

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**CINÉTICA DE SECAGEM, HIGROSCOPICIDADE E
PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS DE NIGER**
(Guizotia abyssinica (L.f.) Cass.)

FERNANDA PIMENTEL DA SILVA

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
MAIO-2017**

**CINÉTICA DE SECAGEM, HIGROSCOPICIDADE E
PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS DE NIGER**
(Guizotia abyssinica (L.f.) Cass.)

FERNANDA PIMENTEL DA SILVA

Engenheira Agrícola

Orientador: Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira
Co-Orientador: Prof. Dr. André Luis Duarte Goneli
Co-Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Aparecido Jordan

Dissertação apresentada à Universidade Federal da
Grande Dourados, como parte das exigências do
programa de Pós-graduação em Engenharia
Agrícola, para a obtenção do título de Mestre.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S586c	Silva, Fernanda Pimentel da. Cinética de secagem, higroscopicidade e propriedades físicas dos grãos de niger (<i>Guizotia abyssinica</i> (L.f.) Cass.). / Fernanda Pimentel da Silva. – Dourados, MS : UFGD, 2017. 61f. Orientador: Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados. 1. Energia de ativação. 2. Isotermas de dessorção. 3. Calor isostérico. 4. Índice de contração volumétrica. I. Título.
-------	---

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central – UFGD.

©Todos os direitos reservados. Permitido a publicação parcial desde que citada a fonte.

**CINÉTICA DE SECAGEM, HIGROSCOPICIDADE E PROPRIEDADES FÍSICAS
DOS GRÃOS DE NIGER (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass.)**

por

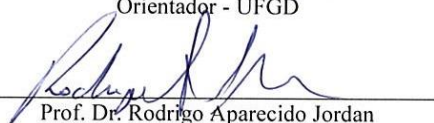
Fernanda Pimentel da Silva

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Aprovada em: 12/05/2017



Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira
Orientador - UFGD



Prof. Dr. Rodrigo Aparecido Jordan
UFGD



Profa. Dra. Farayde Matta Fakhouri
UFGD



Prof. Dr. Ivo de Sá Motta
EMBRAPA

Dedico

Aos meus pais:

Geandira Pimentel da Silva

&

José Fernandes da Silva

Ofereço

Às minhas irmãs:

Alecassandra Pimentel da Silva

e

Pamela Suéllen Pimentel da Silva

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida, saúde, oportunidades e perseverança para alcançar os meus ideais.

Aos meus pais Geandira Pimentel da Silva e José Fernandes da Silva pelo apoio, confiança, auxílio financeiro, incentivo e amor incondicional. Sem vocês nada disso seria possível.

As minhas irmãs Alecssandra Pimentel da Silva e Pamela Suéllen Pimentel da Silva, por acreditarem em minha capacidade e incentivarem essa caminhada acadêmica, com amor e carinho.

Ao Professor Valdiney Cambuy Siqueira, pela orientação e empenho na realização deste trabalho, pela paciência, confiança e por compartilhar seus conhecimentos, contribuindo para meu crescimento profissional e pessoal.

Ao Professor Luiz Carlos Ferreira de Souza por fornecer os grãos de niger utilizados neste trabalho.

Aos meus co-orientadores, André Luis Duarte Goneli e Rodrigo Aparecido Jordan, pelas contribuições e sugestões nesta pesquisa.

Aos colegas do grupo de pesquisa de pós-colheita, Larissa, Álvaro, Lucas, Rafael, Heloísa, Fábio, Indianara, Guilherme, Luan, Camilo, Rogério, pela ajuda durante a execução dos experimentos.

Agradeço também aos demais colegas que de uma forma ou de outra contribuíram para execução deste trabalho.

À Universidade Federal da Grande Dourados e à coordenação do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, da Faculdade de Ciências Agrárias-UFGD pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1 A cultura do niger.....	1
1.2 Secagem.....	1
1.3 Modelagem matemática.....	2
1.4 Higroscopicidade	4
1.5 Propriedades físicas.....	5
1.6 Objetivos gerais.....	7
1.6.1. Objetivos específicos.....	7
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	8
CAPÍTULO 1	
CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS DE NIGER EM CAMADA DELGADA.....	13
1.1 INTRODUÇÃO.....	13
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	14
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	18
1.4 CONCLUSÕES.....	26
1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27
CAPÍTULO 2	
ISOTERMAS DE DESSORÇÃO E CALOR ISOSTÉRICO DE GRÃOS DE NIGER (<i>Guizotia abyssinica</i> (L.f.) Cass.).....	30
2.1 INTRODUÇÃO.....	31
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
2.4 CONCLUSÕES.....	41
2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
CAPÍTULO 3	
PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS DE NIGER.....	45
3.1 INTRODUÇÃO.....	46
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	47
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
3.4 CONCLUSÕES.....	57
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
CONCLUSÕES GERAIS.....	61

SILVA, Fernanda Pimentel. **Cinética de secagem, higroscopicidade e propriedades físicas dos grãos de niger (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass.)**. 2017. 61p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados - MS.

RESUMO

A secagem de produtos agrícolas é uma etapa fundamental para a manutenção da qualidade pós-colheita. O conhecimento do equilíbrio higroscópico e das propriedades físicas, auxilia no desenvolvimento e dimensionamento adequado de processos e equipamentos de aeração, movimentação de grãos, otimização, controle e operação de equipamentos utilizados nas etapas pós-colheita. O presente trabalho foi realizado com objetivo de avaliar e modelar as propriedades físicas, higroscopia e as curvas de secagem dos grãos de niger. Para a condução do experimento, foram utilizados grãos de niger (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass.), cultivado no município de Dourados/MS. Para obtenção das curvas de secagem em camada delgada, os grãos de niger foram secos com circulação forçada de ar em um secador experimental de camada fixa, nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. A secagem aconteceu até os grãos atingirem teor de água de, aproximadamente 0,086 decimal base seca (b.s.). Aos dados experimentais de razão de umidade, foram ajustados oito modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas. Também foram determinados o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação. Para obtenção do teor de água de equilíbrio dos grãos de niger por dessorção, utilizou-se o método estático em condições controladas de temperatura (30, 35 e 40 °C) e umidade relativa entre 7,0 e 78,9%. O teor de água inicial das amostras foi de 0,56 decimal b.s., as quais foram pesadas periodicamente até atingirem o teor de água de equilíbrio, nestas condições. Modelos matemáticos tradicionalmente utilizados para descrever a higroscopicidade de produtos agrícolas foram ajustados aos dados experimentais. As propriedades físicas foram determinadas para diferentes teores de água durante a secagem: 0,52; 0,43; 0,32; 0,24; 0,16 e 0,09 decimal b.s., Os grãos foram submetidos à secagem em estufa com circulação forçada de ar, a temperatura de 40 °C. Durante a redução do teor de água, avaliaram-se a massa específica aparente, unitária, e a porosidade, bem como a contração volumétrica da massa e unitária do produto. Diante dos resultados encontrados é possível concluir que: os modelos de Page, Aproximação da Difusão e Dois Termos, são adequados para a representação da cinética de secagem em camada delgada do niger; o coeficiente de difusão efetivo aumenta de acordo com a elevação de temperatura; dentre os dez modelos utilizados, Chung e Pfost, Henderson modificado, Oswin, Sabbah, Sigma Copace, Halsey, Smith e Copace foram os que representaram satisfatoriamente a dessorção dos grãos de niger, em diferentes condições de temperatura e atividades de água; todas as propriedades físicas dos grãos de niger estudadas neste trabalho foram influenciadas pela redução do teor de água, principalmente a massa específica aparente e a contração da massa.

Palavras-chave: energia de ativação, isoterms de dessorção, calor isostérico, índice de contração volumétrica.

ABSTRACT

Agricultural products drying is a fundamental process in post-harvest quality maintenance. The knowledge of the hygroscopic balance and the physical properties, assists in the improvement as in the appropriate dimensioning of processes and equipments used in grain aeration and handling, optimization, control and operation of equipments used in post-harvest stages. The aim of this work was to evaluate and modeling the physical properties, hygroscopy and drying curves of niger grains. To conduct the experiment were used grains of niger (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass.), cultivated in Dourados/MS. In order to obtain thin-layer drying curves, the Niger grains were dried in forced air circulation in a fixed-layer experimental dryer in temperatures of 40, 50, 60, 70 and 80 °C. The grains were dried until they reached water content of approximately 0.086 decimal dry basis (d.b). Were adjusted eight mathematical models, frequently used to represent agricultural products drying, to the experimental data of moisture ratio. Also, were determined the effective diffusion coefficient, and the activation energy. To obtain the moisture content balance of niger grains by desorption, the static method was employed under controlled temperature conditions (30, 35 and 40 °C) and relative humidity between 7 and 78.9%. The initial moisture content of the samples were 0.56 decimal (d.b), obtained periodically until reached the moisture content balance, under these conditions. Traditional mathematical models used to describe the hygroscopicity of agricultural products were adjusted to the experimental data. Physical properties were determined for different moisture contents during the drying of: 0.52, 0.43, 0.32, 0.24, 0.16 and 0.09 decimal (d.b). The grains were submitted to oven-drying with forced air circulation, the temperature of 40 °C. During the reduction of moisture content, bulk density, true density, and porosity, as the mass and unit volumetric shrinkage of the product were evaluated. Based of the results found, it is possible to conclude that: the models of Page, Diffusion Approximation and Two Terms are suitable for the representation of the kinetics of thin layer drying of niger; The effective diffusion coefficient increase with the elevation of temperature; In order to evaluate the desorption of niger grains under different temperature conditions and water activities, the models of Chung and Pfost, modified Henderson, Oswin, Sabbah, Sigma Copace, Halsey, Smith and Copace were satisfactory. The physical properties of the niger grains were influenced by the reduction of moisture content mainly the bulk density and the weight volumetric shrinkage.

Keywords: activation energy, desorption isotherms, isosteric heat, shrinkage index.

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 A cultura do niger

A cultura do niger tem origem etíope e se adapta bem em regiões tropicais e temperadas, destacando a produção em países como Índia e Etiópia, que são os maiores produtores da cultura (GETINET e SHARMA, 1996; BHAGYA e SASTRY, 2003). As sementes são negras brilhantes e muito leves, com peso de 1.000 sementes variando de 3 a 5 g (RAMADAN e MÖRSEL, 2003). Já suas flores são amarelas, a polinização é cruzada e realizada por abelhas (GETINET e SHARMA, 1996).

O niger, *Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass, é um arbusto ereto, anual, pertencente à mesma família botânica do girassol (Asteraceae). A quantidade de ácido linoleico presente no óleo encontrado em seus grãos se assemelha as altas quantidades presentes nos grãos de cártamo e girassol (RAMADAN e MÖRSEL, 2003; YADAV et al., 2012). Em sua composição estão presentes gorduras, proteínas e fibras (BHAGYA e SASTRY, 2003), sendo boa fonte de fosfolípidios e ácido linoleico (SOLOMON e ZEWDU, 2009).

A espécie é utilizada na produção de cosméticos voltados para hidratação da pele, devido à presença de ácido linoleico (RAMADAN e MÖRSEL, 2003). É utilizada na alimentação humana para frituras de alimentos, como legumes e carnes (SOLOMON e ZEWDU, 2009). Além disso, a planta de niger pode ser usada nas bordaduras dos campos de cereais e na alimentação de ovinos, bovinos e pássaros. (GETINET e SHARMA, 1996; SARIN et al., 2009).

1.2 Secagem

A produção em larga escala para atender a demanda industrial, consumo humano e animal, é um dos motivos da antecipação do período de colheita. Com a antecipação da colheita, o produto permanece por menor período de tempo exposto ao ataque de insetos e microorganismos, além de reduzir danos ocasionados por interferências climáticas. Neste caso, a secagem torna-se indispensável para

proporcionar um armazenamento seguro, reduzindo não só o teor de água até níveis adequados, mas também as atividades biológicas, mudanças físicas e químicas que ocorrem no produto durante este período.

A secagem se fundamenta num processo de transferência simultânea de calor e massa entre o produto e o ar de secagem (BROOKER et al., 1992), que resulta na retirada do excesso de água contida no grão por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido (YILBAS et al., 2003). A capacidade de secagem do sistema está diretamente relacionada com este processo, quanto maior a diferença de pressão parcial de vapor entre a superfície do produto e o ar de secagem, maior será a capacidade de retirada de água.

A temperatura do ar de secagem pode provocar danos físicos, como descoloração dos grãos, quebras e trincas, quando não bem controlada, ocasionando perda de qualidade além de influenciar na eficiência de secagem (AFONSO JÚNIOR, 2001). Outros fatores atuam sobre a secagem, entre eles, a umidade relativa, o produto, o método de secagem adotado, as condições ambientais, a velocidade do ar de secagem e os métodos de preparo pós-colheita.

1.3 Modelagem matemática

O estudo de sistemas de secagem, seu dimensionamento, otimização e a determinação da viabilidade de sua aplicação comercial, podem ser feitos por simulação matemática. Simulação que se baseia na secagem de sucessivas camadas delgadas ou de apenas uma camada de produto (GINER e MASCHERONI, 2002), utilizando modelos matemáticos que representem, satisfatoriamente, o processo de secagem por meio do acompanhamento da redução do teor de água do produto (BERBERT et al., 1995).

A secagem em camada delgada é bastante utilizada a nível experimental, ajudando no entendimento da secagem em camada espessa. Um conjunto de relações matemáticas, formado de equações representativas de outras propriedades físicas específicas do produto combinadas as equações de secagem em camada delgada, auxilia nos cálculos e no entendimento da secagem em camada espessa (GINER e MASCHERONI, 2002; GONELI et al., 2009).

Para descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas em camada delgada, existem três tipos de modelos matemáticos: o modelo teórico, os

semiempíricos e os empíricos. O primeiro considera apenas a resistência interna e a transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem (MIDILLI et al., 2002; PANCHARIYA et al., 2002), já os semiempíricos e os empíricos não fornecem informações sobre os fenômenos de transporte de calor e massa no interior do produto, consideram que todo o processo de secagem ocorre no período de taxa decrescente, baseando-se apenas em variáveis externas, como temperatura e umidade relativa do ar de secagem (RESENDE et al., 2008).

Afzal e Abe (2000) definem as categorias de modelagem matemática da seguinte forma: modelos teóricos são aqueles que utilizam a equação da difusão ou relacionam equações simultâneas de transferência de calor e massa; modelos empíricos são aqueles que dependem apenas dos dados experimentais; e modelos semiempíricos os quais relacionam equações teóricas com ajustes empíricos.

Apesar da validade dos modelos semiempíricos e empíricos estar restrita às condições as quais os dados experimentais são obtidos, se mostram na maioria das vezes, como a melhor opção para prever o processo de secagem de grãos e sementes (BROOKER et al., 1992). Além disso, os modelos semiempíricos trabalham apenas nas faixas de teor de água, velocidade do ar, umidade relativa e temperatura em que foram obtidos (PANCHARIYA et al., 2002).

Vários autores utilizam modelos matemáticos para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas, como: café natural (ALVES et al., 2013), grãos de guandu (SILVA et al., 2014), espuma de graviola (BAPTESTINI et al., 2015), frutos de crambe (COSTA et al., 2015), pimenta variedade bico (REIS et al., 2015) e folhas de *Bauhinia forficata* Link (SILVA et al., 2017).

