30°C. *Journal of Food Engineering, Davis*, v. 70, n. 1, p. 83-91, 2005.
- Basunia, M. A.; Abe, T. Moisture desorption isotherms of medium-grain rough rice. *Journal of Stored Products Research, Oxford*, v. 37, n. 3, p. 205-219, 2001.
- Borges, S.; Borges, E. E. L.; Correa, P. C.; Brune, A. Equilíbrio higroscópico e viabilidade de sementes de angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina* (L.) Speng) em diferentes condições ambientais de armazenamento. *Scientia Forestalis*, v.37, p.475-481, 2009.
- Brasil, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. Regras para análise de sementes. Brasília, 2009, 398 p.
- Brooker, D. B.; Bakker-Arkema, F.W.; Hall, C.W. Drying and storage of grains and oilseeds. New York: Van Nostran Reinhold, 1992. 450p.
- Caetano, G.C.; Sousa, K.A.; Resende, O.; Sales, J.F. Costa, L.M. Higroscopicidade de sementes de caju-de-árvore-do-cerrado. *Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia*, v. 42, n. 4, p. 437-445, out./dez. 2012.
- Costa, L.M.; Resende, O.; Oliveira, D.E.C. Isotermas de dessorção e calor isostérico dos frutos de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.4, p.412–418, 2013.
- Corrêa, P. C.; Goneli, A. L. D.; Resende, O.; Ribeiro, D. M. Obtenção e modelagem das isothermas de dessorção e do calor isotérico de dessorção para grãos de trigo. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.7, n.1, p.39-48, 2005.

- Corrêa, P. C.; Ribeiro, D. M.; Resende, O.; Botelho, F. M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo durante a secagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v.10, n.3, p.665-670, 2006 a.
- Corrêa, P.C. Júnior, P.C.A.; Ribeiro, D.M.; Silva, F.S. Equilíbrio higroscópico de milho, alpiste e painço: obtenção e modelagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 162-167, 2006 b.
- Draper, N. R.; Smith, H. *Applied regression analysis*, 3ª ed., New York: John Wiley and Sons, 1998. 712p.
- Ferrari, R. A.; Oliveira, V. S.; Scabio, A. Biodiesel de soja: taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-químicas e consumo em geradores de energia. *Química Nova*, v. 18, n. 01, p. 19-23, jan. 2005.
- Furmaniak, S.; Terzyk, A.P.; Gauden, P.A. The general mechanism of water sorption on foodstuffs - Importance of the multitemperature fitting of data and the hierarchy of models. *Journal of Food Engineering*, v. 82, n.1, p.528-535, 2007.
- Goneli, A. L. D.; Corrêa, P.C.; Oliveira, G.H.H.; Botelho, F.M. Water desorption and thermodynamic properties of okra seeds. *Transactions of the ASABE*, St. Joseph, v. 53, n. 1, p. 191-197, 2010.
- Hubinger, M. D.; Vivancopezantes, D.; Kurozawa, L. E.; Sobral, P. J. A. Isotermas de desorção de filé de bonito (Sarda sarda) desidratado osmoticamente e defumado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.3, p.305-311, 2009.
- Iglesias, H.; Chirife, J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. *Journal of Food Technology*, v. 11, n.2, p.109-116, 1976.
- Iguaz, A.; Vírseada, P. Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures. *Journal of Food Engineering*, Essex, v. 79, n.2, p. 794-802, 2007.
- Kashaninejad, M.; Mortazavi, A.; Safekordi, A.; Tabil, L. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, Essex, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.
- Lima, E. E. De; Silva, A. S.; Figueiredo, R. M. De F.; Queroz, A.J. De M. Estudo das isotermas e calor isostérico de adsorção da farinha do coroa de frade. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.10, n.2, p.163-170, 2008.
- Madamba, P. S.; Driscoll, R. H.; Buckle, K. A. The thin layer drying characteristic of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, Essex, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.

- Mohapatra, D.; Rao, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, v.66, n.4, p.513-518, 2005.
- Oliveira, M.M.; Campos, A.R.N.; Gomes, J.P.; Silva, F.L.H. Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial de casca do abacaxi (*Ananas comosus* L. Mer). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.4, p.565-569, 2005.
- Oliveira, F. Adsorption isotherms of pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds) starch and thermodynamic analysis. *Journal of Food Engineering*, v.100, n.3, p. 468-473, 2010.
- Resende, O.; Côrrea, P.C.; Goneli, A.L.D.; Ribeiro, D.M. Isotermas e calor isostérico de sorção do feijão. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.26, n.3, p.626-631, 2006.
- Silva, H.W.; Rodovalho, R.S. Isotermas de dessorção das sementes de pimenta malagueta. *Global Science and Technology*, Rio Verde, v. 05, n. 01, p.32 – 39, jan/abr. 2012.
- Smaniotto, T.A.S.; Resende, O.; Oliveira, D.E.C.; Sousa, K.A.; Campos, R.C. Isotermas e calor latente de dessorção dos grãos de milho da cultivar ag 7088. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.11, n.3, p. 312-322, 2012.
- Tagawa, A.; Murata, S.; Hayashi, H. Latent heat of vaporization in buckwheat using the data of equilibrium moisture content. *Transactions of the ASAE*, v.36, n.1, p.113-118, 1993.
- Tolaba, M.P.; Peltzer, M.; Enriquez, N.; Pollio, M.L. Grain sorption equilibria of quinoa grains. *Journal of Food Engineering*, v.61, n.3, p.365-371, 2004.
- Wang, N.; Brennan, J.G. Moisture sorption isotherm characteristics of potato at four temperatures. *Journal of Food Engineering*, v.14, n.1, p.269-287, 1991.

CAPÍTULO II

Cinética de secagem das sementes de sorgo sacarino

Resumo: Objetivou-se no presente trabalho ajustar diversos modelos matemáticos ao processo de secagem das sementes de sorgo sacarino submetidas as diferentes condições de ar, como também determinar o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação do processo. A secagem do sorgo sacarino foi realizada mantendo as temperaturas controladas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C e umidades relativas de 28,4; 18,6; 12,2; 7,3; e 3,1%, respectivamente. Aos dados experimentais, ajustaram-se diferentes modelos matemáticos usados para produtos agrícolas para descrever o fenômeno em estudo. Os onze modelos analisados representam adequadamente as curvas de secagem das sementes de sorgo sacarino, sendo o modelo de Midilli o que melhor descreve o fenômeno. O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem, resultando numa energia de ativação de 11,67 kJ.mol⁻¹.

Palavras-chave: Modelagem matemática, difusão líquida, energia de ativação

The drying kinetics of seeds type saccharine sorghum

Abstract: Objective of the present work was to adjust several mathematical process of drying the seeds of sorghum subjected to different conditions of air models, as well as determine the effective diffusion coefficient and the activation energy of the process. Drying of sorghum was carried out while maintaining the controlled 40, 55, 70, 85 and 100 °C, and relative humidities temperatures of 28.4, 18.6, 12.2, 7.3, and 3.1%, respectively. The experimental data and set different mathematical models used for

agricultural products to describe the phenomenon under study. Among the eleven models analyzed, Midilli was the best fit to describe the drying curves of seed of sweet sorghum. The effective diffusion coefficient increases with increasing drying air temperature, resulting in an activation energy of $11.67 \text{ kJ.mol}^{-1}$.

Key-words: Modeling mathematics, liquid diffusion, activation energy

INTRODUÇÃO

Diversas plantas vêm sendo estudadas com objetivo de fornecer matéria-prima para a obtenção de etanol, de bagaço e de grãos para as indústrias, contribuindo para diversificação da matriz energética nacional, dentre estas, o sorgo sacarino está surgindo como fonte de energia renovável.

A produção de grãos e sementes com alta qualidade requer que o produto seja colhido antecipadamente, ou seja, quando ainda apresenta elevado teor de água, visando assim diminuir os possíveis danos ocasionados pelo ataque de insetos, pássaros e microrganismos (Corrêa et al., 2006).

As etapas pós-colheita são de fundamental importância para garantir a manutenção da qualidade dos produtos vegetais colhidos, entre as quais, a secagem se destaca como uma das principais.

Para que a secagem seja realizada de forma rápida, segura e econômica é fundamental conhecer e monitorar os fenômenos físicos existentes durante este processo (Martinazzo et al., 2007).

No desenvolvimento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, é de fundamental importância à simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água.

O estudo de sistemas de secagem e a determinação da sua aplicação comercial podem ser feitos por meio de simulação matemática, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utilizando um modelo que representa satisfatoriamente a perda de água (Afonso Júnior & Corrêa, 1999).

Diversos trabalhos têm sido realizados recentemente com a finalidade de identificar as características dos produtos agrícolas durante a secagem, tais como: nabo forrageiro (Sousa et al., 2011); crambe (Costa et al., 2011); feijão (Corrêa et al., 2007), milho (Oliveira et al., 2012), espiga de milho (Corrêa et al., 2011), clones de café (Resende et

al., 2009) e pinhão-manso (Ullmann et al., 2010). Entretanto, na literatura não se encontra estudos desenvolvidos com a secagem de sementes de sorgo sacarino.