Além dos modelos empíricos e semiempíricos utilizados na secagem dos produtos agrícolas, um modelo teórico bastante estudado é o modelo da difusão. Durante a secagem, a difusão de água dos produtos agrícolas é um processo complexo, que envolve a difusão molecular, difusão capilar, fluxo hidrodinâmico, difusão térmica, difusão de vapor e difusão de superfície (GONELI et al., 2009).

Segundo Cussler (1997), o primeiro tratamento matemático da difusão foi estabelecido por Fick, sendo a Lei de Fick a lei fundamental da difusão, que tratou a difusão como um processo molecular dinâmico, baseando-se na hipótese que a taxa de transferência da substância, difundida através da unidade de área de uma seção, é proporcional ao gradiente de concentração normal a esta seção.

Os diversos modelos utilizados para representação da difusão são baseados na segunda lei de Fick, que descreve o estado não estacionário e reflete a maioria das condições experimentais. Diferentemente da primeira lei, que se baseava apenas em situações de estado estacionário, onde a concentração do difusante não varia com o tempo.

1.4 Higroscopicidade

A atividade de água (A_w) indica a disponibilidade de água em materiais biológicos, e ainda pode ser indicada por meio da umidade de equilíbrio com a temperatura e umidade relativa do ar ambiente. Com a redução da atividade de água, a conservação dos produtos biológicos é facilitada, retardando a proliferação de microorganismos e impedindo as reações bioquímicas que aceleram o processo de degradação, e por consequência, a perda de qualidade do produto.

A higroscopicidade de um produto agrícola depende diretamente da afinidade existente entre a água e os demais constituintes (gorduras, proteínas, açúcares, amido, etc.) do material (BROOKER et al., 1992). A relação entre as características químicas, físicas e de estabilidade dos produtos desidratados ou parcialmente desidratados, pode ser conhecida através do comportamento das isotermas de sorção (HUBINGER et al., 2009).

Os métodos dinâmico e estático são utilizados experimentalmente para obter as curvas de teor de água de equilíbrio (CORRÊA et al., 2005). O método dinâmico acontece na presença de fluxo de ar e condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar, até que o equilíbrio higroscópico seja atingido. No método estático não há presença de fluxo de ar, e o equilíbrio higroscópico dos grãos é atingido apenas com as condições controladas de umidade relativa do ar e temperatura.

Durante o processo de secagem dos produtos agrícolas, acontece a transferência de calor e massa e, este fenômeno pode ser analisado por meio do calor isostérico, uma propriedade termodinâmica de sorção de água (AVIARA e AJIBOLA, 2002) que representa a energia mínima requerida para o início da secagem (LIMA et al., 2008).

1.5 Propriedades físicas

A correta caracterização das propriedades físicas dos produtos agrícolas é de extrema importância para o fornecimento de informações que possam ser utilizadas durante a colheita, beneficiamento, secagem e armazenamento.

O conhecimento sobre as propriedades físicas dos produtos agrícolas contribui para melhores tomadas de decisão nas adaptações e no desenvolvimento de projetos relacionados aos processos pós-colheita, classificação, transporte, beneficiamento, secagem, armazenamento, processos de controle, bem como para otimização de processos agroindustriais. O estudo das propriedades físicas ainda auxilia os profissionais da área no aprimoramento e melhorias de estruturas e equipamentos destinados a estas operações (GONELI et al., 2008; SIQUEIRA et al., 2012a; ARAÚJO et al., 2015).

A utilização de materiais biológicos nos processos industriais conta com uma particularidade nem sempre observada em outros materiais. Não possui uniformidade, forma e tamanhos precisos, em decorrência de diversos fatores, como: variedade de sementes, posição e forma de crescimento na planta mãe, clima, fertilidade do solo e as práticas agrícolas empregadas durante seu cultivo (MATA e DUARTE, 2002). Desta forma, torna-se necessário assumir para cada produto uma forma regular conhecida, já que geralmente não apresenta formato geométrico perfeitamente definido, o que pode levar a possíveis erros diante das aproximações utilizadas (CORRÊA et al., 2002).

Muitas mudanças físicas ocorrem nos produtos agrícolas quando submetidos à secagem, sendo a redução do seu volume uma das mais importantes alterações causadas. A variação do conteúdo de água causa alterações à estrutura celular do produto, levando à mudança na forma e na dimensão (MAYOR e SERENO, 2004). Para Ramos et al. (2003) a redução do tamanho do tecido celular e, conseqüentemente, redução do volume dos produtos agrícolas é chamado de contração volumétrica e se evidencia durante a secagem.

O índice de contração volumétrica permite prever o comportamento de redução do volume ocupado pela massa de grãos, conforme acontece a redução do teor de água, sendo importante para o processo de secagem (SIQUEIRA et al., 2012b), principalmente se tratando da eficiência de secadores, quando os mesmos

trabalham com a capacidade total, não havendo caminho preferencial para a passagem do ar aquecido.

Segundo Tavakoli et al. (2009), parâmetros como a massa específica aparente, massa específica unitária e porosidade, são importantes no auxílio de dimensionamento de silos, armazéns, moegas e equipamentos de separação e classificação de grãos e sementes. Além disso, são importantes na predição de perdas de qualidade do material durante seu armazenamento (GONELI et al., 2008; ARAÚJO et al., 2014).

A massa específica aparente de grãos aumenta, geralmente, com a retirada de água do produto (COUTO et al., 1999), este comportamento depende diretamente da quantidade de grãos danificados, do teor de água inicial, da temperatura utilizada na secagem, do teor de água final e da variedade do grão (BROOKER et al., 1992).

A massa específica real ou unitária de partículas sólidas granulares tais como grãos e cereais, pode ser estimada, de acordo com Lewis (1993), a partir do conhecimento da composição química do produto.

A porosidade geralmente é expressa em porcentagem e relaciona o volume total ocupado pelo ar em uma massa de grãos pelo volume dessa massa. Segundo Araújo et al. (2014), a porosidade de uma massa de grãos pode ser afetada pelas características físicas, como tamanho e forma da superfície do produto, e ainda apresentar maior ou menor porosidade dependendo da superfície de contato. Assim como a massa específica aparente, a porosidade é um dado a ser considerado no dimensionamento de sistemas de secagem e aeração de grãos, pois está diretamente relacionada com a resistência que a massa de grãos impõe a passagem do ar (ZEWDU e SOLOMON, 2007).

1.6 Objetivos gerais

Diante da importância da secagem, bem como sua influência sobre as propriedades físicas e na higroscopia dos produtos agrícolas, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar as propriedades físicas, o equilíbrio higroscópico e estudar a secagem dos grãos de niger.

1.6.1 Objetivos específicos

O presente trabalho foi desenvolvido com os seguintes objetivos específicos:

- Descrever a secagem dos grãos de niger através do ajuste de diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem e selecionar aquele que melhor representa o fenômeno;
- Determinar o coeficiente de difusão efetivo;
- Obter as isotermas de dessorção e o calor isostérico dos grãos de niger;
- Avaliar a massa específica aparente, unitária, porosidade, índice de contração volumétrica da massa e unitária, em função do teor de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JÚNIOR, P.C. **Aspectos físicos, fisiológicos e da qualidade do café em função da secagem e do armazenamento**. 2001. 373f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

AFZAL, T.M.; ABE, T. Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.26, n.2, p.137-145, 2000.

ALVES, G.E.; ISQUIERDO, E.P.; BORÉM, F.M.; SIQUEIRA, C.S.; OLIVEIRA, P.D.; ANDRADE, E.T. Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. **Coffee Science**, v.8, n.2, p.238-247, 2013.

ARAUJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; ORLANDO, R.C.; MARTINS, E.A.S.; HARTMANN FILHO, C.P. Propriedades físicas dos frutos de amendoim durante a secagem. **Revista Caatinga**, v.28, n.4, p.170-180, 2015.

ARAUJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; SOUZA, C.M.A.; GONÇALVES, A.A.; VILHASANTI, H.C.B. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.3, p.279-286, 2014.

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.

BAPTESTINI, F.M.; CORRÊA, P.C.; JUNQUEIRA, M.S.; RAMOS, A.M.; VANEGAS, J.D.B.; COSTA, C.F. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.12, p.1203-1208, 2015.

BERBERT, P.A.; QUEIROZ, D.M.; SILVA, J.S.; PINHEIRO FILHO, J.B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.60, n.3, p.167-173, 1995.

BHAGYA, S., SASTRY, M.C.S. Chemical, functional and nutritional properties of wet dehulled niger (*Guizotia abyssinica* Cass) seed flour. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v.36, p.703-708, 2003.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 450 p.

CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; QUEIROZ, D.M.; SAMPAIO, C.P.; CARDOSO, J.B. Variação das dimensões características e da forma dos frutos de café durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, p.466-470, 2002.

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.2, p.141-159, 2005.

COSTA, L.M.; RESENDE, O.; GONÇALVES, D.N.; OLIVEIRA, D.E.C. Modelagem matemática da secagem de frutos de crambe em camada delgada. **Bioscience Journal**, v.32, n.2, p.392-403, 2015.

COUTO, S.M.; MAGALHÃES, A.C.; QUEIROZ, D.M.; BASTOS, I.T. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.1, p.61-68, 1999.

CUSSLER, E.L. **Diffusion Mass transfer in fluid systems**. 2 ed. New York: Cambridge University Press, 1997. 580 p.

GETINET, A.; SHARMA, S.M. **Niger (*Guizotia abyssinica* (L. f.) Cass. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops 5**. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute, Rome, 1996, 59 p.

GINER, S.A.; MASCHERONI, R.H. Diffusive drying kinetics in wheat, Part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. **Postharvest Technology**, v.81, n.1, p.85-97, 2002.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; OLIVEIRA, G.H.H.; SANTOS, E.S. Propriedades físicas dos frutos de mamona durante a secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.33, n.2, p.148-155, 2008.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; JÚNIOR, P.C.A.; OLIVEIRA, G. H. H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.especial café, n.11, p.64-73, 2009.

HUBINGER, M.D.; VIVANCOPEZANTES, D.; KUROZAWA, L.E.; SOBRAL, P.J.A. Isotermas de dessecamento 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.

LEWIS, M.J. **Propriedades físicas de los alimentos y de los sistemas de processados**. Zaragoza: Editora Acribia S.A., 1993.

LIMA, E.E.; SILVA, A.S.; FIGUEIREDO, R.M.F.; QUEIROZ, J.M. Estudo das isotermas e calor isostérico de adsorção da farinha da coroa de frade. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.10, n.2, p.163-170, 2008.

MATA, M.E.R.M.C.; DUARTE, M.E.M. Porosidade intergranular de produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.4, n.1, p.79-93, 2002.

MAYOR, L.; SERENO, A.M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, v.61, n.3, p.373-386, 2004.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z.A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, v.20, n.7, p.1503-1513, 2002.

PANCHARIYA, P.C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A.L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v.52, n.4, p.349 - 357, 2002.

RAMADAN, M.F.; MÖRSEL, J.T. Phospholipid composition of niger (*Guizotia abyssinica* Cass.) seed oil. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v.36, n.2, p.273-276, 2003.

RAMOS, I.N.; BRANDÃO, T.R.S.; SILVA, C.L.M. Structural changes during air drying of fruit and vegetables. **Food Science and Technology International**, v.9, n.3, p.201-206, 2003.

REIS, D.R.; SANTOS, P.; SILVA, F.S.; PORTO, A.G. Influence of air characteristics on drying kinetics of beak pepper. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.18, n.2, p.146-154, 2015.

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**, v.10, n.1 p.17-28, 2008.

SARIN, R.; SHARAMAA, M.; KHANB, A.A. Studies on *Guizotia abyssinica* L. oil: Biodiesel synthesis and process optimization. **Bioresource Technology**, v.100, n.18, p.4187-4192, 2009.

SILVA, F.P.; SIQUEIRA, V.C.; MARTINS, E.A.S.; MIRANDA, F.M.N.; MELO, R.M. Thermodynamic properties and drying kinetics of *Bauhinia forficata* Link leaves. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.1, p.61-67, 2017.

SILVA, L.M.S.; SOUSA, E.P.S.; MATA, M.E.R.M.C.; DUARTE, M.E.M. Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.17, n.4, p.310-318, 2014.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Propriedades físicas das sementes de pinhão-mansão ao longo da secagem em diferentes temperaturas. **Semina: Ciências Agrárias**, v.33, n.1, p.2705-2714, 2012a.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Determination of the volumetric shrinkage in *Jatropha* seeds during drying. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.34, n.3, p.231-238, 2012b.

SOLOMON, W.K.; ZEWDU, A.D. Moisture-dependent physical properties of niger (*Guizotia abyssinica* Cass.) seed. **Industrial Crops and Products**, v.29, n.1, p.165-170, 2009.

TAVAKOLI, M.; TAVAKOLI, H.; RAJABIPOUR, A.; AHMADI, H.; GHARIBZAHEDI, S.M.T. Moisture-dependent physical properties of barley grains. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v.2, n.4, p.84-91, 2009.

YADAV, S.; HUSSAIN, Z.; SUNEJA, P.; NIZAR, M.A.; YADAV, S.K.; DUTTA, M. Genetic divergence studies in niger (*Guizotia abyssinica*) germplasm. **Biomass and Bioenergy**, v.44, p.64-69, 2012.

YILBAS, B.S.; HUSSAIN, M.M.; DINCER, I. Heat and moisture diffusion in slab products to convective boundary condition. **Heat and Mass Transfer**, v.39, n.5, p.471-476, 2003.

ZEWDU, A.D.; SOLOMON, W.K. Moisture-Dependent Physical Properties of Tef Seed. **Biosystems Engineering**, v.96, n.1, p.57-63, 2007.

CAPÍTULO 1

CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS DE NIGER EM CAMADA DELGADA

Resumo: Objetivou-se com o presente trabalho descrever o processo de secagem dos grãos de niger através do ajuste de diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem, e selecionar aquele que melhor representa o fenômeno, e determinar o coeficiente de difusão do produto. Os grãos foram colhidos com teor de água inicial de aproximadamente 30% (base úmida) e submetidos à secagem nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C em um secador experimental de leito fixo. Após a secagem, foram ajustados diferentes modelos matemáticos determinou-se o coeficiente de difusão por meio da teoria da difusão líquida, permitindo a obtenção dos valores da energia de ativação. Selecionou-se o modelo de Page para representar a secagem do niger, por ser um modelo mais tradicional e de maior simplicidade. O coeficiente de difusão efetivo aumentou com a elevação da temperatura. A energia de ativação para difusão líquida no intervalo de temperatura de 40 a 80 °C foi de 46,83 kJ mol⁻¹.

Palavras-chave: coeficiente de difusão efetivo, energia de ativação, *Guizotia abyssinica* Cass, modelos matemáticos

Abstract: The objective of this work was to describe the drying process of Niger grains by adjusting different mathematical models to the experimental data of drying, and to select the one that best represents the phenomenon, and to determine the diffusion coefficient of the product. The grains were harvested at an initial water content of approximately 30% (wet basis) and subjected to drying at temperatures of 40, 50, 60, 70 and 80 °C in a fixed bed experimental dryer. After drying, different mathematical models were adjusted. The diffusion coefficient was determined through the net diffusion theory, allowing the activation energy values to be obtained. The Page model was chosen to represent the drying of the niger, because it is a more traditional and simpler model. The effective diffusion coefficient increased with increasing temperature. The activation energy for liquid diffusion in the temperature range of 40 to 80 °C was 46.83 kJ mol⁻¹.

Keywords: effective diffusion coefficient, activation energy, *Guizotia abyssinica* Cass, mathematical models

1.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, especialmente na região Centro-Oeste, plantas oleaginosas vem sendo introduzidas como culturas de inverno em áreas que anteriormente eram de pousio. Desta forma, o niger que possui de 30 a 40% de teor de óleo (GHANE et al., 2012; RAMADAN 2012) possui características favoráveis ao cultivo nesta região (GORDIN et al., 2012). Seu óleo pode ser usado para fins industriais, como: sabonetes, tintas, lubrificantes e matéria-prima na produção de biodiesel (SARIN et al., 2009).

Para que seja possível utilizar o niger em larga escala, assim como outros produtos agrícolas já inseridos nos processos industriais, é necessária a prática de uma das mais importantes etapas pós-colheita, a secagem, que pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de energia e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água contida no grão por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido.

A secagem dos produtos agrícolas pode ser realizada comumente de duas formas, em camada delgada e espessa. Os estudos de nível experimental geralmente são realizados em camada delgada, visando menor utilização de produto, otimização do tempo de secagem e determinação das taxas de secagem, utilizando-se para a coleta de dados o registro das perdas de massa ocorridas em uma amostra durante a remoção de água.

Para melhor entendimento desta etapa pós-colheita, diversos modelos matemáticos têm sido ajustados para descrever a secagem em camada delgada de produtos agrícolas. Dentre eles estão: Midilli, Page, Thompson, Verma, Henderson e Pabis, Logarítmico, Dois termos, Exponencial de dois termos, Newton, Wang e Sing, Aproximação da difusão e Valcam (MOHAPATRA e RAO, 2005; KASHANINEJAD et al., 2007; GONELI et al., 2009; CORRÊA et al., 2010; RESENDE et al., 2011; PRATES et al., 2012; REIS et al., 2012; SIQUEIRA et al., 2012a; SIQUEIRA et al., 2012b; ISQUIERDO et al., 2013; SANTOS et al., 2013).

Envolvida neste processo está a energia de ativação, que indica a facilidade com que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto, considerando os mecanismos de difusão. Quanto menor a energia

de ativação maior será a velocidade com que a água será removida do produto (RESENDE et al., 2011).

A teoria da difusão líquida, por exemplo, 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 (FARIA et al., 2012). Pode-se dizer que o coeficiente de difusão efetivo descreve a velocidade de saída de água do grão. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem, ela não é intrínseca ao material, assim convencionou-se chamá-la de difusividade efetiva (OLIVEIRA et al., 2006).

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho estudar a secagem dos grãos de niger através do ajuste de diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem, e selecionar aquele que melhor representa o fenômeno, determinar o coeficiente de difusão efetivo e as propriedades termodinâmicas do produto.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido nos laboratórios de propriedades físicas de produtos agrícolas e de pré-processamento e armazenamento de produtos agrícolas da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD). Para a condução do experimento, foram utilizados grãos de niger (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass.), cultivado na área experimental da UFGD, município de Dourados/MS.

A colheita e a trilhagem dos capítulos foram realizadas manualmente e, em seguida, os grãos de niger com teor de água de aproximadamente 30% (b.u.) foram homogeneizados e encaminhados para realização dos testes de secagem em laboratório. Os grãos apresentaram alto teor de água devido ao estágio avançado de maturação fisiológica no qual foram colhidos.

A secagem do niger foi realizada com circulação forçada de ar em um secador experimental de camada fixa, regulado e mantido nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. A manutenção da temperatura do ar de secagem neste secador é realizada através de sistema de automação que possui um controlador de temperatura, o qual permite que seja mantida na temperatura previamente

programada (GONELI et al., 2016). Durante o processo de secagem, quatro bandejas de fundo perfurado contendo em cada uma 0,01 kg de amostras foram pesadas no início e ao longo de todo processo, até que secagem fosse interrompida. A secagem cessou quando o teor de água do produto foi igual a $8\% \pm 0,5$ (b.u.).

A umidade relativa no interior do secador foi obtida por meio dos princípios básicos de psicrometria, monitorando-se as condições do ambiente externo através de um psicrômetro e utilizando o programa computacional GRAPSI. Já a velocidade do ar de secagem foi monitorada com o auxílio de um anemômetro de pás rotativas e mantida em torno de $0,85 \text{ m s}^{-1}$. Para fins de conferência, a temperatura do ar de secagem foi verificada com termômetro padrão antes do início da secagem do produto.

Para o estudo da cinética de secagem dos grãos de niger, foi determinada a razão de umidade do produto para cada condição de secagem, Equação 1.

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

em que:

RX: razão de umidade do produto, adimensional;

X: teor de água do produto em determinado tempo, decimal b.s.;

X_i : teor de água inicial do produto, decimal b.s.; e

X_e : teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s..

O teor de água de equilíbrio dos grãos de niger foi obtido experimentalmente, mantendo o produto exposto à mesma temperatura de secagem até que a massa do produto permanecesse praticamente constante, durante três pesagens consecutivas.

Aos dados experimentais da secagem foram ajustados os modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas, conforme apresentado na Tabela 1.

TABELA 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos agrícolas.

Designação do modelo	Modelo	Eq.
$RX = 1 + a t + b t^2$	Wang e Singh	(2)
$RX = \exp \frac{-a - (a^2 + 4 b t)^{0.5}}{2 b}$	Thompson	(3)
$RX = \exp(-k t^n)$	Page	(4)
$RX = a \exp(-k t) + c$	Logarítmico	(5)
$RX = a \exp(-k t)$	Henderson e Pabis	(6)
$RX = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k b t)$	Aproximação da difusão	(7)
$RX = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Dois termos	(8)
$RX = a + b t + c t^{1.5} + d t^2$	Valcam	(9)

em que:

t: tempo de secagem, h;

k, k_0 , k_1 : constantes de secagem, h^{-1} ; e

a, b, c, n: coeficientes dos modelos.

O coeficiente de difusão efetivo dos grãos de niger, para as diferentes condições de secagem, foi calculado utilizando a (Equação 10), baseada na teoria da difusão líquida, representando uma solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica do produto como esférica e com aproximação de oito termos.

O modelo de difusão efetivo para a forma geométrica esférica, considerando o raio equivalente médio dos grãos de 1,1365 mm, foi obtido por regressão não linear (Equação 10).

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n_i=1}^{\infty} \frac{1}{n_i^2} \exp \left[\frac{n_i^2 \pi^2 D_i t}{9} \left(\frac{3}{R_e} \right)^2 \right] \quad (10)$$

em que:

D_i : coeficiente de difusão de líquido, $m^2 s^{-1}$;

R_e : raio de esfera equivalente, m; e

n: número de termos.

Para o cálculo do raio de esfera equivalente utilizado no modelo de difusão efetivo (Equação 10), fez-se a medição dos três eixos ortogonais dos grãos de niger, sendo eles comprimento (a), largura (b) e espessura (c). Com auxílio de um micrômetro digital com resolução de 0,0001 mm, foram escolhidos 50 grãos aleatoriamente e medidos.

O volume de cada grão foi calculado com base nos diâmetros perpendiculares, utilizando a Equação 11.

$$V_g = \pi \left(\frac{a b c}{6} \right) \quad (11)$$

em que:

V_g : volume do grão, mm³;

a: comprimento, mm;

b: largura, mm; e

c: espessura, mm.

Para a avaliação do efeito da temperatura sobre o coeficiente de difusão efetivo, foi utilizada a Equação 12, de Arrhenius.

$$D_i = D_0 \exp \left(\frac{E_a}{R T_a} \right) \quad (12)$$

em que:

D_0 : fator pré-exponencial;

R: constante universal dos gases, 8,314 kJ kmol⁻¹ K⁻¹;

T_a : temperatura, K; e

E_a : energia de ativação, kJ mol⁻¹.

Os dados experimentais de cinética de secagem foram submetidos à análise de regressão e seleção do modelo matemático adequado para expressar a relação entre as variáveis estudadas, levando em consideração a análise da distribuição de resíduos.

Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais, foi utilizado o programa computacional STATISTICA 8.0. Para análise do grau de ajuste de cada modelo, foram consideradas as magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), do erro médio relativo, desvio padrão da estimativa e a análise de comportamento da distribuição dos resíduos. Os valores do erro médio relativo P (%) e do desvio padrão da estimativa (SE) foram calculados conforme descrito nas Equações 13 e 14.

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

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

em que:

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor calculado pelo modelo;

n: número de observações experimentais; e

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

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 2 são apresentadas as magnitudes do desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e o coeficiente de determinação (R^2), utilizados na comparação entre os oito modelos ajustados aos dados experimentais de razão de umidade obtidos durante a secagem dos grãos de niger submetidos a diferentes temperaturas.

TABELA 2. Parâmetros estatísticos obtidos para os oito modelos utilizados na secagem dos grãos de niger.

Modelos	Temperatura (°C)														
	40			50			60			70			80		
	SE	P	R ²	SE	P	R ²	SE	P	R ²	SE	P	R ²	SE	P	R ²
(2)	0,08	32,08	0,94	0,06	14,84	0,95	0,05	13,66	0,98	0,07	14,71	0,94	0,05	13,43	0,97
(3)	0,01	5,47	0,99	0,01	1,93	0,99	0,00	1,38	0,99	0,02	4,34	0,99	0,04	5,37	0,99
(4)	0,01	1,77	0,99	0,00	0,58	0,99	0,01	2,49	0,99	0,01	2,52	0,99	0,04	6,37	0,98
(5)	0,02	6,96	0,99	0,02	4,09	0,99	0,01	2,43	0,99	0,04	6,89	0,99	0,04	5,41	0,99
(6)	0,03	12,54	0,99	0,04	9,07	0,98	0,03	8,96	0,99	0,05	10,47	0,97	0,05	11,82	0,98
(7)	0,01	2,97	0,99	0,01	1,83	0,99	0,01	1,49	0,99	0,01	2,05	0,99	0,04	5,15	0,99
(8)	0,01	2,96	0,99	0,01	1,77	0,99	0,01	1,51	0,99	0,01	2,05	0,99	0,04	5,48	0,99
(9)	0,01	4,53	0,99	0,01	1,94	0,99	0,01	1,60	0,99	0,03	5,12	0,99	0,04	5,74	0,99

Verifica-se que, os modelos ajustados apresentaram valores de coeficiente de determinação (R^2) próximos a 0,98, com exceção do modelo de Wang e Sing, o qual apenas a temperatura de 60 °C atingiu resultado satisfatório. Segundo Kashaninejad et al. (2007) valores próximos a 0,98 significam bom ajuste dos modelos para a representação do fenômeno de secagem em camada delgada. No entanto, esses autores afirmam que a utilização do coeficiente de determinação (R^2) como o único critério de avaliação para a seleção dos modelos não lineares não constituem um bom parâmetro para a representação do fenômeno de secagem. Por esse motivo, realizou-se uma análise conjunta de outros parâmetros estatísticos.

Dentre os modelos utilizados para predizer o fenômeno de secagem dos grãos de niger, os modelos de Henderson e Pabis e Wang e Singh apresentaram valores do erro médio relativo superiores a 10%. Segundo Kashaninejad et al. (2007) os valores do erro médio relativo indicam desvio dos valores observados em relação a curva estimada pelo modelo. MOHAPATRA e RAO (2005) afirmam que, modelos com valores de erro médio relativo superiores a 10% são inadequados para a descrição de um determinado fenômeno.

Os modelos de Wang e Singh e Henderson e Pabis se destacam dentre os demais modelos por apresentarem os maiores valores de SE para todas as condições de secagem. Considerando que este parâmetro estatístico indica a capacidade de um modelo em descrever com fidelidade um determinado processo físico e que quanto menor sua magnitude melhor será a qualidade de ajuste do modelo em relação aos

dados observados (SIQUEIRA et al., 2012a), estes modelos não são adequados para representar o processo de secagem dos grãos de niger.

Na Tabela 3, estão apresentadas as tendências de distribuição de resíduos para os modelos ajustados aos dados experimentais da secagem do niger.

TABELA 3. Tendência de distribuição dos resíduos para os oito modelos ajustados aos dados experimentais da secagem do niger. TD para tendencioso e AL para aleatório.

Modelos Matemáticos	Temperatura (°C)				
	40	50	60	70	80
Wang e Singh	TD	TD	TD	TD	AL
Thompson	TD	AL	AL	AL	AL
Page	AL	AL	AL	AL	AL
Logarítmico	TD	TD	AL	TD	AL
Henderson e Pabis	TD	TD	TD	TD	AL
Aproximação da difusão	AL	AL	AL	AL	AL
Dois termos	AL	AL	AL	AL	AL
Valcam	TD	AL	AL	AL	AL

Observa-se na Tabela 3 que os modelos de Page, Aproximação da difusão e Dois termos apresentaram para todas as condições de secagem uma distribuição aleatória dos resíduos, obtendo o melhor ajuste dos dados experimentais da secagem dos grãos de niger.

Nas Figuras 1A e 1B estão apresentadas as ilustrações da distribuição de resíduos (Aleatória para o modelo de Page e Tendenciosa para o modelo de Wang e Singh), durante a modelagem da secagem do niger.

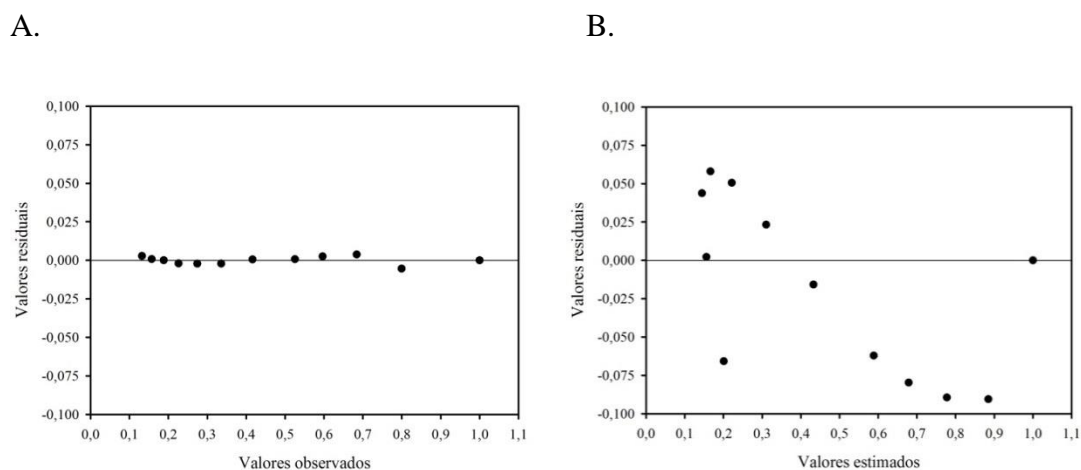


FIGURA 1. Ilustração da distribuição dos resíduos: Aleatório para o modelo de Page (A) e Tendenciosa para o modelo de Wang e Singh (B) durante a secagem dos grãos de niger.