Diante o exposto, objetivou-se no presente trabalho ajustar diversos modelos matemáticos ao processo de secagem das sementes de sorgo sacarino submetidas as diferentes condições de ar, além de determinar o coeficiente de difusão efetivo e obter a energia de ativação necessária para o início do processo.

METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido nos Laboratórios de Pós-Colheita de Produtos Vegetais, e no Laboratório de Sementes do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano - Câmpus Rio Verde), situados no município de Rio Verde, GO.

As sementes de sorgo tipo sacarino foram colhidas, manualmente, depois da maturação fisiológica, com teor de água de aproximadamente 23% (b.s.), e posteriormente foram beneficiadas removendo as impurezas e encaminhadas para o processo de secagem. A secagem foi realizada em estufa com circulação forçada de ar, mantendo as temperaturas controladas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C e umidades relativas de 28,4; 18,6; 12,2; e 7,3; e 3,1%, respectivamente.

As sementes foram secas em bandejas contendo 0,3 kg de produto, perfazendo uma camada de 3 cm de espessura, em quatro repetições, totalizando 1,2 kg de produto para cada tratamento. As bandejas foram pesadas periodicamente, até o ponto final da secagem estabelecido em $15 \pm 1\%$ (b.s.).

Os teores de água das sementes de sorgo sacarino foram determinados por gravimetria, utilizando a estufa a 105 ± 1 °C, durante 24 horas, em três repetições segundo Brasil, (2009). A temperatura e a umidade relativa do ar de secagem foram monitoradas por meio de um psicrômetro instalado no interior da estufa.

Para a obtenção do equilíbrio higroscópico do sorgo sacarino, foram utilizadas três repetições contendo 25 g, mantidas nas condições de secagem descritas anteriormente e pesadas periodicamente até massa constante. As razões de teor de água do produto foram determinadas pela expressão:

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

em que,

RX: razão de teor de água, adimensional;

X^* : teor de água do produto (b.s.) num dado instante de tempo;

X_i^* : teor de água inicial do produto (b.s.);

X_e^* : teor de água de equilíbrio do produto (b.s.);

Aos dados experimentais da secagem do sorgo sacarino, ajustaram-se diversos modelos matemáticos usados para representar a secagem dos produtos agrícolas, conforme descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para predizer o fenômeno da secagem de produtos agrícolas.

Designação do modelo	Modelo	
$RX = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	Wang e Sing (Wang & Sing, 1978)	(2)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k_1 \cdot t)$	Verma (Verma et al., 1985)	(3)
$RX = \exp \left(\left(-a - (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0.5} \right) / 2 \cdot b \right)$	Thompson (Thompson et al., 1968)	(4)
$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	Page (Page, 1949)	(5)
$RX = \exp(-k \cdot t)$	Newton (Lewis, 1921)	(6)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	Midilli (Midilli, 2002)	(7)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	Logarítmico (Yagcioglu et al., 1999)	(8)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis (Henderson E Pabis, 1961)	(9)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$	Exponencial de Dois Termos (Sharaf-Eldee et al., 1980)	(10)
$RX = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	Dois Termos (Henderson, 1974)	(11)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$	Aproximação da Difusão (Kassem, 1998)	(12)

em que:

RX: razão de teor de água, adimensional;

t: tempo de secagem, h;

k, k₀, k₁: constantes de secagem, h⁻¹;

a, b, c, n: coeficientes dos modelos

Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem, realizou-se a análise de regressão não linear, pelo método Gauss-Newton.

Para determinar o grau de ajuste para cada temperatura de secagem considerou-se a significância dos coeficientes de regressão pelo teste t, adotando o nível de 5% de significância, a magnitude do coeficiente de determinação (R²), os valores do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado (SE).

O erro médio relativo e estimado, para cada um dos modelos foram calculados conforme as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (13)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (14)$$

em que,

Y: valor de RX experimental;

\hat{Y} : valor de RX estimado pelo modelo;

N: número de observações experimentais;

GLR: graus de liberdade do modelo (observações menos o número de parâmetros do modelo).

O coeficiente de difusão efetivo para as condições de secagem foi calculado ajustando o modelo baseado na teoria de difusão líquida aos dados experimentais, para a forma geométrica cilíndrica (considerando que a esfericidade dos grãos de sorgo apresenta valor de 78,8%), com aproximação de oito termos, de acordo com a seguinte expressão 15.

$$R X = \frac{X_i^* - X_e^*}{X_i^* - X_e^*} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp \left[- \frac{\lambda_n^2 \cdot D \cdot t}{r} \right] \quad (15)$$

em que,

t: tempo de secagem;

D: coeficiente de difusão efetivo, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;

r: raio equivalente = $1,52 \times 10^{-3} \text{ m}$;

n: número de termos da série.

O raio equivalente é definido como o raio de uma esfera com volume equivalente ao do grão. O volume (V) de cada grão foi obtido por meio da medição dos três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura), em quinze grãos, antes da secagem, com utilizando um paquímetro digital, de acordo com a expressão proposta por Mohsenin (1986):

$$V_g = \frac{\pi \cdot (A \cdot B \cdot C)}{6} \quad (16)$$

em que,

A: maior dimensão do eixo da semente em mm;

B: eixo com dimensão média da semente em mm;

C: menor dimensão do eixo da semente em mm.

A dependência do D com a temperatura foi descrita por meio da equação de Arrhenius:

$$D = D_o \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T_a}\right) \quad (17)$$

em que,

D_o : fator pré-exponencial;

E_a : energia de ativação, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$;

R: constante universal dos gases, $8,134 \text{ kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

T_a : temperatura absoluta, K.

Os coeficientes da expressão de Arrhenius foram linearizados com a aplicação do logaritmo na seguinte forma:

$$\text{Ln}D = \text{Ln}D_o - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T_a} \quad (18)$$

Os dados foram analisados por meio de análise de variância e regressão. Os modelos foram selecionados com base na significância da equação, pelo teste t, no coeficiente de determinação (R^2) e no conhecimento da evolução do fenômeno biológico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, estão representadas as curvas de secagem para as sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem em diferentes condições de ar. Verificou-se que para as temperaturas de 40; 55; 70; 85 e 100 °C os tempos de secagem foram de 3,0; 1,75; 1,42; 1,08 e 0,83 horas, respectivamente, para que as sementes atingissem o teor de água de $0,15 \pm 0,01$ (decimal b.s.).

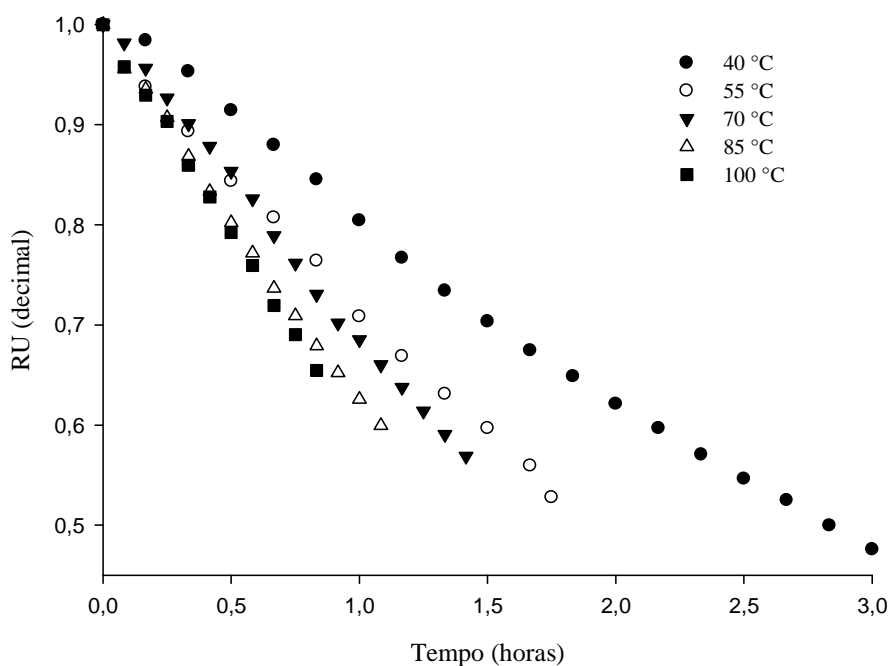


Figura 1. Dados observados da secagem de sementes de sorgo sacarino nas temperaturas de 40; 55; 70; 85 e 100 °C.

Nota-se que, com o aumento da temperatura do ar de secagem, ocorre maior taxa de remoção de água do produto, por causa do maior gradiente de umidade entre a semente e o ar, fazendo com que o tempo necessário para reduzir o teor de água até o valor desejado seja inferior.

Observa-se ainda que o valor de razão de teor de água diminui rapidamente, como consequência do aumento da temperatura. Esse fato também foi observado recentemente por pesquisadores para diversos produtos, como feijão adzuki (Almeida et al., 2009), feijão vermelho (Resende et al., 2008), milho (Oliveira et al., 2012), espiga de milho (Corrêa et al., 2011) e feijão-caupi (Morais et al., 2013).