Analisando os três modelos que atendem os requisitos estatísticos e que podem ser recomendados para a representação da secagem em camada delgada dos grãos de niger, o modelo mais simples e mais tradicional é o de Page, sendo assim, este foi o modelo selecionado. Sua simplicidade está relacionada ao menor número de parâmetros, e a tradicionalidade está relacionada à sua constante recomendação e utilização para representação da secagem em camada delgada de vários produtos agrícolas, como: nozes de pistachio (KASHANINEJAD et al., 2007), grãos de café descascados (GONELI et al., 2009), figo-da-índia (MADUREIRA et al., 2011) e frutos de pinhão manso (SIQUEIRA et al., 2012a).

Na Figura 2 são apresentadas as comparações entre os valores estimados e observados de razão de umidade, pelo modelo de Page, para todas as condições do ar de secagem em camada delgada dos grãos de niger. Observa-se que para todas as temperaturas estudadas o modelo apresenta boa correspondência entre os valores observados e estimados.

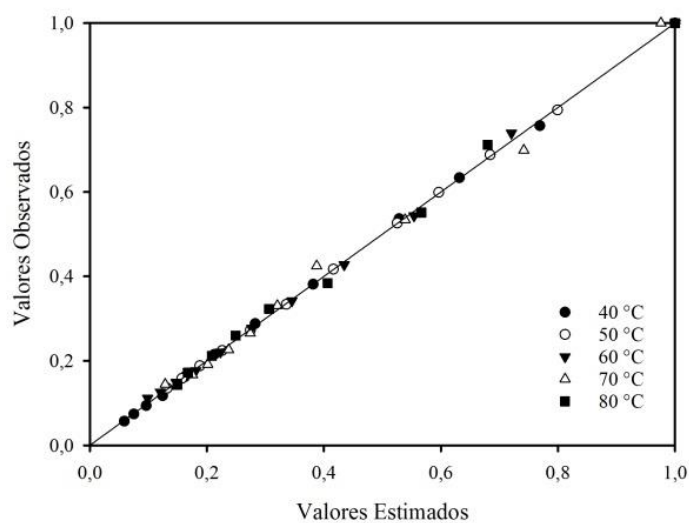


FIGURA 2. Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Page para a secagem dos grãos de niger em camada delgada em diferentes temperaturas.

Verifica-se o excelente ajuste do modelo de Page e a sua fidelidade ao comportamento da secagem dos grãos de niger (Figura 3). Observa-se ainda que maiores temperaturas proporcionam menores tempos de secagem. Esse comportamento ocorre devido a maior taxa de remoção de água do produto nessas condições, decorrente da maior diferença de pressão de vapor d'água do ar e dos grãos. O mesmo comportamento foi observado por outros pesquisadores (SIQUEIRA et al., 2012b; RESENDE et al., 2014).

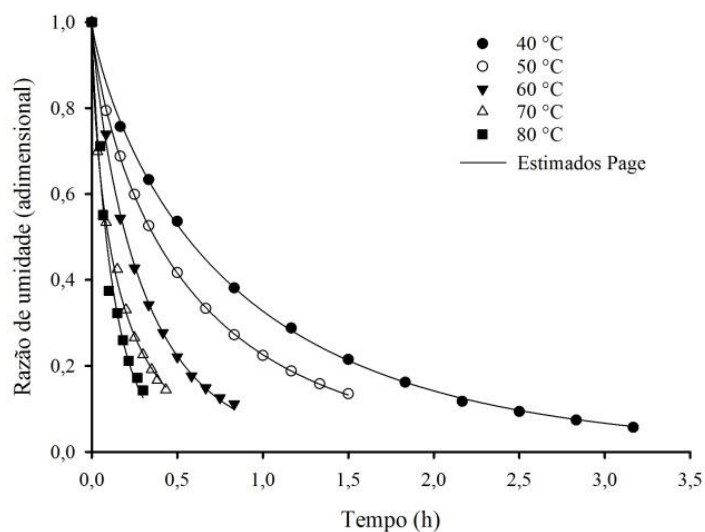


FIGURA 3. Valores de razão de umidade estimados pelo modelo de Page na secagem dos grãos de niger em camada delgada.

É possível observar que para todas as temperaturas de secagem a redução da razão de umidade dos grãos é maior no início do processo. Com o decorrer da secagem o desprendimento da água no grão ocorre com maior dificuldade, pois a mesma está fortemente ligada ao produto, fazendo com que a curva de razão de umidade apresente tal comportamento (Figura 3).

Os parâmetros do modelo de Page ajustados aos dados experimentais da secagem dos grãos de niger em diferentes condições de temperatura são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4. Parâmetros do modelo de Page para as diferentes temperaturas de secagem dos grãos de niger.

Temperatura (°C)	Parâmetros	
	k	n
40	1,115661	0,807568
50	1,485567	0,761612
60	2,700678	0,848577
70	3,323381	0,673447
80	5,848469	0,862072

Verifica-se que para o parâmetro “n” não houve comportamento definido. Já o parâmetro “k” aumentou conforme a elevação da temperatura do ar de

secagem. Devido seu aumento progressivo com o aumento da temperatura do ar de secagem, seu comportamento pode ser descrito pela Equação 15:

$$K = 0,113x - 3,887 \quad (15)$$

A Equação 15 utilizada para descrever os valores do coeficiente “k” do modelo de Page em função da temperatura do ar apresentou bom ajuste, com valor do coeficiente de determinação de 0,906.

Utilizando a Equação 15 do coeficiente k e o valor médio do coeficiente “n” do modelo de Page, para todas as condições do ar de secagem testadas, pode-se estimar o teor de água do produto por meio da Equação 16. Sousa et al. (2011) estimando o teor de água de nabo forrageiro através do modelo de Midilli, não observaram tendência clara dos coeficientes do modelo, utilizando, desta forma os valores médios.

$$X = X_e + (X_i - X_e) \exp(-0,113x - 3,8873 t^{0,790656}) \quad (16)$$

em que:

t: tempo de secagem, h; e

x: temperatura do ar de secagem, ° C.

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios do coeficiente de difusão efetivo obtidos durante a secagem dos grãos de niger para as diferentes condições de temperatura, considerando o raio equivalente dos grãos de 1,1365 mm.

TABELA 5. Valores do coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem para os grãos de niger.

Temperatura (°C)	D x 10 ⁻¹¹ (m ² s ⁻¹)
40	2,3273
50	3,2761
60	6,7006
70	11,7050
80	15,6915

Observa-se na Tabela 5 que os coeficientes de difusão efetivo aumentam com o acréscimo de temperatura. Comportamento semelhante foi observado por GONELI et al. (2009), ao estudarem a cinética de secagem de café descascado. Os autores destacam que com aumento da temperatura, a mobilidade molecular da água diminui e, sendo a viscosidade uma medida da resistência do fluido ao escoamento, variações dessa propriedade implicam em alterações na difusão de água nos capilares dos grãos de modo a favorecer a movimentação desse fluido no produto.

As variações do coeficiente de difusão efetivo para os grãos de niger em diferentes temperaturas de secagem ficaram entre $2,3273 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para a temperatura de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ e $15,6915 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para a temperatura de $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Segundo MADAMBA et al. (1996), os valores de coeficiente de difusão para a secagem de produtos agrícolas, apresentam-se na ordem de 10^{-9} a $10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Assim os valores calculados para o niger se enquadram a faixa estabelecida pelos autores.

A Figura 4 apresenta os valores de $\ln(D)$ em função do inverso da temperatura absoluta obtido para os grãos de niger. Observa-se que a linearidade decrescente evidencia a uniformidade de variação da taxa de secagem dentro da faixa de temperatura estudada. A inclinação da curva de representação de Arrhenius fornece uma relação E_a enquanto sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de D_0 .

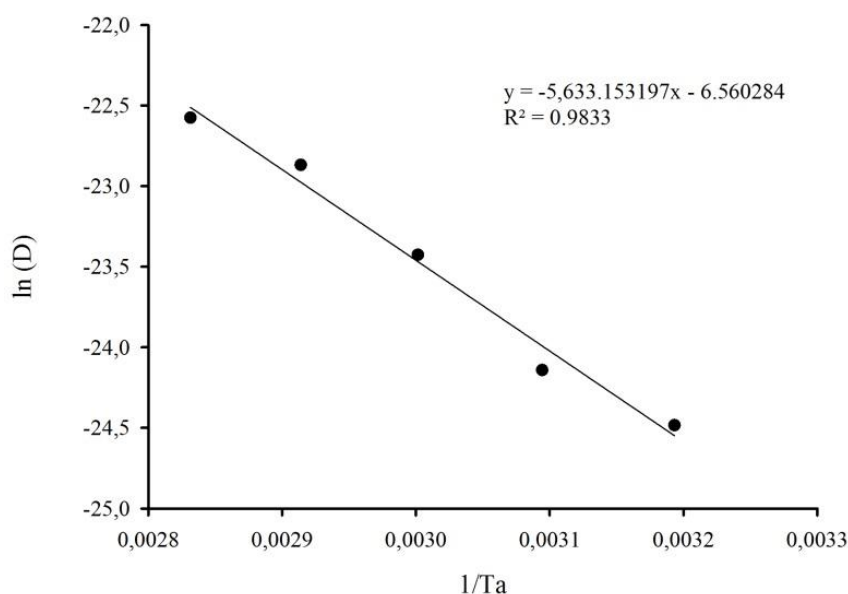


FIGURA 4. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função das diferentes temperaturas durante a secagem dos grãos de niger.

A Equação 17 apresenta os coeficientes da equação de Arrhenius ajustadas para o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de niger, calculados de acordo com a Equação 12.

$$D_i = 1,4155 \cdot 10^{-3} \exp\left(\frac{46,834}{R T_a}\right) \quad (17)$$

A energia de ativação considerando os mecanismos de difusão, para o intervalo de temperatura de 40 a 80 °C, durante a secagem dos grãos de niger foi de 46,834 kJ.mol⁻¹. Valor superior aos de outros produtos oleaginosos, como 24,78 e 28,47 kJ.mol⁻¹ verificados por Sousa et al. (2011) e Duc et al. (2011), trabalhando com nabo forrageiro e canola, respectivamente. Este comportamento pode ser explicado devido a considerável quantidade de proteínas presente nos grãos de niger, que acarreta elevada necessidade de energia para desencadear a secagem.

1.4 CONCLUSÕES

1. Os modelos de Page, Aproximação da difusão e Dois termos, são adequados para a representação da cinética de secagem em camada delgada dos grãos de niger;
2. O coeficiente de difusão efetivo aumentou;
3. A relação do coeficiente de difusão efetivo com a temperatura do ar de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão durante a secagem dos grãos de niger de $46,834 \text{ kJ mol}^{-1}$.

1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; BOTELHO, F.M.; GONELI, A.L.D.; CARVALHO, F.M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v.57, n.5, p.595-601, 2010.
- DUC, L.A.; HAN, J.W.; KEUM, D.H. Thin layer drying characteristics of rapeseed (*Brassica napus* L.). **Journal of Stored Products Research**, v.47, n.1, p.32-38, 2011.
- 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.
- GHANE, S.G.; LOKHANDE, V.H.; NIKAM, T.D. Differential growth, physiological and biochemical responses of niger (*Guizotia abyssinica* Cass.) cultivars to water-deficit (drought) stress. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.34, n.1, p.215, 2012.
- 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.11, n.11, p.64-73, 2009.
- GONELI, A.L.D.; MARTINS, E.A.S.; JORDAN, R.A.; GEISENHOF, L.O.; GARCIA, R.T. Experimental dryer design for agricultural products. **Revista Engenharia Agrícola**, v.36, n.5, p.938-950, 2016.

GORDIN, C.R.B.; MARQUES, R.F.; MASETTO, T.E.; SCALON, S.P.Q. Germinação, biometria de sementes e morfologia de plântulas de *Guizotia abyssinica* Cass.. **Revista Brasileira de Sementes**, v.34, n.4, p.619-627, 2012.

ISQUIERDO, E.P.; BORÉM, F.M.; ANDRADE, E.T.; CORRÊA, J.L.G.; OLIVEIRA, P.D.; ALVES, G.E. Drying kinetics and quality of natural coffee. **Transactions of the ASABE**, v.56, n.3, p.1003-1010, 2013.

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.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, n.1, p.75-97, 1996.

MADUREIRA, I.A.; FIGUEIRÊDO, R.M.F.; QUEIROZ, A.J.M.; FILHO, E.D.S. Cinética de secagem da polpa do figo-da-índia. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.13, n. Especial, p.345-354, 2011.

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, R.A.; OLIVEIRA, W.P.; PARK, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Revista Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.181-189, 2006.

PRATES, M.F.O.; REIS, R.C.; DEVILLA, I.A.; FARIA, R.Q.; LIMA JUNIOR, A.F. Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.14, n.3, p.514-521, 2012.

RAMADAN, M.F. Functional properties, nutritional value and industrial applications of Niger Oilseeds (*Guizotia abyssinica* Cass.). **Critical Reviews in Food Science Nutrition**, v.52, n.1, p.1-8, 2012.

REIS, R.C.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.R.; SERVULO, A.C.O.; SOUZA, A.B.M. Cinética de secagem de folhas de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) via infravermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.12, p.1346-1352, 2012.

RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C.; CHAVES, T.H.; FERREIRA, J.; BESSA, V. Kinetics and thermodynamic properties of the drying process of sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) grains. **African Journal of Agricultural Research**, v.9, n.32, p.2453-2462, 2014.

RESENDE, O.; ULLMANN, R.; SIQUEIRA, V.C.; CHAVES, T.H.; FERREIRA, L.U. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-mansô

(*Jatropha curcas* L.) durante a secagem. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.6, p.1123-1135, 2011.

RISCOLI, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, n.1, p.75-97, 1996.

SANTOS, D.C.; QUEIROZ, A.J.M.; FIGUEIRÊDO, R.M.F.; OLIVEIRA, E.N.A. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, p.223-231, 2013.

SARIN, R.; SHARAMAA, M.; KHANB, A.A. Studies on Guizotia abyssinica L. oil: Biodiesel synthesis and process optimization. **Bioresource Technology**, v.100, n.18, p.4187-4192, 2009.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Difusividade efetiva de grãos e frutos de pinhão-manso. **Semina**, v.33, n.1, p.2919-2930, 2012a.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Drying kinetics of Jatropha seeds. **Revista Ceres**, v.59, n.2, p.171-177, 2012b.

SOUSA, K.A.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; COSTA, L.M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.4, p.883-892, 2011.

CAPÍTULO 2

ISOTERMAS DE DESSORÇÃO E CALOR ISOSTÉRICO DE GRÃOS DE NIGER (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass.)

Resumo: Objetivou-se, com o presente trabalho, determinar as isotermas de dessorção dos grãos de niger, para diferentes condições de temperatura e atividades de água, ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais, selecionando aquele que melhor representa o fenômeno, bem como calcular o calor isostérico para o produto. A higroscopicidade foi determinada pelo método estático gravimétrico, nas temperaturas de 30, 35 e 40 °C e atividades de água entre 0,070 e 0,790 (decimal). Aos dados experimentais, foram ajustados os modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da higroscopicidade de produtos agrícolas. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que: a atividade de água aumenta conforme o teor de água é elevado; com base nos parâmetros estatísticos, os modelos de Chung e Pfof, Henderson modificado, Oswin, Sabbah, Sigma Copace, Halsey, Smith e Copace foram satisfatórios para representação do fenômeno de dessorção dos grãos de niger; o calor isostérico integral de dessorção aumenta de acordo com a redução do teor de água, e seus valores apresentaram variação de 2539,62 a 3081,48 kJ kg⁻¹, na faixa de teor de água de equilíbrio de 0,020 a 0,122 (decimal b.s.).

Palavras-chave: equilíbrio higroscópico, modelagem matemática, teor de água de equilíbrio.

Abstract: The objective of this work was to determine the desorption isotherms of Niger grains, for different temperature conditions and water activities, to adjust different mathematical models to the experimental data, selecting the one that best represents the phenomenon, as well as calculating the heat Isosteric for the product. Hygroscopicity was determined by the gravimetric static method, at temperatures of 30, 35 and 40 °C and water activities between 0.070 and 0.790 (decimal). To the experimental data, the mathematical models frequently used to represent the hygroscopicity of agricultural products were adjusted. From the obtained results, it was concluded that: the water activity increases as the water content is high; Based on the statistical parameters, the models of Chung and Pfof, modified Henderson, Oswin, Sabbah, Sigma Copace, Halsey, Smith and Copace were satisfactory for representation of the desorption phenomenon of niger grains; The total isosteric desorption heat increased according to the reduction of the water content, and its values varied from 2539.62 to 3081.48 kJ kg⁻¹, in the range of equilibrium water content of 0.020 to 0.122 (decimal bs).

Keywords: hygroscopic equilibrium, mathematical modeling, equilibrium water content.

2.1 INTRODUÇÃO

Os grãos de niger (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass.) são caracterizados pela grande quantidade de óleo, cerca de 30 a 50% da massa do grão (GELETA et al., 2011). Além de fornecer um óleo comestível, caracterizado por elevados índices de ácido linoleico e oleico, que conferem estabilidade e valor nutricional (YADAV et al., 2012), os grãos ainda possuem cerca de 28% de proteínas em sua composição (FATIMA et al., 2015). A espécie se adapta bem as condições edafoclimáticas brasileiras, sendo utilizada principalmente para cobertura do solo no outono/inverno, permitindo acréscimo de matéria orgânica (CARNEIRO et al., 2008).

O niger, assim como outros produtos agrícolas, apresenta capacidade de ceder ou adsorver água do ambiente, buscando o equilíbrio entre seu conteúdo de água e as condições do ar que o circunda. Neste contexto, a temperatura e a umidade relativa do ar desempenham importante função na minimização de perdas de qualidade do produto (BORGES et al., 2009).

A qualidade pode ser diretamente influenciada pelas relações existentes entre o produto, a temperatura e a umidade relativa (OLIVEIRA et al., 2013). Segundo Heldman e Hartel (2000) a relação entre a umidade relativa do ar e o teor de água de equilíbrio alteram a atividade de água do produto quando submetido ao processo de secagem. Assim, a atividade de água é um dos parâmetros mais relevantes na análise de produtos biológicos, pois está estreitamente relacionada à qualidade e a estabilidade destes produtos (PARK et al., 2001).

Uma isoterma de sorção ou curva de umidade de equilíbrio descreve, em uma umidade específica, a relação de equilíbrio de uma quantidade de água sorvida por componentes do material biológico e a pressão de vapor ou umidade relativa, a uma dada temperatura (PARK et al., 2001; RESENDE et al., 2006a).

As isotermas são obtidas por meio de modelos matemáticos que relacionam o teor de água e atividade de água. Os modelos matemáticos utilizados para essa representação devem ter um bom ajuste para predizer, com precisão, o teor de água de equilíbrio para determinada faixa de temperatura e umidade relativa do ar.

A partir das isotermas de sorção torna-se possível realizar análises do comportamento de sorção em sistemas biológicos, em relação à entalpia, entropia, teoria da compensação e calor isostérico (THYS et al., 2010). Estas propriedades termodinâmicas influem na compreensão dos cálculos de energia ligados a transferência de calor e massa, além de ajudar no entendimento das propriedades da água (OLIVEIRA et al., 2013).

Dentro forma, o calor isostérico de dessorção é importante para os processos de secagem, porque permite estimar a quantidade mínima de calor requerida para remover determinada quantidade de água do produto, além de representar um adicional de energia decorrente das forças de ligação entre a superfície da substância adsorvente e a água (RESENDE et al., 2006a).

Ao longo dos anos vários autores têm estudado isotermas de sorção e calor isostérico de produtos agrícolas, como: arroz em casca (RESENDE et al., 2006b), frutos de crambe (COSTA et al., 2013) e sementes de algodão (OLIVEIRA et al., 2013). Estes estudos possibilitam a obtenção de dados para estabelecer o teor de água de equilíbrio e estimar a energia necessária no processo de secagem, assim como, informações sobre os mecanismos de sorção e a interação entre os componentes do alimento e a água (ALVES et al., 2015).

Diante da importância do conhecimento da higroscopicidade dos produtos agrícolas para processos de secagem, objetivou-se obter as isotermas de dessorção e o calor isostérico de dessorção dos grãos de niger ajustando diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais, selecionando aquele que melhor representa o fenômeno.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no laboratório de propriedades físicas de produtos agrícolas da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD). Os grãos de niger (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass.) utilizados na condução do experimento foram colhidos, trilhados e selecionados manualmente.

Posteriormente a seleção, determinou-se o teor de água inicial do produto, que foi aproximadamente 0,56 (decimal base seca), por meio do método

gravimétrico, utilizando estufa a 105 ± 1 °C, durante 24 h, em duas repetições (Brasil, 2009).

A dessorção dos grãos pelo método estático ocorreu em condições controladas de temperatura (30, 35 e 40 °C) e umidade relativa entre 7 e 78,9%, sendo realizada até que as amostras (aproximadamente 3,5 g cada) atingissem o teor de água de equilíbrio, nestas condições. As temperaturas experimentais contemplam a faixa de temperatura do cerrado brasileiro que ao longo do ano oscila de 22 a 40 °C.

O teor de água dos grãos de niger foi obtido pelo método estático, onde as amostras foram envolvidas em tecido permeável (voile), permitindo a troca de vapor de água e colocadas no interior dos dessecadores contendo soluções saturadas dos sais: LiCl, CaCl₂, NaI, MgCl₂, NaBr, (Na (NO₃)₂) e KBr, que proporcionaram variação na umidade de relativa de 7,0 a 78,9 %.

A temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas através de um data logger digital alocado no interior dos dessecadores, os quais, permaneceram em câmara incubadora tipo B.O.D. (Biochemical Oxygen Demand), nas temperaturas especificadas, durante todo o procedimento.

Durante a determinação do equilíbrio higroscópico, as amostras foram pesadas periodicamente em balança analítica com precisão de 0,001 até atingir massa constante, durante aproximadamente três pesagens consecutivas.

Aos dados experimentais do teor de água de equilíbrio dos grãos de *Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass. obtidos para cada condição do ar foram ajustados os modelos matemáticos frequentemente utilizados na representação da higroscopicidade de produtos agrícolas (Tabela 1).

TABELA 1. Modelos matemáticos utilizados para predizer o fenômeno da higroscopicidade de produtos agrícolas.

Designação do modelo	Modelo	Eq.
$X_e^* = \left\{ 1 / \left[(1 - a_w) \cdot (1 / a \cdot b + ((a - 1) / a \cdot b)) \right] \right\}$	BET	(1)
$X_e^* = a - b \cdot \ln \left[-(T + c) \cdot \ln(a_w) \right]$	Chung e Pfof	(2)
$X_e^* = \exp \left[a - (b \cdot T) + (c \cdot a_w) \right]$	Copace	(3)
$X_e^* = \left[1 / (a \cdot T^b + a_w^c) \right]$	Coparri	(4)
$X_e^* = \left\{ \ln(1 - a_w) / \left[-a \cdot (T + b) \right] \right\}^{1/c}$	Henderson Modificado	(5)
$X_e^* = (a + b \cdot T) / \left[(1 - a_w) / a_w \right]^{1/c}$	Oswin Modificado	(6)
$X_e^* = a \cdot (a_w \cdot b / T^c)$	Sabbah	(7)
$X_e^* = \exp \left\{ a - (b \cdot T) + \left[c \cdot \exp(a_w) \right] \right\}$	Sigma Copace	(8)
$X_e^* = (\exp(a - b \cdot T) / -\ln(a_w))^{1/c}$	Halsey Modificado	(9)
$X_e^* = \left[a - b \cdot T - c \cdot \ln(1 - a_w) \right]$	Smith	(10)

em que:

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

a_w : atividade de água, decimal;

T: temperatura, °C; e

a, b, c: coeficientes que dependem do produto.

Para o ajuste de modelos matemáticos foi realizada análise de regressão não linear, pelo método Gauss Newton, utilizando-se o programa Estatística 8.0. Para verificar o grau de ajuste de cada modelo foram consideradas as magnitudes do desvio padrão da estimativa (SE), do erro médio relativo (P) e do coeficiente de determinação R^2 . Para avaliação e seleção dos modelos consideraram-se valores do erro médio relativo inferiores a 10% (MOHAPATRA e RAO, 2005).

Os valores de P, SE e o teste de Qui-quadrado para cada modelo foram calculados pelas Equações 11 e 12.

$$P = \frac{100}{n} \sum \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (11)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (12)$$

em que:

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor calculado pelo modelo;

n: número de observações experimentais; e

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

Os valores de atividade de água foram obtidos com o auxílio da Equação 13 (*significativo a 5%, pelo teste t):

$$X_e^* = \exp[-3,4241 * -(0,0048 * T) + (1,8586 * a_w)] \quad (13)$$

em que:

X_e: Teor de água de equilíbrio, % b.s.;

a_w: atividade de água, decimal; e

T: temperatura, °C.

Os valores de calor isostérico líquido de sorção (ou entalpia diferencial) para cada teor de água de equilíbrio, foram obtidos por meio da equação Clausius-Clayperon (IGLESIAS e CHIRIFE, 1976) na Equação 14.

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial T} = \frac{\Delta h_{st}}{RT_a^2} \quad (14)$$

em que:

T_a: temperatura absoluta, K;

Δh_{st}: calor isostérico líquido de sorção, kJ kg⁻¹; e

R: constante universal dos gases, $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ sendo para o vapor d'água $0,4619 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Ao integrar a Equação 14 e assumindo que o calor isostérico líquido de sorção é independente da temperatura, obtém-se o calor isostérico líquido de sorção para cada teor de água de equilíbrio, como indicado na Equação 15 (WANG e BRENNAN, 1991).

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{\Delta h_{st}}{R}\right) \cdot \frac{1}{T_a} + C \quad (15)$$

em que:

C: coeficiente do modelo.

Os valores de atividade de água, temperatura e teor de água de equilíbrio foram obtidos a partir das isotermas de dessorção dos grãos de niger utilizando o modelo de melhor ajuste aos dados experimentais. Obteve-se o calor isostérico integral de sorção adicionando-se aos valores de calor isostérico líquido de sorção, o valor do calor latente de vaporização da água livre, como segue na Equação 16.

$$Q_{st} = \Delta h_{st} + L = a \cdot \exp(-b \cdot X e^*) + L \quad (16)$$

em que:

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

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

a, b: coeficientes do modelo.

O calor latente de vaporização da água livre (L), utilizado na Equação 16, foi calculado utilizando a temperatura média (T) na faixa em estudo em °C, por meio da Equação 17.

$$L = 2502,2 - 2,39T \quad (17)$$

em que:

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

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, são apresentados os modelos ajustados aos valores de teor de água de equilíbrio higroscópico, para grãos de niger, obtidos por dessorção, para diferentes condições de temperatura e atividade de água.

TABELA 2. Coeficientes dos modelos ajustados aos teores de água de equilíbrio higroscópico para grãos de niger com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE) e erro médio relativo (P).

Modelos	Coeficientes			R^2	SE Decimal	P (%)
	a	b	c			
BET	226,7426*	34,8798*	-	0,9610	0,009	12,82
Chung e Pfof	0,2345*	0,0397*	46,7968 ^{NS}	0,9944	0,004	5,25
Copace	-3,4241*	0,0048*	1,8586*	0,9939	0,004	6,59
Coparri	1,6560 ^{NS}	0,4453 ^{NS}	-1,8218*	0,9275	0,013	20,48
Henderson Mod.	-0,0003*	-2,48x10 ⁵ *	1,7872*	0,9922	0,004	6,71
Oswin	0,0819*	-0,0003*	2,4901*	0,9970	0,003	4,12
Sabbah	0,3602*	0,7780*	0,2766	0,9922	0,006	9,80
Sigma Copace	-4,4443*	0,0031 ^{NS}	1,1125*	0,9890	0,005	8,71
Halsey	-4,9487*	0,0044 ^{NS}	1,7512*	0,9936	0,004	6,62
Smith	0,0381*	0,0003*	0,0612*	0,9947	0,004	5,91

*significativo a 0,05 pelo teste t, ^{NS} não significativo

Os valores aceitáveis de P devem ser inferiores a 10% (MOHAPATRA e RAO, 2005). Desta forma, os modelos de BET e Coparri são os únicos que não apresentaram magnitudes aceitáveis. Os demais modelos podem ser recomendados para descrever o processo de dessorção dos grãos de niger.

Os parâmetros estatísticos (coeficiente de determinação e desvio padrão da estimativa) auxiliam na tomada de decisão de escolha do modelo a ser utilizado para representação do fenômeno de dessecção.

Dentre os dez modelos ajustados, oito apresentaram valores de coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,98. Apenas os modelos de BET e Copparri apresentaram R^2 de 0,96 e 0,92, respectivamente (Tabela 2).

Analisando o desvio padrão da estimativa (SE), nota-se que os menores valores ocorrem para os modelos de Chung e Pfof, Copace, Henderson Modificado, Oswin, Halsey e Smith. Sabendo que à medida que os valores de SE são menores, melhor será o ajuste dos modelos aos dados experimentais (SIQUEIRA et al., 2012), os seis modelos mencionados apresentam melhores valores para este critério de avaliação.

Dentre os oito modelos que apresentaram bom ajuste, utilizou-se o de Copace, para representar a dessecção dos grãos de niger, por ser um modelo simples e que apresenta alto coeficiente de determinação e baixos valores de SE e P.

O modelo de Copace, já foi utilizado para descrever a dessecção de vários produtos agrícolas, como frutos de crambe (COSTA et al., 2013), sementes de nabo forrageiro (SOUZA et al., 2013) e aquênios de cajuzinho-do-cerrado (BARBOSA et al., 2016). Todas essas espécies, assim como o niger, possuem altas quantidades de óleo em sua composição.