Na Tabela 2, estão representados os valores dos parâmetros estatísticos analisados para a comparação entre os onze modelos ajustados, durante a secagem das sementes de sorgo sacarino nas diversas condições de secagem.

Tabela 2. Erro médio estimado (SE), relativo (P) e coeficientes de determinação (R^2) para os onze modelos analisados, durante a secagem do sorgo sacarino nas diversas condições de temperatura de ar ($^{\circ}\text{C}$)

Modelo	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)														
	40 $^{\circ}\text{C}$			55 $^{\circ}\text{C}$			70 $^{\circ}\text{C}$			85 $^{\circ}\text{C}$			100 $^{\circ}\text{C}$		
	SE	P	R^2 (%)	SE	P	R^2 (%)	SE	P	R^2 (%)	SE	P	R^2 (%)	SE	P	R^2 (%)
2	0,009	0,854	99,68	0,0058	0,625	99,85	0,0073	0,77	99,76	0,0043	0,33	99,90	0,0044	0,324	99,90
3	0,013	1,142	99,36	0,0062	0,619	99,85	0,0076	0,77	99,76	0,0046	0,34	99,90	0,0131	1,250	99,17
4	0,013	1,142	99,36	0,0072	0,579	99,77	0,0160	1,67	98,83	0,0080	0,78	99,65	0,0124	1,250	99,17
5	0,007	0,687	99,83	0,0064	0,630	99,82	0,0044	0,41	99,91	0,0044	0,23	99,90	0,0060	0,514	99,81
6	0,013	1,142	99,36	0,0069	0,579	99,77	0,0155	1,67	98,83	0,0077	0,78	99,65	0,0118	1,250	99,17
7	0,004	0,430	99,95	0,0053	0,546	99,90	0,0042	0,37	99,93	0,0045	0,28	99,91	0,0047	0,337	99,91
8	0,007	0,567	99,84	0,0055	0,601	99,88	0,0064	0,59	99,83	0,0046	0,34	99,89	0,0045	0,315	99,90
9	0,007	0,506	99,81	0,0071	0,589	99,78	0,0107	0,99	99,48	0,0069	0,65	99,74	0,0108	1,134	99,37
10	0,013	1,142	99,36	0,0072	0,579	99,77	0,0051	0,51	99,88	0,0041	0,28	99,91	0,0048	0,420	99,87
11	0,007	0,563	99,84	0,0061	0,617	99,87	0,0066	0,59	99,83	0,0042	0,26	99,92	0,0049	0,397	99,90
12	0,013	1,142	99,36	0,0062	0,619	99,85	0,0076	0,77	99,76	0,0042	0,24	99,91	0,0046	0,320	99,90

Em relação aos coeficientes de determinação (R^2) observou-se que os modelos matemáticos apresentaram valores superiores a 98,8 %, no qual segundo Madamba et al. (1996) expressa uma representação satisfatória do processo de secagem.

Com relação ao erro médio estimado (SE), todos os modelos apresentaram baixos valores, sendo um parâmetro importante para o bom ajuste dos modelos aos dados experimentais. De acordo com Draper & Smith (1981), a capacidade de um modelo representar adequadamente um determinado processo é inversamente proporcional ao valor do erro médio estimado.

Analisando os valores de erro médio relativo (P), verifica-se que todos os modelos apresentaram magnitudes inferiores a 10% para as temperaturas estudadas, que segundo Mohapatra & Rao (2005), indica adequada representação do fenômeno.

Verifica-se que todos os modelos apresentaram bons ajustes aos dados experimentais. Porém, o modelo de Midilli foi selecionado para representar o fenômeno de secagem das sementes de sorgo sacarino por apresentar os melhores índices para todas as temperaturas analisadas.

Oliveira et al., (2012) ajustando diversos modelos matemáticos à secagem dos grãos de milho nas mesmas temperaturas de secagem (40; 55; 70; 85 e 100 °C), também recomendaram o modelo de Midilli como sendo o mais adequado para a representação do processo de secagem.

Diversos pesquisadores também verificaram a satisfatória representação do modelo de Midilli para representar a secagem de produtos agrícolas, como o nabo forrageiro (Sousa et al., 2011), pimenta cumari (Reis et al., 2011) e para o feijão adjuki (Resende et al., 2010).

Verifica-se na Figura 2, pela correspondência entre os valores experimentais e estimados, que o modelo de Midilli se ajustou de forma satisfatória para descrição da secagem das sementes de sorgo sacarino, nas diferentes condições de secagem.

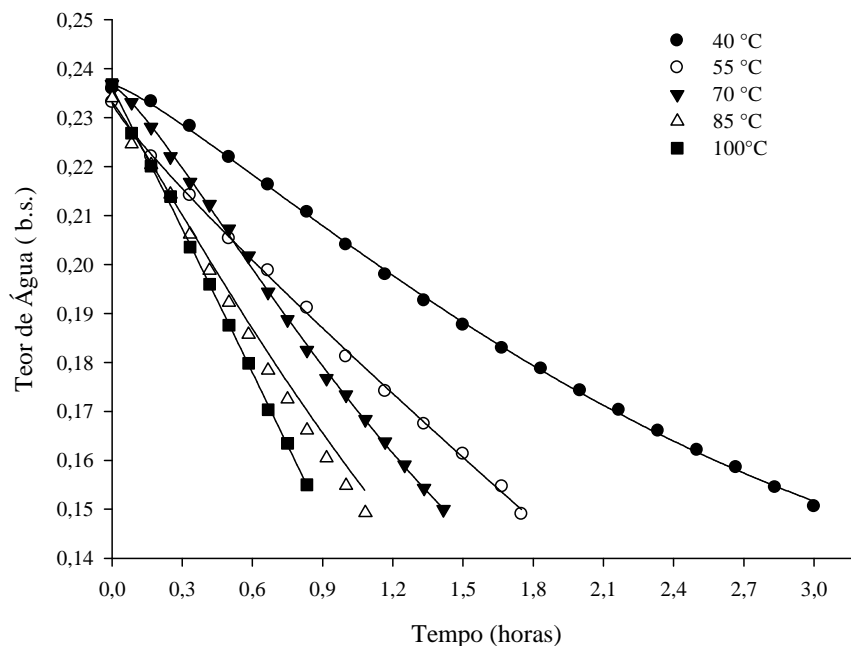


Figura 2. Valores do teor de água experimentais e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem das sementes de sorgo sacarino nas diversas condições de temperatura

Na Tabela 3, são apresentados os coeficientes do modelo de Midilli ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem do sorgo sacarino em diferentes condições de secagem.

Tabela 3. Coeficientes do modelo de Midilli ajustados para a secagem das sementes de sorgo sacarino em diferentes condições de secagem, com os respectivos valores médios

Coeficientes	Temperatura (°C)				
	40	55	70	85	100
A	1,004*	0,999*	0,998*	0,995*	0,997*
K	0,257*	0,109 ^{NS}	0,476*	0,456*	0,014 ^{NS}
N	1,191*	0,751**	1,235*	1,102*	1,731 ^{NS}
B	0,044*	-0,160 ^{NS}	0,056 ^{NS}	-0,005 ^{NS}	-0,455*

*Significativo a 1% pelo teste t; **Significativo a 5% pelo teste t; ^{NS} Não significativo.

Verifica-se que os coeficientes do modelo de Midilli (a, k, n e b) não apresentaram tendência em função da temperatura de secagem.

De acordo com Madamba et al., (1996), a constante de secagem k pode ser utilizada para caracterizar o efeito do ar de secagem e está relacionada com a difusividade efetiva.

Segundo Brooker (1992) o parâmetro “k” representa o efeito das condições externas de secagem enquanto os parâmetros “a”, “b”, “c” e “n” refletem a extensão da resistência interna do produto à secagem, para condições externas.

A Tabela 4 apresenta os valores de coeficientes de difusão efetivo determinados para a secagem das sementes de sorgo sacarino na faixa de temperatura entre 40 e 100 °C.

Tabela 4. Coeficiente de difusão efetivo obtido para a secagem das sementes de sorgo sacarino nas temperaturas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.

Coeficiente de difusão D (m ² .s ⁻¹)	Temperatura (°C)				
	40	55	70	85	100
	0,831x10 ⁻¹¹	1,16x10 ⁻¹¹	1,34x10 ⁻¹¹	1,49x10 ⁻¹¹	1,74x10 ⁻¹¹

Nota-se que o coeficiente de difusão efetivo das sementes de sorgo sacarino apresenta magnitudes de 0,831 x 10⁻¹¹ a 1,74 x 10⁻¹¹ m².s⁻¹ para a faixa de temperatura entre 40 e 100 °C.

Madamba et al., (1996), afirmam que os valores do coeficiente de difusão efetivo encontrados na literatura para a secagem de produtos agrícolas apresentam da ordem de 10⁻⁹ a 10⁻¹¹ m².s⁻¹, estando em conformidade com os dados apresentados nesse trabalho.

Observa-se que com o incremento da temperatura do ar de secagem, o coeficiente de difusão efetivo das sementes de sorgo sacarino aumentou, corroborando com os resultados obtidos por outros pesquisadores para milho (Oliveira et al., 2012), feijão adjuki, (Almeida et al., 2009) e nabo forrageiro (Sousa et al., 2011).

Costa et al., (2011) encontraram valores de coeficiente de difusão para as sementes de crambe de 0,88 x 10⁻¹¹ a 5,85 x 10⁻¹¹ m².s⁻¹, para a faixa de temperatura de 30 a 70 °C, bem próximos aos encontrados para o sorgo sacarino no presente trabalho, enfatizando que a difusividade aumenta assim que a temperatura do ar de secagem também aumenta.

Goneli et al., (2007), encontraram magnitudes variando de 8,33 x 10⁻¹¹ a 41,09 x 10⁻¹¹ m².s⁻¹ para o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de trigo. Já Oliveira et al., (2012) encontraram valores na faixa de 1,54 x 10⁻¹³ a 4,85 x 10⁻¹³ m².s⁻¹, trabalhando com a secagem de grãos de milho na faixa de temperatura de 40 a 100 °C, ambos apresentaram valores menores que o sorgo sacarino, possivelmente pela composição química distinta entre estas espécies.

O coeficiente de difusão efetivo aumentou linearmente com a elevação da temperatura do ar de secagem, em que o modelo foi ajustado satisfatoriamente aos

dados experimentais, apresentando elevado coeficiente de determinação (98,2 %), sendo que a sua influência pode ser descrita por meio da equação de Arrhenius, conforme ilustrado na Figura 3.

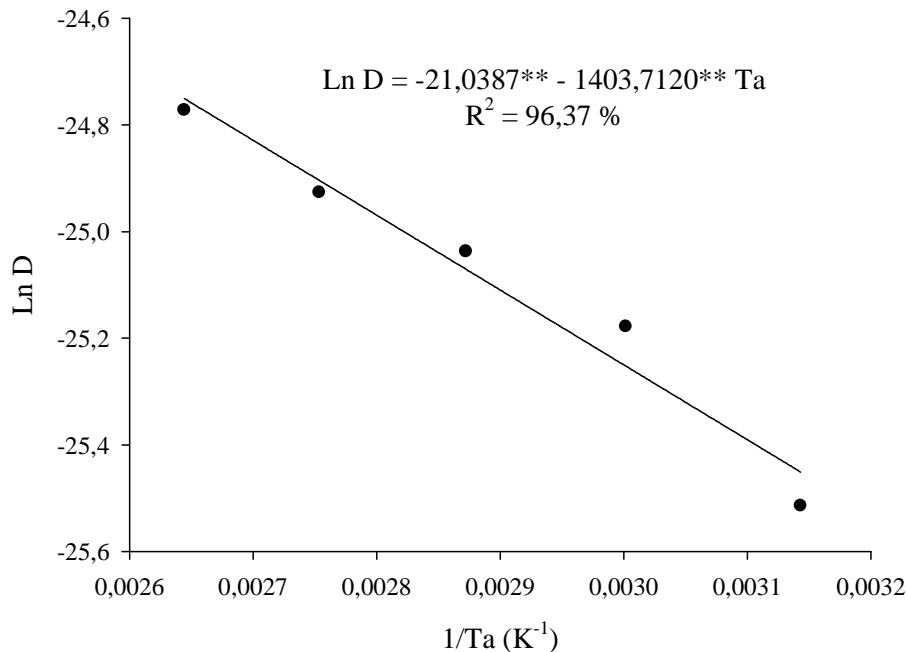


Figura 3. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem, obtido durante a secagem das sementes de sorgo sacarino

A energia de ativação para o processo de secagem das sementes de sorgo sacarino foi de $11,67 \text{ kJ.mol}^{-1}$ para a faixa de temperatura entre 40 e $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Esse valor foi ligeiramente inferior ao que relata Zogzas et al. (1996), na qual a energia de ativação para os produtos agrícolas varia entre $12,7$ a 110 kJ.mol^{-1} .

De acordo com Kashaninejad et al., (2007), a energia de ativação é quantidade mínima de energia necessária para que possa ocorrer o processo de difusão.

Corrêa et al., (2007) obtiveram energia de ativação de $10,08 \text{ kJ.mol}^{-1}$, para o processo de secagem do feijão vermelho em camadas delgadas, os autores atribuíram esse valor devido ao elevado teor de água inicial das sementes. Almeida et al. (2009), trabalhando com o feijão adzuki, obtiveram valores na ordem de $31,16 \text{ kJ.mol}^{-1}$, já Corrêa et al., (2011) estudando secagem de milho em espiga verificaram que a energia de ativação foi de $17,64 \text{ kJ.mol}^{-1}$.

Oliveira et al., (2012) constaram que a energia de ativação para a secagem dos grãos de milho foi de $19,05 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ao contrário de Faria et al. (2012), que obtiveram energia

de ativação de apenas de $4,97 \text{ kJ.mol}^{-1}$, trabalhando com frutos de crambe. Essa diferença pode ser explicada pela composição química diferenciada entre esses produtos, sendo amiláceos e oleaginosos.

CONCLUSÕES

1. Os onze modelos analisados representam adequadamente as curvas de secagem das sementes de sorgo sacarino, sendo o modelo de Midilli o que melhor descreve o fenômeno.

2. O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem, podendo ser descrito pela equação de Arrhenius, no qual se verifica a energia de ativação de $11,67 \text{ kJ.mol}^{-1}$.

AGRADECIMENTOS

A CAPES, pela bolsa de estudos e ao CNPq, FAPEG e IF Goiano – Câmpus Rio Verde pelo auxílio financeiro e disponibilidade de infraestrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afonso Júnior, P. C.; Corrêa, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 03, n. 03, p. 349-353, 1999.
- Almeida, D. P.; Resende, O.; Costa, L.M.; Mendes, U.C.; Sales, J.F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). *Global Science and Technology*, v. 2, n. 1, p. 72-83, 2009.
- Brasil, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. Regras para análise de sementes. Brasília, 2009. 398 p.
- Brooker, D. B.; Bakker-Arkema, F. W.; Hall, C. W. *Drying and storage of grains and oilseeds*. New York: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.
- Costa, L. M.; Resende, O.; Sousa, K. A.; Gonçalves, D. N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 15, n. 10, p. 1089-1096, 2011.
- Corrêa, P.C.; Ribeiro, D.M.; Resende, O.; Botelho, F. M. Determinação E modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo durante a secagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.10, n.3, p.665-670, 2006.

- Corrêa, P. C.; Resende, O.; Martinazzo A. P.; Goneli, A. L. G.; Botelho, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. Engenharia Agrícola, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.
- Corrêa, P. C.; Botelho, F. M.; Oliveira, G. H. H.; Goneli, A. L. G.; Resende, O.; Campos, S. C. Mathematical modeling of the drying process of corn ears. Acta Scientiarum. Agronomy, Maringá, v. 33, n. 4, p. 575-581, 2011.
- Draper, N. R.; Smith, H. Applied regression analysis, 3^a ed., New York: John Wiley and Sons, 1998. 712p.
- Faria, R.Q.; Teixeira, I.R.; Devilla, I.A.; Ascheri, D.P.R.; Resende, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.16, n.5, p.573–583, 2012.
- Goneli, A.L.D.; Correa, P.C.; Resende, O.; Reis Neto, S.A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.27, n.1, p.135 - 140, 2007.
- Henderson, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. Transactions of the ASAE, v. 17, p. 1167-1168, 1974.
- Henderson, S. M.; Pabis, S. Grain drying theory: temperature effect on drying coefficient. Journal of Agricultural Engineering Research, v. 06, p. 169-174, 1961.
- Kashaninejad, M.; Mortazavi, A.; Safekordi, A.; Tabil, L. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. Journal of Food Engineering, v.78, n.1, p.98-108, 2007.
- Kassem, A. S. Comparative studies on thin layer drying models for wheat. In: International Congress On Agricultural Engineering, 13th., 1998, Morocco. [Holdings]. Morocco: [s. n.], 1998. v. 06.
- Lewis, W. K. The drying of solid materials. The Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 13, n. 05, p. 427-433, 1921.
- Martinazzo, A. P.; Corrêa, P. C.; Resende, O.; Melo, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007.
- Madamba, P.S.; Driscoll, R.H.; Buckle, K.A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. Journal of Food Engineering, v.29, n.1, p.75-97, 1996.
- Midilli, A.; Kucuk, H.; Yapar, Z. A New model for single layer drying. Drying Technology, v. 20, n. 07, p. 1503-1513, 2002.