Na Figura 1, são apresentados os valores experimentais de teor de água de equilíbrio dos grãos de niger, obtidos por dessecção, tal como suas isotermas estimadas pelo modelo de Copace. As isotermas calculadas pelo modelo de Copace para os grãos de niger, apresentam comportamento exponencial podendo ser classificadas como tipo III (IUPAC, 1985), assim como as isotermas calculadas para frutos de *Crambe abyssinica*, por Costa et al. (2013), para sementes de *Buchenavia capitata* Vahl Eichler, por Costa et al. (2015) e frutos de *Coffea canephora* por Corrêa et al. (2014).

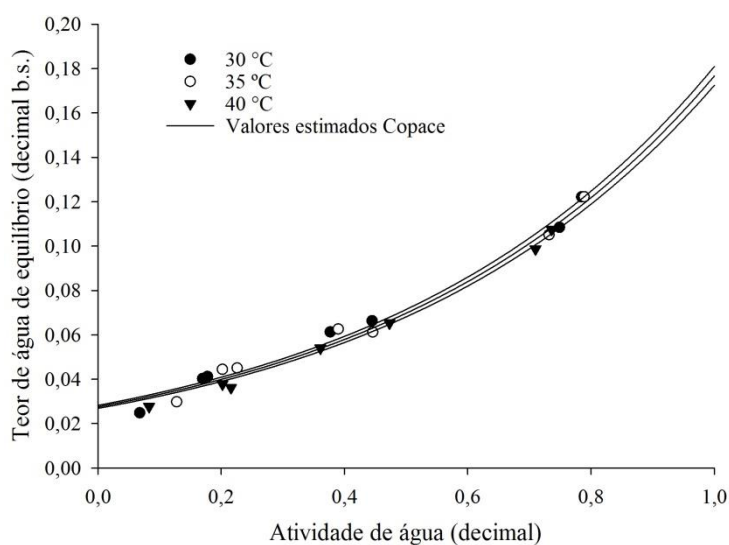


FIGURA 1. Valores experimentais de teor de água de equilíbrio e isotermas de dessorção estimadas pelo modelo de Copace para grãos de niger, em diferentes condições de temperatura e atividades de água.

A maior parte dos produtos agrícolas possui isotermas com forma típica sigmoideal (tipo II), assim como observado por Resende et al. (2006a) e Oliveira et al. (2014), estudando sementes de arroz em casca. O comportamento encontrado para os grãos de niger faz referência aos principais constituintes do produto, os solutos, que apresentam pouca afinidade pelas moléculas de água (IUPAC, 1985), o que é perfeitamente explicável por se tratar de um produto que chega a apresentar até 50% da massa do grão em óleo (GELETA et al., 2011).

A influência da temperatura sobre a higroscopicidade dos grãos de niger segue de acordo com o observado para a maioria dos produtos agrícolas, ou seja, para atingir o mesmo teor de água de equilíbrio aumentando-se a temperatura, deve-se, necessariamente, aumentar a umidade relativa (CORRÊA et al., 2014).

Os valores da atividade de água dos grãos de niger obtidos por dessorção para diferentes teores de água de equilíbrio e temperaturas de 30, 35 e 40 °C estão expressos na Tabela 3. De modo geral, verifica-se que com o aumento do teor de água, houve acréscimo da atividade de água, o mesmo comportamento é observado de acordo com o aumento da temperatura.

TABELA 3. Valores de atividade de água (decimal) estimados pelo modelo de Copace, em função da temperatura e do teor de água de equilíbrio (Xe).

Xe (% b.s.)	Temperatura		
	30°C	35°C	40°C
3,0	0,0291	0,0420	0,0549
3,6	0,1339	0,1468	0,1597
3,8	0,1574	0,1703	0,1832
4,0	0,1901	0,2030	0,2159
4,1	0,2032	0,2161	0,2290
4,4	0,2444	0,2573	0,2702
4,5	0,2513	0,2642	0,2771
5,4	0,3490	0,3620	0,3749
6,1	0,4163	0,4292	0,4421
6,1	0,4176	0,4305	0,4434
6,3	0,4289	0,4418	0,4547
6,5	0,4520	0,4649	0,4778
6,6	0,4601	0,4730	0,4859
9,9	0,6738	0,6867	0,6997
10,5	0,7079	0,7208	0,7337
10,7	0,7196	0,7325	0,7454
10,8	0,7244	0,7373	0,7502
12,2	0,7883	0,8012	0,8142
12,2	0,7889	0,8018	0,8147

A atividade de água foi estimada pelo modelo de Copace (Equação 13), para os teores de água de equilíbrio de 3,0% a 12,2% (b.s.) e para as temperaturas de 30 °C, 35 °C e 40°C.

Na Figura 2, são apresentados os valores do calor isostérico integral de dessorção em função do teor de água de equilíbrio (decimal b.s.), obtidos a partir da Equação 16.

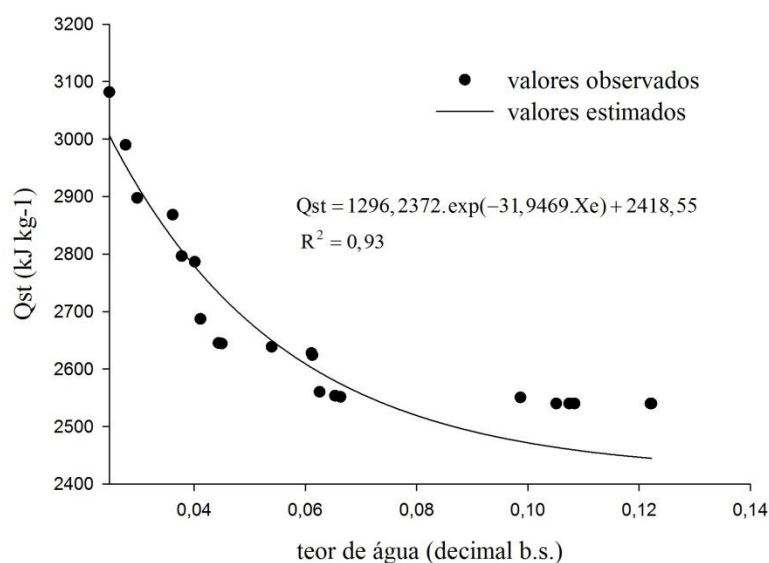


FIGURA 2. Valores experimentais e estimados do calor isostérico integral de dessorção (Q_{st}) estimados em função do teor de água de equilíbrio dos grãos de niger.

O calor isostérico integral de dessorção dos grãos de niger é dependente do teor de água, mostrando que com a redução do teor de água é necessário maior quantidade de energia para a retirada de água do produto, devido as forças de ligação entre os constituintes do produto e água. Este comportamento já foi verificado por diversos autores para os mais diversos produtos agrícolas, como, grãos de milho da cultivar AG 7088 (SMANIOTTO et al., 2012), sementes de algodão com línter e sem línter (OLIVEIRA et al., 2013) e sementes de pêra espinhosa (HASSINI et al., 2015).

O calor isostérico requerido para a remoção de água dos grãos de niger para a faixa de teor de água de equilíbrio de 0,020 a 0,122 (decimal b.s.) variou de 3081,48 a 2539,62 kJ kg^{-1} . Diferente do encontrado por Goneli et al. (2016) trabalhando com mamona na faixa de 0,047 a 0,189 (decimal b.s.) de teor de água, que obtiveram valores de calor isostérico integral variando de 3324 a 2486 kJ kg^{-1} . Os valores de calor isostérico podem variar de acordo com a composição e características físicas de cada produto, portanto, mesmo a mamona possuindo alto teor de óleo assim como o niger, apresenta barreira física mais densa, o que leva à necessidade de maior quantidade de energia para que aconteça a remoção de água.

Resende et al. (2006a), identificou que o calor isostérico integral de dessorção para grãos de feijão na faixa de 0,101 a 0,217 (decimal, b.s.) variou de

3961 a 2718 kJ kg⁻¹, valores superiores aos encontrados neste trabalho. Provavelmente devido a maior quantidade de carboidratos e baixo conteúdo lipídico, que podem influenciar na energia requerida no processo de dessecção dos grãos.

2.4 CONCLUSÕES

1. Os modelos de Chung e Pfost, Henderson modificado, Oswin, Sabbah, Sigma Copace, Halsey, Smith e Copace foram satisfatórios para representação do fenômeno de dessecção dos grãos de niger;
2. A atividade de água aumenta conforme o teor de água é elevado;
3. O calor isostérico integral de dessecção aumenta de acordo com a redução do teor de água de equilíbrio.

2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D.P.; RESENDE, O.; COSTA, L.M.; MENDES, U.C. Higroscopicidade das sementes de feijão adzuki. **Científica**, v.41, n.2, p.130-137, 2013.

ALVES, T.P.; FÓZ, H.D.; NICOLETI, J.F. Isotermas de dessecção de pimentão verde e energia envolvida no processo. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.18, n.2, p.137-145, 2015.

BARBOSA, K.F.; SALES, J.F.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C.; ZUCHI, J.; SOUSA, K. A. Desorption isotherms and isosteric heat of 'cajuzinho-do-cerrado' achenes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.5, p.481-486, 2016.

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 Florestalis**, v.37, n.84, p.475- 481, 2009.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, p.395, 2009.

CARNEIRO, M.A.C.; CORDEIRO, M.A.S.; ASSIS, P.C.R.; MORAES, E.S.; PEREIRA, H. S.; PAULINO, H.B.; SOUZA, E.D. Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de cerrado. **Bragantia**, v.67, n.2, p.455-462, 2008.

CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; BOTELHO, S.C.C.; GONELI, A.L.D. Isotermas de sorção de água de frutos de *Coffea canephora*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.10, p.1047-1052, 2014.

CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; RESENDE, O.; MARTINAZO, 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.2, p.141-149, 2005.

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.415-418, 2013.

COSTA, L.M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C; SOUZA, K.A. Isotermas e calor isostérico de sementes de *Buchenavia capitata* (Vahl) Eichler. **Revista Ciência Agrônômica**, v.46, n.3, p.516-523, 2015.

FÁTIMA, A.; VILLANI, T.S.; KOMAR, S.; SIMON, J.E.; JULIANI, H.R. Quality and chemistry of niger seeds (*Guizotia abyssinica*) grown in the United States. **Industrial Crops and Products**, v.75, p.40-42, 2015.

GELETA, M.; STYMNE, S.; BRYNGELSSON, T. Variation and inheritance of oil content and fatty acid composition in niger (*Guizotia abyssinica*). **Journal of Food Composition and Analysis**, v.24, n.7, p.995-1003, 2011.

GONELI, A. L. D. **Variação das propriedades físicas-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**. 2008. 186f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

HASSINI, L.; BETTAIEB, E.; DESMORIEUX, H.; TORRES, S.S.; TOUIL, A. Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear seeds. **Industrial Crops and Products**, v.67, p.457-465, 2015.

HELDMAN, D.R.; HARTEL, R.W. **Principles of food processing**. New York: Chapman & Hall, 2000. 218p.

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.

IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984), Pure & Applied Chemistry, v.57, n.4, p.603-619, 1985.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, 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, D.E.C.; RESENDE, O.; CAMPOS, R.C.; DONADON, J.R. Obtenção e modelagem das isotermas de dessorção e do calor isotérico para sementes de arroz em casa. **Científica**, v.42, n.3, p.203-210, 2014.

OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T.A.S.; CAMPOS, R.C. Isotermas e calor isotérico das sementes de algodão com línter e sem línter. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.15, n.3, p.283-292, 2013.

PARK, K.J.; BIN, A.; BROD, F.P.R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para a pêra bartlett (*Pyrus sp.*) com e sem desidratação osmótica. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.21, n.1, p.73-77, 2001.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; RIBEIRO, D.M. Isotermas e calor isotérico de sorção do feijão. **Ciência e Tecnologia dos Alimentos**, v.26, n.3, p.626-631, 2006a.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; MARTINAZZO, A.P.; RIBEIRO, R.M. Isotermas e calor isotérico de dessorção do arroz em casca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.31, n.1, p.86-94, 2006b.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Drying kinetics of Jatropha seeds. **Revista Ceres**, v.59, n.2, p.171-177, 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.

SOUZA, K.A.; RESENDE, O.; COSTA, L.M. Isotermas de dessorção das sementes de nabo forrageiro obtidas pelos métodos dinâmico e estático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, p.216-222, 2013.

THYS, R. C. S. et al. Adsorption isotherms of pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds) starch and thermodynamic analysis. *Journal of Food Engineering*, Londres, v. 100, n. 3, p. 468-473, 2010.

WANG, N.; BRENNAN, J.G. Moisture sorption isotherm characteristics of potato at four temperatures. **Journal of Food Engineering**, v.14, n.4, p.269-287, 1991.

YADAV, S.; HUSSAIN, Z.; SUNEJA, P.; NIZAR, M.A.; YADAV, S.K.; DUTTA, M. Genetic divergence studies in niger (*Guizotia abyssinica*) germplasm. **Biomass and Bioenergy**, v.44, p.64-69, 2012.

CAPÍTULO 3

PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS DE NIGER

Resumo: Objetivou-se com o presente trabalho avaliar o efeito da secagem sobre as características físicas dos grãos de niger. Os grãos de niger foram colhidos com teor de água de aproximadamente 0,54 decimal (base seca, b.s.). Após a colheita, os grãos foram submetidos à secagem em estufa com circulação forçada de ar, a temperatura de 40 °C. A redução do teor de água foi acompanhada por meio da perda de massa, até 0,09 decimal (b.s.). Foram determinadas as propriedades físicas: massa específica aparente, massa específica unitária e porosidade, além dos índices de contração volumétrica da massa e unitária. Com base nos resultados obtidos conclui-se que a redução do teor de água proporciona redução da massa específica unitária e da porosidade, e aumento da massa específica aparente. A contração volumétrica da massa e a contração volumétrica unitária foram influenciadas pela redução do teor de água, levando à redução de seus valores em torno de 33 e 17%, respectivamente. A contração volumétrica da massa e dos grãos pode ser satisfatoriamente representada por um modelo de regressão Linear.

Palavras-chave: índice de contração volumétrica, massa específica, porosidade.

Abstract: The objective of this work was to evaluate the effect of drying on the physical characteristics of Niger grains. Niger grains were harvested at a water content of approximately 0.54 decimal (dry basis, b.s.). After the harvest, the grains were submitted to oven drying with forced air circulation, at 40 ° C. The reduction of the water content was accompanied by mass loss, up to 0.09 decimal (b.s.). The physical properties were determined: apparent specific mass, unit specific mass and porosity, besides the volumetric contraction rates of the mass and unit. Based on the results obtained it is concluded that the reduction of the water content provides reduction of the unit specific mass and the porosity, and increase of the specific specific mass. The volumetric contraction of the mass and the unit volume contraction were influenced by the reduction of the water content, leading to the reduction of its values around 33 and 17%, respectively. The volumetric contraction of the mass and the grains can be satisfactorily represented by a linear regression model.

Keywords: volumetric contraction index, specific mass, porosity

3.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, grande parte dos países desenvolvidos juntamente com os emergentes tem demonstrado grande preocupação com a matriz energética mundial. Sabe-se que, grande parte da energia consumida no mundo é provinda de combustíveis de origem fóssil, de fontes não renováveis. Desta forma, indústrias e pesquisadores buscam avaliar novas fontes energéticas para produção de biodiesel, proporcionando segurança energética, com foco no suprimento de combustíveis capaz de atender a crescente população mundial (DABDOUB et al., 2009).