- Mohapatra, D.; Rao, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.
- Mohsenin, N. N. *Physical properties of plant and animal materials*. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986.
- Morais, S. J. S.; Devilla, I.A.; Ferreira, D. A.; Teixeira, I. R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). *Revista Ciência Agronômica* [online]. v. 44, n.3, p. 455-463, 2013.
- Oliveira, R.A.; Oliveira, W.P.; Park, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 181-189, 2006.
- Oliveira, D.E.C.; Resende, O.; Smaniotto, T.A.S.; Campos, R.C.; Chaves, T.H. Cinética de secagem dos grãos de milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.11, n.2, p. 190-201, 2012.
- Page, G. E. *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. West Lafayette: Purdue University, 1949.
- Reis, R.C.; Barbosa L.S.; Lima, M. de L.; Reis, J. de S.; Devilla, I.A.; Ascheri, D.P.R. Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.4, p.347-353, 2011.
- Resende, O.; Corrêa, P.C.; Goneli, A. L. D.; Botelho, F. M.; Rodrigues, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v. 10, n. 1, p.17-26, 2008.
- Resende, O.; Arcanjo, R. V.; Siqueira, V. C.; Rodrigues, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.31, n.2, p.189-196, 2009.
- Resende, O., Ferreira, L.U.; Almeida, D.P. Modelagem matemática para descrição da cinética de Secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.12, n.2, p.171-178, 2010.
- Sharaf-Eldeen, Y. I.; Blaisdell, J. L.; Hamdy, M. Y. A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, v.23, n.5, p.1261-1265, 1980.
- Sharma, G. P; Prasad, S. Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying. *Journal of Food Engineering*, v. 65, n. 04, p. 609-617, 2004.

- Sousa, K. A.; Resende, O.; Chaves, T. H.; Costa, L. M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.
- Thompson, T. L.; Peart, R. M.; Foster, G. H. Mathematical simulation of corn drying: a new model. Transactions of ASAE, v. 11, n. 04, p. 582-586, 1968.
- Ullmann, R.; Resende, O.; Sales, J.F.; Chaves, T.H. Qualidade das sementes de pinhão manso submetidas à secagem em diferentes condições de ar. Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, CE, v. 41, n. 3, p. 442-447, jul-set, 2010.
- Verma, L.R.; Bucklin, R.A.; Endan, J.B.; Wratten, F.T. Effects of drying air parameters on rice drying models. Transactions of the ASAE, v. 28, n.1, p. 296-301, 1985.
- Yagcioglu, A.; Degirmencioglu, A.; Cagatay, F. Drying characteristics of laurel leaves under different conditions. *In: International Congress On Agricultural Mechanization And Energy, 7th., 1999, Adana. Proceedings. Adana: Cukurova University, 1999. p. 565-569.*
- Wang, C. Y.; Singh, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. Transaction of ASAE, v. 11, n.29, p. 668-672, 1978.
- Zogzas, N. P.; Maroulis, Z. B.; Marinoukouris, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. Drying Technology, New York, v.14, n. 10, p. 2225-2253, 1996.

CAPÍTULO III

Qualidade fisiológica de sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem em diferentes condições de ar

Resumo: Objetivou-se no presente trabalho analisar a qualidade fisiológica de sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem em diferentes condições de ar. A secagem foi realizada mantendo as temperaturas controladas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C e umidades relativas de 28,4; 18,6; 12,2; 7,3; e 3,1%, respectivamente. As sementes foram levadas, depois da secagem, para a realização das análises de condutividade elétrica, porcentagem de germinação, primeira contagem da germinação, índice de velocidade de germinação (IVG), porcentagem de emergência, primeira contagem da emergência e índice de velocidade de emergência (IVE). Constatou-se que o aumento da temperatura do ar de secagem promove maior danificação nas sementes pelo aumento da condutividade elétrica da solução. A porcentagem de germinação, primeira contagem da germinação, IVG, porcentagem de emergência, primeira contagem da emergência e o IVE tiveram seus valores reduzidos pelo incremento de temperatura. Conclui-se que a qualidade fisiológica das sementes de sorgo sacarino é afetada pela temperatura do ar de secagem, e que as temperaturas mais elevadas promovem maiores danos às sementes, podendo ser realizada a secagem até a temperatura do ar de 55 °C.

Palavras-chave: danificação, germinação, vigor.

Quality physiologic of seeds saccharine sorghum submitted to different drying air conditions

Abstract: The objective of this work was to analyze the physiological seed quality of sorghum dried in different conditions of air. Drying was carried out while maintaining the controlled 40, 55, 70, 85 and 100 °C, and relative humidities temperatures of 28.4, 18.6, 12.2, 7.3, and 3.1%, respectively. The seeds were taken after drying, for analyzes of electrical conductivity, germination, first count of germination, germination speed index (GSI), percentage of emergence, first count of the emergence and the emergence rate (IVE). It was found that increasing the temperature of the drying air promotes greater damage on the seeds by increasing the electrical conductivity of the solution. The percentage of germination, first count of germination, IVG, emergence percentage, first count of emergency and SGI had their prices reduced by increasing temperature. It is concluded that the seed quality of sweet sorghum is affected by drying air temperature, and that higher temperatures promote greater damage to the seed, drying can be performed until the air temperature of 55 °C.

Key-words: Damage, germination, vigor

INTRODUÇÃO

De acordo com Lopes et al., (2002) o aumento de produção e da área plantada são obtidos em função da tecnologia utilizada e, em especial, ao uso de sementes de alta qualidade que é indispensável para o sucesso de qualquer lavoura, tanto para a produção de grãos ou de sementes.

Diversos fatores interferem na viabilidade das sementes, tanto do ponto de vista morfológico, quanto fisiológico, destacando-se, dentre eles, as condições predominantes durante a produção, colheita, manuseio, secagem e armazenamento.

É imprescindível, para garantir a qualidade e sua conservação, que os grãos sejam transportados e armazenados em locais secos e ventilados e, sobretudo, com baixos teores de água; do contrário, o desenvolvimento de microrganismos podem inviabilizar a utilização do produto para consumo humano e animal (Corrêa et al., 2006).

Dentre as etapas de pós-colheita, a secagem, se conduzida inadequadamente, tem papel significativo nas perdas da qualidade de grãos (Faroni et al., 2006).

A utilização do ar de secagem com altas temperaturas e baixa umidade relativa pode provocar fissuras e trincas no tegumento das sementes, e seu uso deve ser controlado, evitando assim, possíveis danos físico-químicos e biológicos às sementes (Elias, 2002).

As sementes com teor de água elevado apresentam altas taxas de atividade respiratória, ocasionando o consumo antecipado de reservas, provocando desgaste fisiológico, ocasionando baixos índices de germinação e vigor.

Segundo Silva et al., (2008), a remoção do teor de água deve ser realizada de modo a preservar a aparência, a qualidade nutritiva e, no caso de sementes, a viabilidade e o vigor.

Para a análise da qualidade das sementes, há a necessidade de se complementar as informações do teste de germinação utilizando avaliações de vigor, as quais possibilitam selecionar os melhores lotes para a comercialização (Dias et al., 2006).

Sendo assim, pela necessidade de atender ao aumento da produção, e a preocupação em assegurar a qualidade do produto durante os processos pós-colheita, pesquisas sobre diferentes métodos de secagem e sua influência na qualidade final se tornam cada dia, mais relevantes.

Na literatura existe carência de informações a respeito das alterações fisiológicas que podem ocorrer nas sementes de sorgo sacarino devido a secagem. Assim, objetivou-se no presente trabalho analisar a qualidade fisiológica das sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem em diferentes condições de ar.

METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido nos Laboratórios de Pós-Colheita de Produtos Vegetais, e no Laboratório de Sementes do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano - Câmpus Rio Verde), situados no município de Rio Verde, GO.

As sementes de sorgo sacarino foram colhidas, manualmente, depois de atingido a maturidade fisiológica, com teor de água de aproximadamente 23% (b.s.). Posteriormente, foram encaminhadas para o processo de secagem em estufa com circulação forçada de ar, mantendo as temperaturas controladas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C umidades relativas de 28,4; 18,6; 12,2; e 7,3; e 3,1%, respectivamente.

As sementes foram secas em bandejas contendo 0,3 kg de produto, perfazendo uma camada de 3 cm de espessura, em quatro repetições, totalizando 1,2 kg de produto para

cada tratamento. As bandejas foram pesadas periodicamente, até o ponto final da secagem de $15 \pm 1\%$ (b.s.).

Os teores de água das sementes de sorgo sacarino foram determinados por gravimetria, utilizando a estufa a 105 ± 1 °C, durante 24 horas, em três repetições segundo Brasil (2009). A temperatura e a umidade relativa do ar de secagem foram monitoradas por meio de um psicrômetro instalado no interior da estufa.

Após o processo de secagem, para a avaliação dos danos mecânicos e da qualidade fisiológica as sementes foram submetidas às análises de condutividade elétrica, porcentagem de germinação, índice de velocidade de germinação (IVG), porcentagem de emergência e índice de velocidade de emergência (IVE).

A condutividade elétrica da solução contendo as sementes de sorgo sacarino foi realizada utilizando o “Sistema de Copo” ou “Condutividade de Massa”.

Os testes foram realizados em quatro repetições, com 50 sementes para cada tratamento. As sementes foram pesadas em balança com resolução de 0,01 gramas e colocados em copos de plástico de 200 mL, aos quais foram adicionados 75 mL de água deionizada. Em seguida, os copos foram colocados em uma câmara climática do tipo B.O.D., em temperatura programada de 25 ± 2 °C, durante 24 horas.

Imediatamente após este período, os copos foram retirados da câmara para medições da condutividade elétrica da solução que contêm as sementes. O valor da condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) fornecido pelo aparelho será dividido pela massa das sementes (g), obtendo valor expresso em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\text{ g}^{-1}$ (Vieira et al., 1999).

O teste de germinação foi conduzido com quatro subamostras de 50 sementes de cada tratamento, em rolos de papel toalha da marca “Germitest”, em germinador da marca “Mangesdorf”, regulado para manter a temperatura constante de 25 ± 2 °C. A quantidade de água adicionada foi equivalente a 2,5 vezes a massa do substrato seco, visando ao umedecimento adequado e, conseqüentemente, à uniformização do teste.

As interpretações foram efetuadas a partir do 4º dia após a semeadura até o 10º dia, segundo os critérios estabelecidos nas Regras para Análise de Sementes, Brasil (2009), onde foram avaliados:

- Porcentagem de germinação (% GE) - conduzida conjuntamente com o teste de germinação, computando ao 10º DAS o número total de sementes germinadas (normais e anormais); o resultado foi expresso em %.

- Índice de velocidade de germinação - conduzido conjuntamente com o teste de germinação, em que: $(IVG = n1.d1^{-1} + n2.d2^{-1} + n3.d3^{-1} \dots nn.dn^{-1})$; sendo n1= sementes germinadas no primeiro dia da contagem; n2= sementes germinadas no segundo dia da contagem; n3= sementes germinadas no terceiro dia da contagem; nn= sementes germinadas no enésimo dia da contagem; d1= primeiro dia, d2= segundo dia; d3= terceiro dia, dn= enésimo dia) conforme Maguire (1962).

- Primeira contagem da germinação (% PCG) - conduzida juntamente com o teste de germinação, sendo a primeira contagem realizada no 4º dia após a instalação do teste.

A avaliação de emergência foi conduzida com quatro repetições de 50 sementes de cada tratamento, as quais foram semeadas em canteiro de areia em casa de vegetação com nebulização intermitente três vezes ao dia, contendo como substrato areia grossa, a uma profundidade de 2 cm, conforme Nakagawa (1999).

Na emergência, foram consideradas emergidas as plântulas que começaram a apresentar os coleóptilos acima do substrato, com contagem a partir do 4º e fim ao 10º dia após a semeadura (DAS) onde foram avaliados:

- Porcentagem de emergência (% EM) - conduzida conjuntamente com o teste de emergência, computando ao 10º DAS o número total de plantas jovens emergidas (normais e anormais); o resultado foi expresso em %.

- Índice de velocidade de emergência (IVE) - A velocidade de emergência foi determinada anotando diariamente o número de plântulas emergidas com os coleóptilos acima do substrato, até a completa estabilização do estande, em que: $(IVE = n1.d1^{-1} + n2.d2^{-1} + n3.d3^{-1} \dots nn.dn^{-1})$; sendo n1= sementes emergidas no primeiro dia da contagem; n2= sementes emergidas no segundo dia da contagem; n3= sementes emergidas no terceiro dia da contagem; nn= sementes emergidas no enésimo dia da contagem; d1= primeiro dia, d2= segundo dia; d3= terceiro dia, dn= enésimo dia) conforme Maguire (1962).

- A primeira contagem da emergência (% PCE) - conduzida juntamente com o teste de emergência, sendo a primeira contagem realizada no 4º dia após a instalação do teste.

Os dados foram analisados por meio de análise de variância e regressão linear. Os modelos foram selecionados com base na significância da equação, no coeficiente de determinação (R^2) e no conhecimento da evolução do fenômeno biológico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, encontra-se o resumo da análise de variância para as variáveis: condutividade elétrica (CE), germinação (GE), índice de velocidade de germinação (IVG), primeira contagem da germinação (PCG), emergência (EM), índice de velocidade de emergência (IVE) e da primeira contagem da emergência (PCE) após a secagem do sorgo sacarino em diferentes condições de ar.

Nota-se que todas as variáveis estudadas apresentaram diferença a 1% de significância pelo teste F, e segundo Pimentel Gomes (2000), também apresentaram um baixo coeficiente de variação.

Tabela 1. Resumo da análise de variância para a condutividade elétrica (CE), germinação (GE), IVG, primeira contagem da germinação (PCG), emergência (EM), IVE e da primeira contagem da emergência (PCE) após a secagem do sorgo sacarino em diferentes condições de ar

Variáveis analisadas	Graus de liberdade	Quadrados médios	CV (%)
CE	4	985,0698**	4,13
% GE	4	771,0625**	2,95
IVG	4	191,8692**	2,95
% PCG	4	753,9187**	3,01
% EM	4	704,7625**	3,39
IVE	4	244,6285**	3,69
% PCE	4	999,5125**	4,66

** Significativo a 1% pelo teste F.

Na Figura 1, são apresentados os valores da condutividade elétrica da solução dos exudados das sementes de sorgo sacarino secadas em diferentes temperaturas do ar de secagem para o sorgo sacarino.

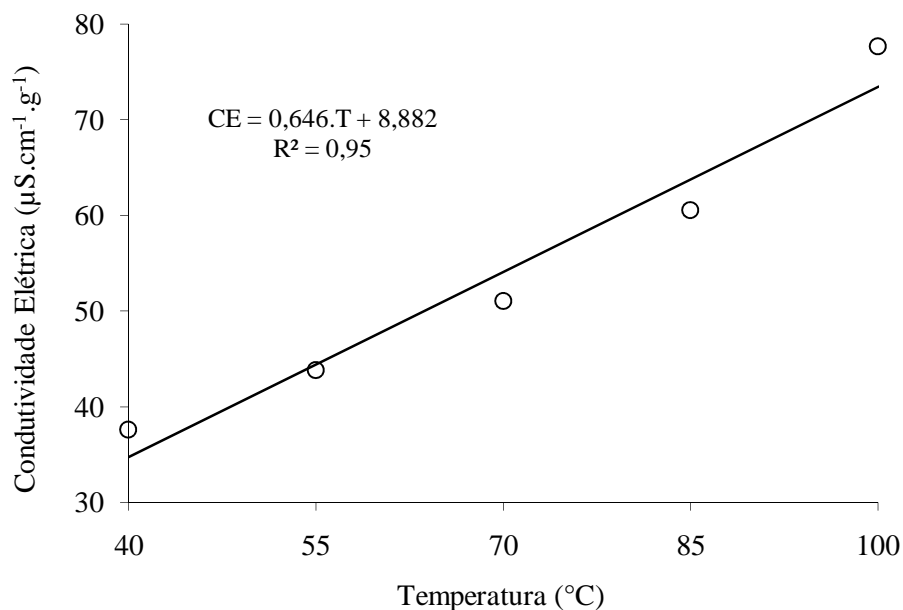


Figura 1. Condutividade elétrica (CE) da solução dos exudados das sementes de sorgo sacarino após a secagem nas temperaturas (T) de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.

Os valores médios do teste de condutividade elétrica foram de 37; 43; 51; 60 e 77 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente, para as temperaturas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.

Verificou-se que houve um aumento exponencial da condutividade elétrica com a elevação da temperatura do ar de secagem, cujos efeitos foram mais acentuados nas temperaturas mais altas, sendo que a temperatura de 100 °C apresentou o dobro de lixiviação eletrolítica que a temperatura de 40 °C. Nota-se que houve um aumento médio na condutividade elétrica de $0,645 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ para cada 1 °C de incremento na temperatura de secagem.

O aumento da condutividade elétrica expressa a desorganização das membranas das células das sementes, tornando-as mais suscetível.

Resende et al., (2012) e Almeida et al., (2013) também observaram aumento na condutividade elétrica com o incremento da temperatura do ar de secagem para o feijão adzuki.

Na Figura 2, estão apresentados os valores da porcentagem de germinação e da primeira contagem da germinação para as sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem em diferentes condições de ar.