Com a expansão da matriz energética e os investimentos na agricultura de energia, ocorreu a popularização do uso de biomassas e biocombustíveis, aumentando o uso de materiais graxos, sendo o niger (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass.) um produto com características potenciais para utilização neste mercado.

O niger é uma planta dicotiledônea, herbácea anual, com folhas opostas, sésseis, ovaladas-lanceoladas, serrilhadas, que pode atingir um porte de 0,5 a 1,5 m de altura (MAUAD et al., 2015). Apresenta ótima qualidade do perfil de ácidos graxos poli-insaturados, composto principalmente pelo ácido linoleico, cerca de 70 % (RAMADAN e MÖRSEL, 2003). Em regiões do Brasil onde o período de semeadura de culturas tradicionais é limitado devido a restrições hídricas, a cultura tem sido estudada como uma opção para compor sistema de rotação de cultura na safrinha (FRANCHINI, 2014).

Como a maioria dos produtos agrícolas, o niger, é colhido com alto teor de água, necessitando do processo de secagem para prolongar o período de armazenamento e diminuir a proliferação de microrganismos e de insetos pragas. Este processo baseia-se na transferência simultânea de calor e massa entre o produto e o ar de secagem (BROOKER et al., 1992), sendo um dos principais métodos utilizados para redução da atividade de água. Além disso, reduz as modificações químicas e físicas que podem ocorrer durante o armazenamento, contribuindo para a manutenção de qualidade do produto.

As propriedades físicas dos produtos agrícolas desempenham papel importante na otimização industrial, nos estudos de aerodinâmica, desenho e

dimensionamento de equipamentos utilizados nas operações de colheita e pós-colheita (KIBAR, 2008; MIR, et al., 2013).

O conhecimento da massa específica aparente permite realizar correto dimensionamento de silos, secadores, transportadores de grãos e sementes, podendo também ser utilizado para determinar danos causados por insetos, bem como deterioração fúngica em produtos armazenados (MIR et al., 2013). Quando há maior quantidade de poros, ou seja, menor massa de produto em dado volume constante, tem-se menores valores de massa específica aparente (OLIVEIRA et al., 2014). Já a porosidade tem expressiva importância no dimensionamento de ventiladores utilizados nos sistemas de secagem e aeração, pois exerce influência sobre a pressão de ar que passa pela massa de produto (SILVA et al., 2000), e pode ser descrita como a relação entre o volume ocupado pelo ar existente na massa granular e o volume total ocupado por esta massa de grãos.

Nas últimas décadas diversos autores tem buscado estudar as propriedades físicas de espécies agrícolas, como, frutos de mamona (GONELI et al., 2011), frutos de pinhão-manso (SIQUEIRA et al., 2012), grãos de soja (OLIVEIRA et al., 2013) e frutos de amendoim (ARAÚJO et al., 2015), estes estudos, geralmente são direcionados a obtenção da massa específica aparente e unitária, porosidade intergranular, massa de mil sementes, forma, tamanho e alterações volumétricas ocorridas nos materiais biológicos durante e após o processo de secagem.

Embora o niger seja cultivado há muito tempo em outros países, no Brasil, vem ganhando destaque nos últimos anos. Pesquisas relacionadas a propriedades físicas desse produto são limitadas, e, portanto, necessárias. Diante do exposto, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar as seguintes propriedades físicas dos grãos de niger: massa específica aparente, unitária, porosidade, índice de contração volumétrica e unitária em função do teor de água.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido no Laboratório de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, da Faculdade de Ciências Agrárias - FCA, pertencente à Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, no município de

Dourados, MS. Foram utilizados grãos de niger cultivados na Fazenda Experimental da UFGD.

Os capítulos de niger foram colhidos manualmente, selecionando aqueles que já haviam atingido a maturação e apresentavam visualmente o mesmo tamanho. Após a colheita, os capítulos de niger seguiram para debulha e separação manual, em seguida os grãos foram separados, retirando-se todos aqueles defeituosos, que poderiam mascarar os reais resultados da pesquisa, desta forma, evitou-se esse tipo de interferência.

Após a debulha os grãos de niger foram acondicionados em sacos plásticos de polipropileno de baixa densidade e armazenados em câmara do tipo B.O.D. à temperatura de 4 °C, para homogeneizar o teor de água do produto e evitar trocas de água com o ambiente externo. O teor de água inicial apresentado pelos grãos de niger foi de 0,54 b.s. (decimal, base seca), determinado pelo método gravimétrico, a 105 ±1 °C, durante 24h, em duas repetições (BRASIL, 2009).

Para obtenção de diferentes teores de água os grãos de niger foram secos em estufa com circulação forçada de ar, a temperatura de 40 °C. A redução do teor de água foi realizada pelo método gravimétrico, conhecendo a massa e o teor de água inicial do produto, com auxílio de uma balança com resolução de 0,01 g, até os grãos atingissem o teor de água final de aproximadamente 0,09 decimal b.s..

A massa específica aparente (ρ_{ap}) dos grãos de niger foi determinada utilizando uma balança semi-analítica eletrônica de resolução de 0,01 g e um recipiente (proveta) com capacidade de 500 mL, onde se obtêm a relação massa/volume.

A massa específica unitária foi obtida de forma direta com auxílio de balança de precisão de resolução 0,001 g, balão volumétrico de baixa capacidade (5 mL) e tolueno. Foram depositados 50 grãos de niger previamente com sua massa determinada no interior do balão, e posteriormente foi adicionado o tolueno com auxílio de micropipeta. Através do conhecimento da massa dos grãos, do volume e massa do balão, bem como da densidade do líquido, por diferença obteve-se o volume de grãos. Por meio da relação massa/volume dos grãos, dividido pela quantidade de grãos depositados dentro do balão foi obtida a massa específica unitária.

A porosidade da massa dos grãos de niger foi determinada indiretamente por meio da Equação 1.

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_u} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

em que:

ε : porosidade, %; e

ρ_{ap} : massa específica aparente, kg m^{-3} .

Para a determinação do índice de contração volumétrica da massa dos grãos de niger foi calculada a razão entre o volume do produto em determinado instante pelo volume inicial do mesmo (Equação 2), no decorrer do processo de secagem.

$$\psi = \frac{V}{V_0} \quad (2)$$

em que:

ψ : índice de contração, adimensional;

V : volume (da massa ou do grão) em determinado instante, mm^3 ; e

V_0 : volume inicial (da massa ou do grão), mm^3 .

O acompanhamento da redução do volume da massa foi realizado com base em um volume inicial (500 mL) de grãos de niger, o qual foi verificado a redução desse volume, no decorrer da secagem, transferindo o mesmo para uma proveta de 500 mL, e anotando o volume, em mL para diferentes teores de água durante a secagem. Para cada teor de água foram realizados seis determinações do volume da massa, na proveta de 500 mL, em que o volume da massa, para cada teor de água, foi determinado pela média das seis medições.

Aos dados experimentais do índice de contração volumétrica da massa dos grãos de niger foram ajustados os modelos matemáticos apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Modelos matemáticos utilizados para representar o índice de contração volumétrica da massa dos grãos de niger em função do teor de água.

Referência	Modelo	Eq.
Bala e Woods (1984) mod.	$\psi = 1 - A \{1 - \exp[-B(X_0 - X)]\}$	(3)
Corrêa et al. (2004)	$\psi = 1 / [A + B \exp(X)]$	(4)
Exponencial	$\psi = A \exp(BX)$	(5)
Linear	$\psi = A + BX$	(6)
Polinomial	$\psi = A + BX + CX^2$	(7)
Lang e Sokhansanj (1993)	$\psi = a + B(X - X_0)$	(8)

em que:

ψ : índice de contração, adimensional;

X : teor de água do produto, decimal b.s.;

X_0 : teor de água inicial do produto, decimal b.s.; e

a, b, c : parâmetros que dependem do produto, adimensional.

Os dados experimentais referentes à massa específica aparente, unitária e porosidade dos grãos de niger, foram submetidos à análise de regressão linear. Para o ajuste dos modelos de regressão, foi utilizado o programa computacional SigmaPlot 11.0.

Os dados experimentais de contração da massa foram analisados por meio de regressão não linear, pelo método de Gauss-Newton, empregando o programa computacional Statística 8.0 para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais.

Para análise do grau de ajuste de cada modelo, para representar o índice de contração volumétrica e unitária, foram consideradas as magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE). Que foram calculados de acordo com as Equações 9 e 10.

$$P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y - \hat{Y}}{Y} \right) \quad (9)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (10)$$

em que:

n: número de observações experimentais;

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo; e

GLR: graus de liberdade do modelo.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentados os valores experimentais e estimados da massa específica unitária dos grãos de niger, para diferentes teores de água durante a secagem. Observa-se na Figura 1, decréscimo dos valores da massa específica unitária dos grãos de niger ao final do processo de secagem, que fica evidenciado quando o teor de água atinge, aproximadamente, em 0,15 (decimal b.s.). Para os teores de água acima de 0,15 os valores de massa específica unitária oscilaram moderadamente. Este fenômeno foi representado por um modelo de regressão polinomial de segunda ordem.

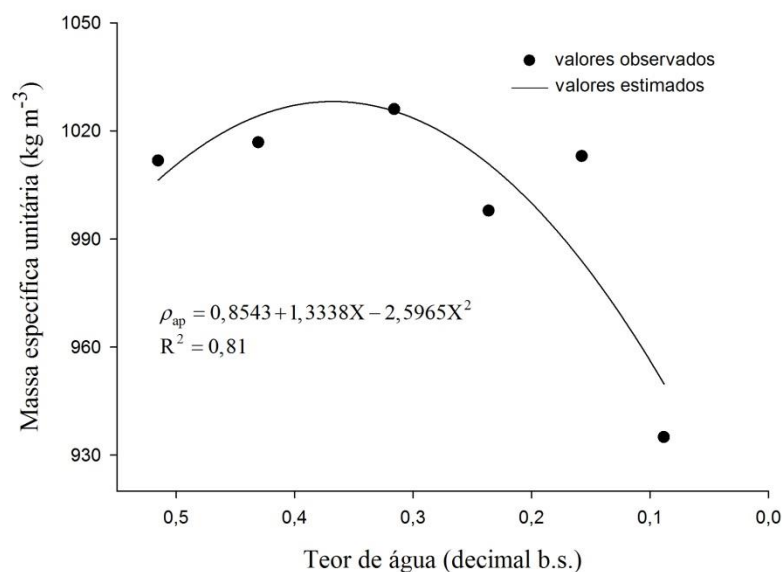


FIGURA 1. Valores experimentais e estimados da massa específica unitária dos grãos de niger em função do teor de água.

Nota-se que os valores experimentais de massa específica unitária dos grãos de niger variaram de 1026,04 a 934,98 kg m⁻³, para a faixa de teor de água de 0,52 a 0,08 decimal base seca, respectivamente.

Verifica-se que a massa específica unitária dos grãos de niger tende a diminuir no final do processo de secagem. Este comportamento é semelhante ao encontrado por Goneli et al. (2008) trabalhando com frutos de mamona, Siqueira et al. (2012) trabalhando com sementes de pinhão manso e Araújo et al. (2014 e 2015) trabalhando com sementes e frutos de amendoim.

Na Figura 2 estão representados os valores observados e estimados da massa específica aparente dos grãos de niger, em diferentes teores de água durante o processo de secagem.

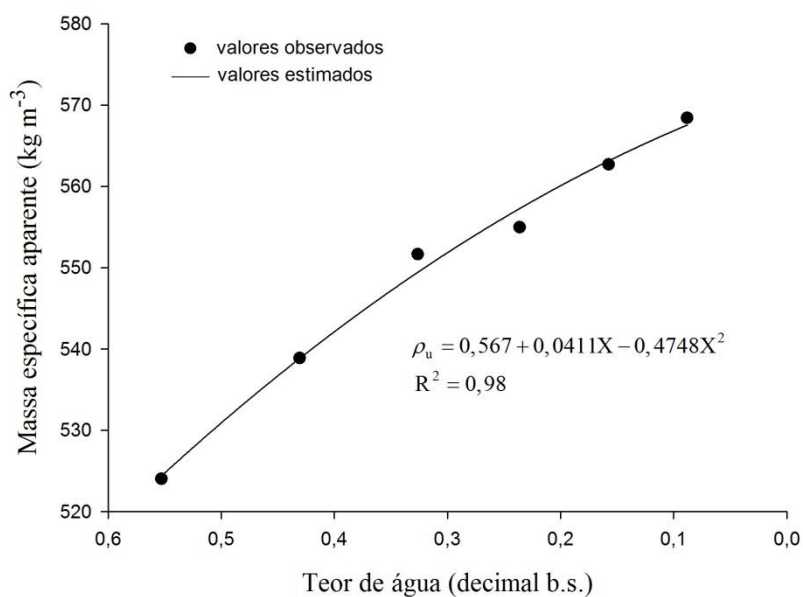


FIGURA 2. Valores experimentais e estimados da massa específica aparente dos grãos de niger em função do teor de água.

De acordo com a Figura 2, fica caracterizado o aumento da massa específica aparente conforme o teor de água é reduzido durante a secagem dos grãos de niger, comportamento comum para a maioria dos produtos agrícolas (JESUS et al., 2013; SEIFI e ALIMARDANI, 2010). A variação nos valores observados de massa específica aparente (Figura 2) pôde ser satisfatoriamente representada por um modelo de regressão polinomial de segunda ordem, que apresentou coeficiente de determinação elevado (98%). Para faixa de teor de água de 0,55 a 0,08 decimal b.s. os valores médios da massa específica aparente, estimados pelo modelo, variaram de 524,03 a 568,41 kg m⁻³, respectivamente.

Com base nos resultados obtidos é possível verificar que a redução da massa individual do produto foi mais acentuada que a do seu volume durante a secagem, desta forma, fica evidenciado o aumento da massa específica aparente, que se opõe ao comportamento apresentado para a massa específica unitária.

A massa específica aparente e unitária dos produtos agrícolas pode ser influenciada pelos processos de adsorção e dessorção, ganho ou perda de água, os poros antes preenchidos por água sofrem encolhimento durante a secagem, porém, estes fenômenos não ocorrem na mesma proporção, levando a diferenças nas características físicas dos produtos (SIQUEIRA et al., 2012). Na Figura 3 estão apresentados os valores observados da porosidade dos grãos de niger durante a

secagem. Verifica-se que no início do processo de secagem os grãos de niger apresentaram valores de porosidade próximos a 48% e que com a redução do teor de água a porosidade dos grãos também reduziu.