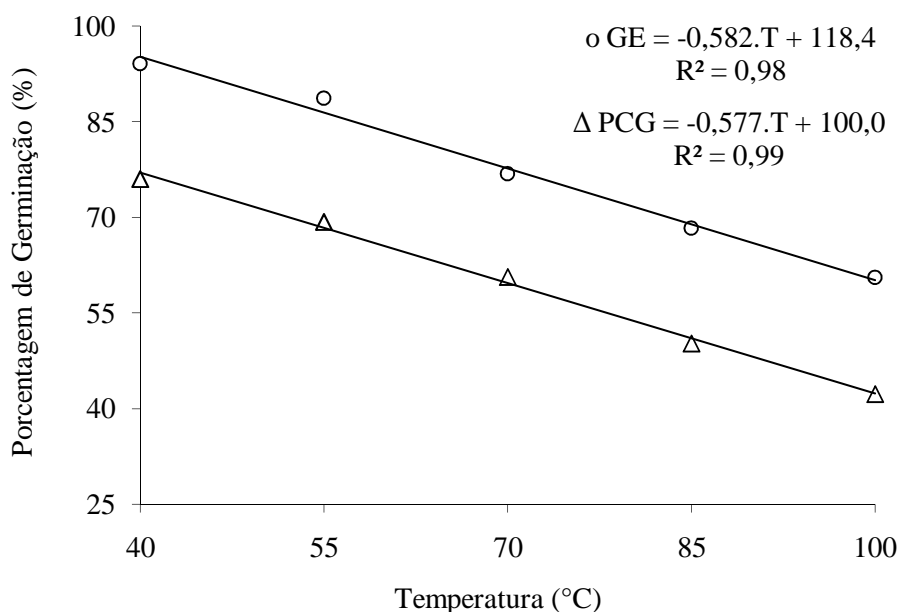


Figura 2. Porcentagem de germinação (GE), e primeira contagem da germinação (PCG) das sementes de sorgo sacarino após a secagem nas temperaturas (T) de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.

Verifica-se que as porcentagens médias de germinação do sorgo sacarino foram de 94, 88, 77, 68 e 61% e para a primeira contagem, observam-se os valores de 76, 69, 61, 50 e 42%, para as temperaturas do ar de secagem de 40, 55, 70, 85 e 100 °C, respectivamente.

Observou-se que houve a redução de 0,582% e de 0,577% na porcentagem de germinação e na primeira contagem respectivamente, para cada incremento de 1 °C na temperatura de secagem.

Notou-se um decréscimo linear na porcentagem de germinação com o aumento da temperatura, podendo afirmar que temperaturas mais elevadas de secagem comprometem a qualidade fisiológica das sementes, evidenciado maiores danos ocasionados nas membranas das células das sementes nessas condições.

Visto que temperaturas de secagem elevadas não são recomendadas para sementes, notou-se que mesmo nas temperaturas mais elevadas, as sementes apresentaram significativos valores de porcentagem de germinação, isso se explica pelo pouco tempo de secagem em que as mesmas ficaram submetidas, que não foi suficiente para comprometer seu poder germinativo.

Esses dados corroboram com os obtidos por Menezes et al., (2012 a), que constataram que o aumento na temperatura do ar de secagem reduziu a germinação de sementes de arroz.

Almeida et al., (2013) e Resende et al., (2012) também notaram a diminuição da porcentagem de germinação assim que se elevou a temperatura do ar de secagem para as sementes de feijão azuki.

Oliveira et al., (2011), constataram que para sementes de sorgo da cultivar BR 305, o maior valor de germinação ocorreu com sementes secas sob temperatura de 45 °C, quando estudaram a secagem à sombra e em protótipos de secadores estacionários, regulados a temperatura de 35°, 45° e temperaturas alternadas de 35/45 °C.

O aumento na temperatura de secagem resulta no aumento da porcentagem de sementes com fissuras, que, associado a outros efeitos influenciados pela secagem, afeta negativamente, a germinação (Menezes et al., 2012 b).

Ressalta-se ainda que, para este trabalho e visando não comprometer o limite mínimo de germinação para comercialização de sementes de sorgo que é de 80% (Brasil, 2005), a secagem não deve exceder os 55 °C de temperatura do ar.

Na Figura 3, estão ilustrados os valores da porcentagem de emergência e da primeira contagem da emergência para as sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem em diferentes condições de ar.

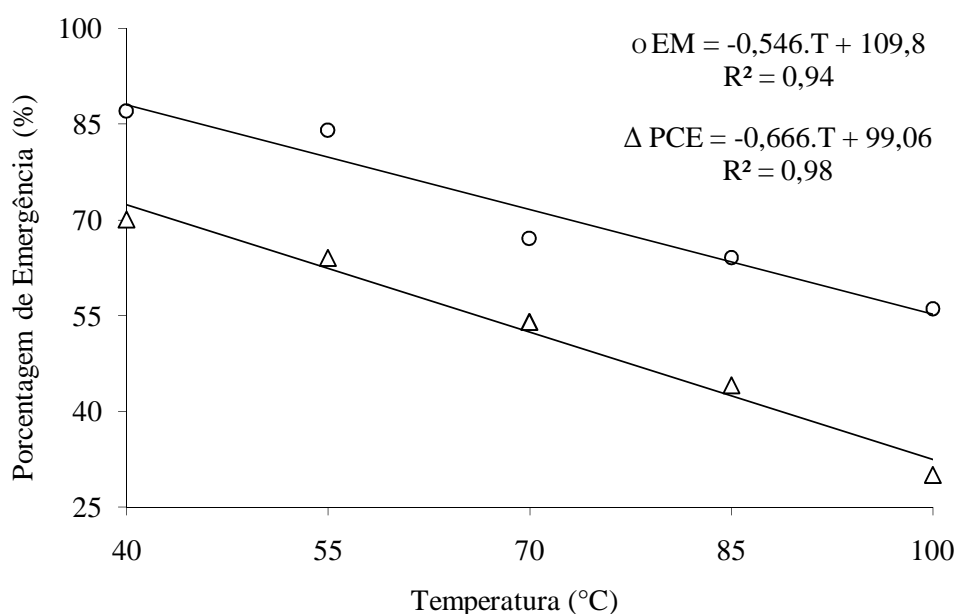


Figura 3. Porcentagem de emergência (EM), e primeira contagem da emergência (PCE) das sementes de sorgo sacarino após a secagem nas temperaturas (T) de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.

Nota-se que as porcentagens médias de emergência das sementes de sorgo sacarino foram de 87, 84, 67, 64 e 56% e para a primeira contagem, verificou-se valores de 70, 64, 54, 44 e 30% de sementes emergidas, para as temperaturas do ar de secagem de 40, 55, 70, 85 e 100 °C, respectivamente.

Observou-se a redução de 0,544% na porcentagem de emergência e de 0,660% para a primeira contagem, para cada unidade de aumento na temperatura de secagem.

Constatou-se um decréscimo linear na porcentagem de emergência em ambas variáveis analisadas (EM e PCE) com o aumento da temperatura, demonstrando que o aumento da temperatura foi prejudicial as sementes.

Essa tendência foi similar ao da germinação, que também apresentou um decréscimo gradativo com a elevação da temperatura, evidenciando um comprometimento desses parâmetros qualitativos.

Nas Figuras 4 e 5, estão apresentados os valores do IVG e IVE respectivamente, para as sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem em diferentes condições de ar.

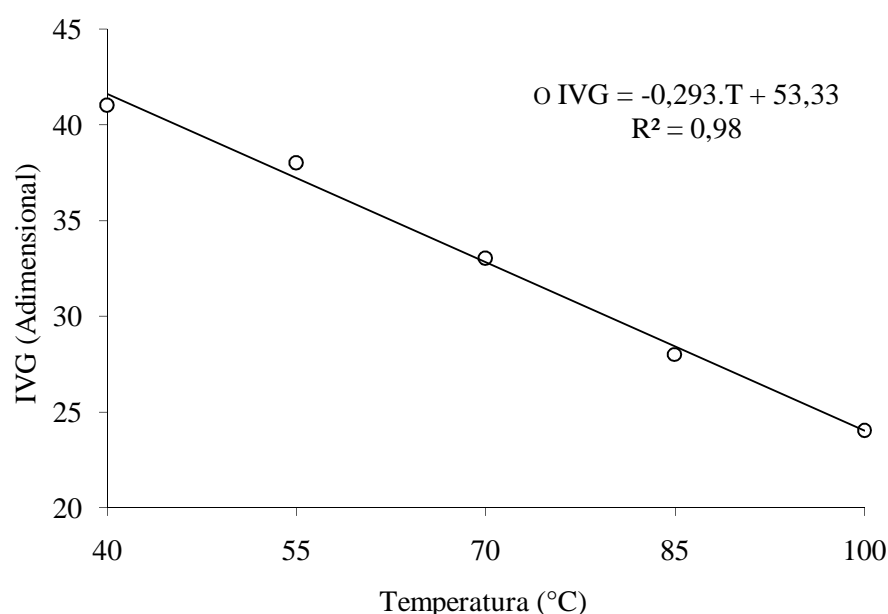


Figura 4. Índice de velocidade de germinação (IVG) das sementes de sorgo sacarino após a secagem nas temperaturas (T) de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.

O IVG apresentou magnitudes de 41, 38, 33, 28 e 24 para as temperaturas do ar de secagem de 40, 55, 70, 85 e 100 °C, respectivamente. Desta maneira, a velocidade de germinação reduziu com a elevação da temperatura, evidenciando que o incremento de temperatura promoveu maior danificação nas membranas celulares das sementes,

comprometendo sua qualidade fisiológica, na qual teve redução de 0,291 para cada 1°C de incremento de temperatura.

Esses dados corroboram com os obtidos por Almeida et al., (2013) que trabalhando com o feijão adzuki observaram a diminuição do IVG com a elevação da temperatura do ar de secagem, apresentando menores magnitudes para as temperaturas mais elevadas.

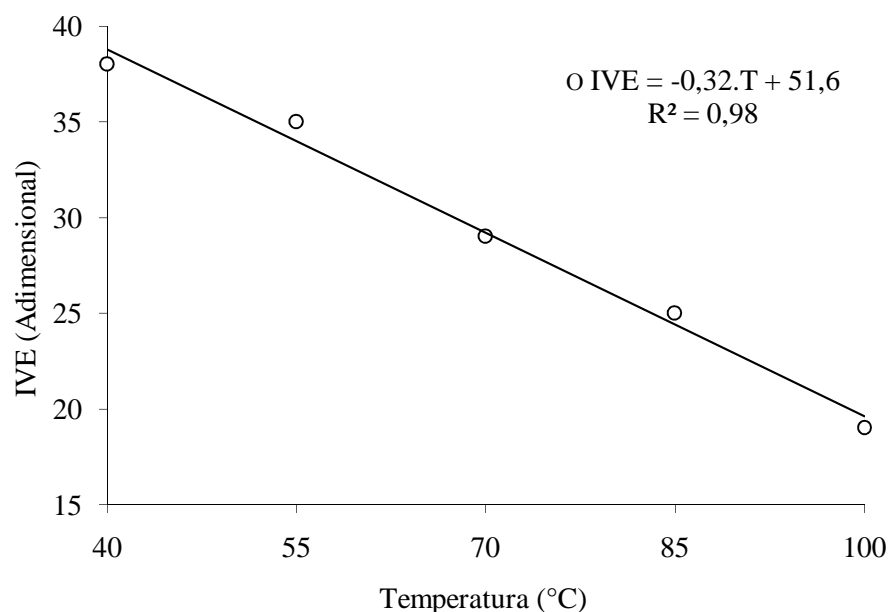


Figura 5. Índice de velocidade de emergência (IVE) das sementes de sorgo sacarino após a secagem nas temperaturas (T) de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.

O IVE apresentou valores de 38, 35, 29, 25 e 19 para as temperaturas do ar de secagem de 40, 55, 70, 85 e 100 °C, respectivamente. Desta forma, o comportamento da velocidade da emergência foi linearmente reduzido, evidenciando um comprometimento da qualidade fisiológica e do vigor das sementes.

O comportamento do IVE foi similar ao do IVG, que também apresentou um decréscimo gradativo assim que se elevou a temperatura, evidenciando um decréscimo de 0,327 para cada 1° C de aumento na temperatura de secagem.

De modo geral, a variação da condutividade elétrica, a germinação, emergência, IVG e o IVE nas sementes de sorgo sacarino em função da temperatura do ar de secagem pode ser representado adequadamente por modelos lineares, que apresentaram valores satisfatórios para os coeficientes de determinação, sendo sempre superiores a 94%, além de ser significativos pelo teste “F” a 1% de probabilidade.

CONCLUSÕES

1. A qualidade fisiológica das sementes de sorgo sacarino é afetada pelo aumento da temperatura do ar de secagem.
2. O aumento da temperatura do ar de secagem promove estresse hídrico e térmico e a diminuição dos valores de germinação, emergência e vigor.
3. Para não comprometer a qualidade fisiológica das sementes recomenda-se que a temperatura do ar de secagem seja inferior a 55 °C.

AGRADECIMENTOS

A CAPES, pela bolsa de estudos e ao CNPq, FAPEG e IF Goiano – Câmpus Rio Verde pela ajuda financeira e disponibilidade de infraestrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, D. P.; Resende, O.; Mendes, U. C.; Costa, L. M.; Rocha, A. C. Influência da secagem na qualidade fisiológica do feijão adzuki. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v.8, n.2, p.311-315, 2013.
- Brasil, Instrução Normativa nº25, de 20 de dezembro de 2005. Publicado na seção 1 do DOU nº 243. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo*, DF, 2005.
- Brasil, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. Regras para análise de sementes. Brasília, DF, 2009, 398 p.
- Corrêa, P.C.; Júnior, P. C. A.; Ribeiro, D. M.; Silva, F.S. Equilíbrio higroscópico de milho, alpiste e painço: Obtenção e modelagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.10, n.1, p.162–167, 2006.
- Dias, D. C. F. S.; Bhering, M. C.; Tokuhisa, D.; Hilst, P.C. Teste de condutividade elétrica para avaliação do vigor de sementes de cebola. *Revista Brasileira de Sementes*, Brasília, DF, v.28, n.1, p.154-162, 2006.
- Elias, M.C. Armazenamento e conservação de grãos em médias e pequenas escalas. Pelotas, 2002. Pólo de Inovação Tecnológica em Alimentos da Região Sul. UFPEL-FAEM-DCTA, 2002. 218 p.
- Faroni, L.A. et al. Influência do conteúdo de umidade de colheita e temperatura de secagem na qualidade do feijão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.1, p.148–154, 2006.

- Lopes, J.C.; Martins Filho, S.; Tagliaferri, C.; Rangel, O.J.P. Avaliação da qualidade fisiológica de sementes de soja produzidas em Alegre-ES. *Revista Brasileira de Sementes*, Londrina, v.24, n.1, p.51-58, 2002.
- Maguire, J.D. Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, Madison, v.2, n.2, p.176-177, 1962.
- Menezes, N. L.; Pasqualli, L. L.; Barbieri, A. P. P.; Vidal, M. D.; Conceição, G. M. Temperaturas de secagem na integridade física, qualidade fisiológica e composição química de sementes de arroz. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 42, n. 4, p. 430-436, out./dez. 2012 a.
- Menezes, N.L.; Cicero, S.M.; Villela, F.A.; Bortolotto, R.P. Using X-Rays to evaluate fissures in rice seeds dried artificially. *Revista Brasileira de Sementes*, Londrina, v. 34, n. 1, p. 70-77, 2012 b.
- Nakagawa, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. In: Krzyzanowski, F.C.; Vieira, R.D.; França-Neto, J.B. *Vigor de sementes: conceitos e testes*. Londrina, PR: Abrates, 1999, p.21-24.
- Nakagawa, J. Testes de vigor baseados na avaliação das plântulas. In: *Testes de vigor em sementes* (R.D. Vieira & N.M. Carvalho, eds.). FUNEP: Jaboticabal, p. 44-85, 1994.
- Oliveira, J. A.; Silva, T. T. A.; Pinho, E V. R. V.; Abreu, L. A. S. Secagem e armazenamento de sementes de sorgo com alto e baixo teor de tanino, *Revista Brasileira de Sementes*, Londrina, v.. 33, n. 4, p. 699-710, 2011.
- Pimentel Gomes, F. *Curso de estatística experimental*. 14. ed. Piracicaba: Nobel, 2000. 477 p.
- Resende, O.; Almeida, D.P.; Costa, L. M.; Mendes, U. C.; Sales, J.F. Adzuki beans (*Vigna angularis*) seed quality under several drying conditions. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* [online], Campinas, v.32, n.1, p. 151-155, 2012.
- Silva, J. S.; Afonso, A.D.L.; Donzelles, S.M.L. *Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas*, Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. Capítulo 5, 559 p.
- Vieira, R.D.; Krzyzanowski, F.C. Teste de condutividade elétrica. In: Krzyzanowski, F.C.; Vieira, R.D.; França Neto, J.B. (Eds.). *Vigor de sementes: conceitos e testes*, Londrina, PR: Abrates, 1999. Cap. 4, p.1-26.

CONCLUSÃO GERAL

Nas condições em que foi realizado o trabalho foi possível concluir que:

O teor de água de equilíbrio diminui assim que ocorre o aumento da temperatura, para uma mesma atividade de água.

As isotermas de dessecção obtidas para as sementes de sorgo sacarino possuem formato sigmoidal, padrão para o equilíbrio higroscópico de produtos agrícolas amiláceos.

O modelo de Chung-pfost é o que melhor representa a higroscopicidade das sementes de sorgo sacarino.

O calor isostérico integral de dessecção das sementes de sorgo sacarino varia de 3.136,54 a 2.493,33 kJ.kg⁻¹, para a faixa de teor de água de 7,9 a 28,0 (% b.s.).

Entre os onze modelos analisados, o modelo de Midilli é o que melhor se ajusta para descrever as curvas de secagem das sementes de sorgo sacarino.

O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem, podendo ser descrito pela equação de Arrhenius, no qual se verifica a energia de ativação de 11,67 kJ.mol⁻¹.

A qualidade fisiológica das sementes de sorgo sacarino é afetada pelo aumento da temperatura do ar de secagem, sendo que as temperaturas mais elevadas são prejudiciais as sementes.

O aumento da temperatura do ar de secagem promove a elevação dos danos mecânicos e a diminuição dos valores de germinação, emergência e vigor.

Para não comprometer a qualidade fisiológica das sementes, recomenda-se que a temperatura do ar de secagem seja inferior a 55 °C.