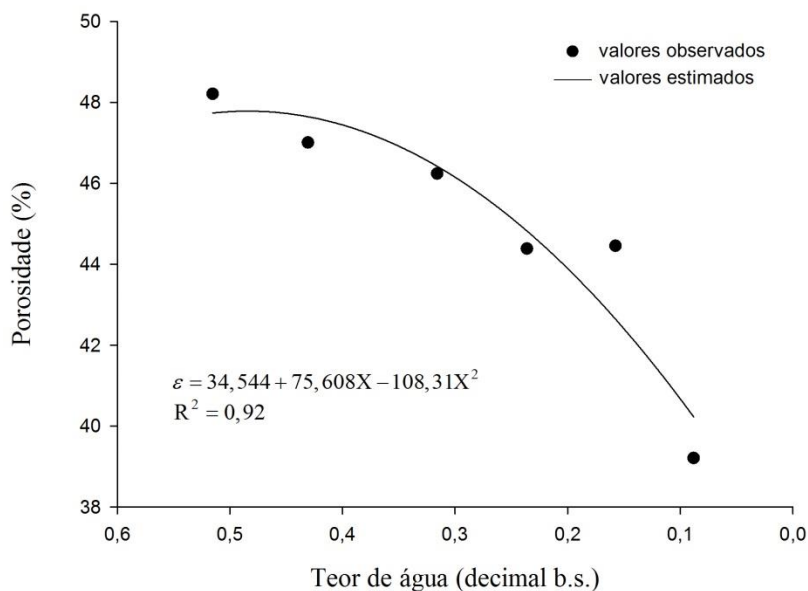


FIGURA 3. Valores experimentais e estimados da porosidade dos grãos de niger em função do teor de água.

O comportamento da curva de porosidade dos grãos de niger assemelhou-se àquelas encontradas para frutos de amendoim (ARAÚJO et al., 2015) e grãos de feijão fradinho (LANARO et al., 2011). Outros produtos apresentam aumento da porosidade intergranular em função do aumento do teor de água (GONELI et al., 2008; ARAÚJO et al., 2014).

A porosidade dos grãos de niger variou de 48,20 a 39,20%, para faixa de teor de água de 0,52 a 0,08 decimal b.s. e pôde ser representada de forma aceitável por um modelo de regressão polinomial de segunda ordem, o qual apresentou 0,92 de coeficiente de determinação. Essa redução na porcentagem da porosidade pode ser consequência da contração volumétrica, já que este acontecimento possibilita a redução de espaços vazios na massa de grãos (ARAÚJO et al., 2015).

A determinação da porosidade foi realizada de forma indireta, levando em consideração a relação entre a massa específica aparente e unitária. Sendo assim, como houve redução dos valores da massa específica unitária, seria um comportamento esperado que a porosidade reduzisse com a redução do teor de água

do produto, porém, verifica-se na Figura 3 o contrário, evidenciando que provavelmente ocorreu rearranjo dos grãos, reduzindo os espaços vazios. São apresentados na Tabela 2, os valores dos parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o grau de ajuste dos diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais do índice de contração volumétrica da massa e unitária dos grãos de niger em função do teor de água.

TABELA 2. Valores de desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) para os modelos de índice de contração volumétrica da massa e unitária dos grãos de niger.

Modelos	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)
Bala e Woods (1984)	0,0857	7,9877	0,6981
Corrêa et al. (2004)	0,0039	0,4074	0,9995
Exponencial	0,0170	1,6669	0,9899
Linear	0,0237	2,3306	0,9802
Polinomial	0,0046	0,4472	0,9993
Lang e Sokhansanj (1993)	0,0197	2,3162	0,9807
Modelos	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)
Bala e Woods (1984)	0,0677	5,4784	0,5993
Corrêa et al. (2004)	0,0354	2,3389	0,9083
Exponencial	0,0276	1,8951	0,9163
Linear	0,0275	1,9643	0,9173
Polinomial	0,0274	2,0221	0,9175
Lang e Sokhansanj (1993)	0,0278	1,9924	0,9158

Analisando a Tabela 2, nota-se que a maioria dos modelos de contração volumétrica apresentou elevados valores de coeficiente de determinação (R^2), exceto o modelo de Bala e Woods (1984) que apresentou valor abaixo de 0,70. São verificados valores reduzidos do desvio padrão da estimativa (SE) para todos os modelos testados, sendo que quanto menor os valores deste parâmetro estatístico melhor será a qualidade do ajuste do modelo em relação aos dados observados.

De acordo com Mohapatra e Rao (2005), os valores de erro médio relativo (P) devem ser inferiores a 10% para que um modelo represente adequadamente o processo estudado, desta forma, os modelos analisados são

satisfatórios para representar o processo de contração volumétrica e unitária dos grãos de niger durante a secagem (Tabela 2).

Dentre os modelos analisados para representar a contração da massa e unitária dos grãos de niger, durante a secagem, o modelo Linear foi selecionado, por ser de fácil aplicação, compreensão e por atender todos os parâmetros avaliados. Outros autores já utilizaram este modelo para representar a contração de produtos agrícolas, como: Oliveira et al. (2013) e Smaniotto et al. (2015) ao trabalharem com grãos de soja.

A Equação 11 expressa o modelo Linear de segunda ordem, ajustado para representar a contração volumétrica da massa (ψ_m , adimensional) dos grãos de niger em função do teor de água, para a faixa de teor de água de 0,53 a 0,09 decimal b.s.

$$\psi_m = 0,5866 + 0,7190X \quad (11)$$

Na Figura 4 estão apresentados os valores observados e estimados para a contração volumétrica da massa dos grãos de niger pelo modelo Linear durante a secagem.

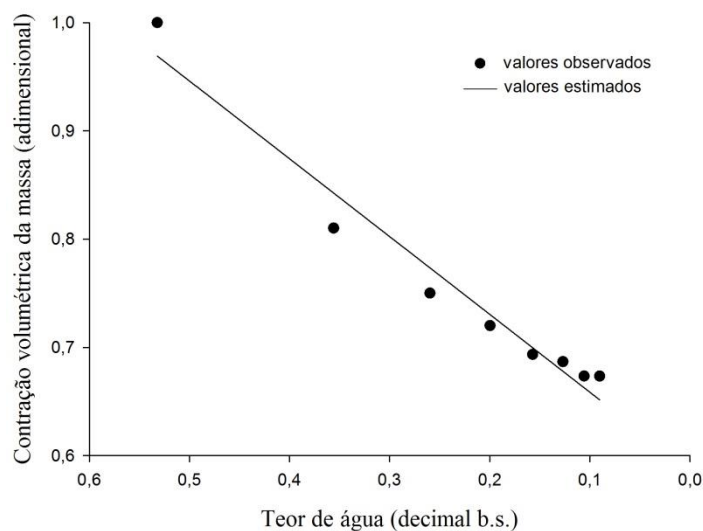


FIGURA 4. Valores observados e estimados para a contração volumétrica da massa dos grãos de niger durante a secagem.

A massa dos grãos de niger contraiu em torno de 33% com relação ao seu volume inicial, para uma redução do teor de água de 0,53 à 0,09 decimal b.s. (Figura 4).

A Equação 12 expressa o modelo Linear, ajustado para representar a contração volumétrica unitária (ψ_m , adimensional) dos grãos de niger em função do teor de água, para a faixa de teor de água de 0,52 a 0,08 decimal b.s.

$$\psi_u = 0,7751 + 0,4262X \quad (12)$$

Na Figura 5 estão apresentados os valores observados e estimados para a contração volumétrica da unitária dos grãos de niger pelo modelo Linear durante a secagem.

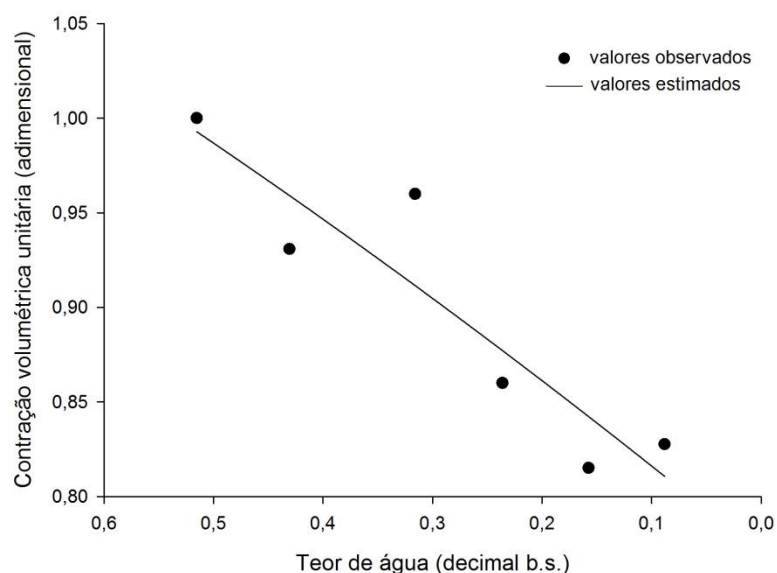


FIGURA 5. Valores observados e estimados para a contração volumétrica unitária dos grãos de niger durante a secagem.

A contração volumétrica unitária dos grãos de niger apresentou redução em torno de 17% em relação ao seu volume inicial, para a faixa de teor de água estudada (Figura 5).

A contração unitária dos grãos de niger foi cerca de 16% menor que a contração da massa. Esse comportamento foi semelhante ao encontrado por Goneli et al. (2011) estudando frutos de mamona e Ribeiro et al. (2005) trabalhando com grãos

de soja, onde encontraram valores de contração unitária inferiores a contração da massa, em cerca de, 17 e 18%, respectivamente.

O fato da contração da massa ser maior que a unitária, pode ser relacionado aos valores da porosidade (Figura 3). Conforme acontece redução do volume durante a secagem, ocorre rearranjo dos grãos na massa, diminuindo a quantidade de espaços intergranulares vazios.

3.4 CONCLUSÕES

1. A massa específica aparente aumentou no decorrer do processo de secagem;
2. A massa específica unitária e a porosidade dos grãos de niger reduziram com o processo de secagem;
3. A redução do teor de água influencia a contração volumétrica da massa e unitária dos grãos de niger, levando à redução de seus valores em torno de 33% e 17%, respectivamente; e
4. A contração volumétrica dos grãos de niger pode ser satisfatoriamente representada por um modelo de regressão Linear.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; ORLANDO, R.C.; MARTINS, E.A.S.; HARTMANN FILHO, C.P. Propriedades físicas dos frutos de amendoim durante a secagem. **Revista Caatinga**, v.28, n.4, p.170-180, 2015.

ARAUJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; SOUZA, C.M.A.; GONÇALVES, A.A.; VILHASANTI, H.C.B. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.3, p.279-286, 2014.

BALA, B.K.; WOODS, J.L. Simulation of deep bed malt drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.30, n.3, p.235-244, 1984.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, p.395, 2009.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 450 p.

DABDOUB, M. J.; BRONZEL, J. L.; RAMPIN, M. A. Biodiesel: visão crítica do status atual e perspectivas na academia e na indústria. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 776-792, 2009.

DI LANARO, N.; BAJAY, L.G.; QUEIROZ, V.M.P.; PINTO, R.C.S.; LEITÃO, I.G.A.; LESSIO, B.C.; AUGUSTO, P.E.D. Determinação de propriedades físicas do feijão fradinho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.13, n.1, p.27-35, 2011.

FRANCHINI, R.G. **Estudos de sistemas de produção, envolvendo rotação de culturas, com ênfase em culturas para produção de grãos, de óleo e de torta em plantio direto**. 2014. 120p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; OLIVEIRA, G.H.H.; SANTOS, E.S. Propriedades físicas dos frutos de mamona durante a secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.33, n.2, p.148-155, 2008.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; MAGALHÃES, F.E.A.; BAPTESTINI, F.M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.33, n.1, p.1-8, 2011.

JESUS; F.F.; SOUZA, R.T.G.; TEIXEIRA, G.C.S.; TEIXEIRA, I.R.; DEVILLA, I.A. Propriedades físicas de sementes de feijão em função de teores de água. **Engenharia na agricultura**, v.21, n.1, p.9-18, 2013.

KIBAR, H. Physical and mechanical properties of soybean. **International Agrophysics**, v. 22, p.239-244, 2008.

MAUAD, M.; GARCIA, R.A.; SILVA, R.M.M.F.; SILVA, T.A.F.; SCHROEDER, I.M.; KNUDSEN, C.H.; QUARESMA, E.V.W. Produção de matéria seca e acúmulo de macronutrientes na parte aérea das plantas de niger. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.2, p.533-540, 2015.

MIR, S.A.; BOSCO, S.J.D.; SUNOOJ, K.V. Evaluation of physical properties of rice cultivars grown in the temperate region of India. **International Food Research Journal**, v.20, n.4, p.1521-1527, 2013.

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, D.E.C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T.A.S.; SIQUEIRA, V.C. JOSÉ NETO, C.A. Alterações morfológicas em grãos de soja durante o processo de secagem. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, n.3, p.975-984, 2013.

OLIVEIRA, G.H.H.; CORRÊA, P.C SANTOS; F. L.; VASCONCELOS; W. L.; CALIL JÚNIOR; C.; BAPTESTINI; F.M.; ELÍAS G.A.V. Caracterização física de café após torrefação e moagem. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, n.4, p.1813-1828, 2014.

RAMADAN, M.F.; MÖRSEL, J.T. Determination of the lip classes and fatty acid profile of Niger (*Guizotia abyssinica* Cass.) seed oil. **Phytochemical Analysis**, v.14, n.2, p.366-370, 2003.

RIBEIRO, D.M.; CORRÊA, P.C.; RODRIGUES, D.H.; GONELI, A.L.D. Analysis of physical properties variation of soy grains during the drying process. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.25, n.3, p.611-617, 2005.

SEIFI, M.R.; ALIMARDANI, R. Moisture-Dependent Physical Properties of Sunflower Seed (SHF8190). **Modern Applied Science**, v.4, n.7; p.135-143, 2010.

SMANIOTTO, T.A.S.; OSVALDO, R.; OLIVEIRA, D.E.C.; SIQUEIRA, V.C.; SOUSA, K.A. Ajuste de modelos matemáticos a contração volumétrica unitária e da massa dos grãos de soja. **Revista Agroambiente**, v.9, n.4, p.397-404, 2015.

SILVA, J.S.; LACERDA FILHO, A.F.; DEVILLA, I.A.; LOPES, D.C. Aeração de grãos armazenados In: SILVA, J. S., **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**, Viçosa, MG, 2000. p.269-295.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Propriedades físicas das sementes de pinhão-mansão ao longo da secagem em diferentes temperaturas. **Semina: Ciências Agrárias**, v.33, n.1, p.2705-2714, 2012.

CONCLUSÕES GERAIS

As curvas de secagem em camada delgada dos grãos de niger podem ser representadas pelo modelo de Page, Aproximação da difusão e Dois termos, de modo satisfatório. Para a faixa de temperatura estudada, o coeficiente de difusão efetivo teve seus valores elevados conforme ocorreu elevação de temperatura, já a energia de ativação do processo de secagem teve seus valores reduzidos.

As isotermas de dessorção dos grãos de niger podem ser representadas pelo modelo de Copace, Chung e Pfof, Henderson modificado, Oswin, Sabbah, Sigma Copace, Halsey e Smith, de modo satisfatório, para a faixa de temperatura estudada. O calor isostérico integral de dessorção teve seus valores elevados conforme houve redução dos valores de teor de água de equilíbrio.

As propriedades físicas estudadas neste trabalho sofreram influência da redução do teor de água, ocorrido durante a secagem dos grãos.