

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

**CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS E
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DURANTE O
ARMAZENAMENTO DE FARINHA DE SORGO
GRANÍFERO**

Autora: Lígia Campos de Moura Silva
Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Resende

**RIO VERDE - GO
Agosto – 2019
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-AGRONOMIA**

**CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS E
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DURANTE O
ARMAZENAMENTO DE FARINHA DE SORGO
GRANÍFERO**

Autora: Lígia Campos de Moura Silva
Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Resende

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

Rio Verde – GO
Agosto – 2019

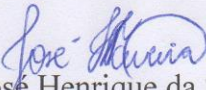
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AGRÁRIAS-AGRONOMIA

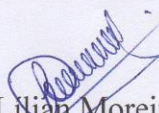
CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS E
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DURANTE O
ARMAZENAMENTO DE FARINHA DE SORGO
GRANÍFERO

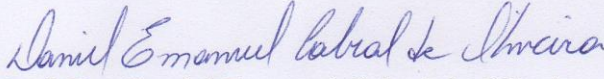
Autora: Lígia Campos de Moura Silva
Orientador: Dr. Osvaldo Resende

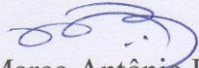
TITULAÇÃO: Doutorado em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de
Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

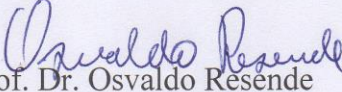
APROVADO em 16 de agosto de 2019..


Prof. Dr. José Henrique da Silva Taveira
Avaliador externo
UEG – Campus Santa Helena


Dra. Lillian Moreira Costa
Avaliadora interna
IF Goiano – Campus Rio Verde


Prof. Dr. Daniel Emanuel Cabral de Oliveira
Avaliador externo
IF Goiano – Campus Iporá


Prof. Dr. Marco Antônio Pereira da Silva
Avaliador externo
IF Goiano – Campus Rio Verde


Prof. Dr. Osvaldo Resende
Presidente da banca
IF Goiano – Campus Rio Verde

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

silva, ligia
sSI586 Cinética De Secagem Dos Grãos E Caracterização
c Física E Química Durante O Armazenamento De Farinha De
 Sorgo Granífero. / ligia silva;orientador Osvaldo
 Resende . -- Rio Verde, 2019.
 88 p.

 Tese (em Doutorado em Ciências Agrárias -
 Agronomia) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio
 Verde, 2019.

 1. conservação.. 2. teor de água,. 3. coeficiente
 de difusão. 4. qualidade nutricional. I. , Osvaldo
 Resende, orient. II. Título.

DEDICO

A Deus,

Pela vida, saúde, e sabedoria para lidar nos momentos difíceis.

OFEREÇO

À minha família,

A minha mãe que tanto amo e por você me solidifico, é minha base em tudo, sempre me incentivando e fornecendo todo o apoio necessário. Ao meu pai Valmir Pinto de Moura, pois sem seus esforços não chegaria onde estou hoje, mesmo distante sei que estaria feliz por mim, pois sempre apoiou a minha educação. Ao meu irmão Gabriel e tia Maria estes me ajudaram no que fosse preciso sem medir esforços, e sempre estavam felizes pelas minhas conquistas. A minha querida avó Jardelina (*in memoriam*), que era o meu espelho e sempre estava do meu lado, mesmo muitas vezes sem entender os motivos. E em especial gostaria de agradecer ao meu esposo Nelmício Furtado da Silva, pela compreensão, carinho e incentivo, e nunca ter duvidado da minha capacidade.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia. A Vanilda Maria Campos, pela paciência e apoio desde a matrícula até a defesa da tese, ao IF Goiano – Campus Rio Verde, pela oportunidade para a realização desse curso de pós-graduação. Aos órgãos de fomento (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo, (CNPq) e (FAPEG), pelo auxílio financeiro ao projeto de pesquisa de maneira geral.

Ao Prof. Dr. Osvaldo Resende, pela orientação, paciência demonstrada todo esse período, os ensinamentos ao longo da execução do projeto foram úteis para que tudo ocorresse da melhor maneira possível, pela confiança, e dizer que admiro seu profissionalismo. Ao professor Daniel Emanuel por não medir esforços em auxiliar na instalação dos experimentos e sanar minhas dúvidas que eram muitas no início.

Aos funcionários de todos os departamentos, professores da instituição pela colaboração. Sou grata de maneira especial, ao Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais, Laboratório de Biocompostos e Bioprocessos (LabBio) coordenado pela professora Mariana. Assim como o Laboratório de Produção Animal coordenado pelo professor Marco Antônio, que agradeço por sempre estar de portas abertas para mim, me fazendo sentir à vontade em retornar as minhas origens, e pela preocupação demonstrada.

Aos alunos da iniciação científica Luana, Natália e Érika que fizeram parte desta pesquisa colaborando para o bom andamento. A todos os colegas de laboratório Lilian, Gabrielly, Eduarda, Adrielle, Alexandre, Aparecida, Kelly, Manoel, Patrícia, Wellytton, Jennifer, Ana Paula, José Vitor, Eduardo e Simone, que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

A Daiana que me auxiliou na parte experimental, com a sua experiência química. Pelo apoio e incentivo nos momentos que as coisas não estavam bem.

E amigos como Glayce, Weder e Diene que vou guardar para sempre. A Diene minha amiga de velhos tempos seguimos juntas nesta jornada, pois sabíamos que uma levantaria a outra quando as coisas se tornassem muito difícil, e assim sempre foi, mesmo estando distante hoje, é por uma boa causa, e logo você estará aqui. O Weder se tornou um amigo, sempre que quero desabafar sei que posso contar. E principalmente na pesquisa me ajudou bastante a descomplicar o que estava realmente me complicando, se tornou um coorientador, fizemos muitos trabalhos juntos e formamos uma parceria nos ajudando mutuamente.

BIOGRAFIA DO AUTOR

LÍGIA CAMPOS DE MOURA SILVA, filha de Valmir Pinto de Moura e Alda Costa Campos de Moura, nasceu no dia 27 de abril de 1990, na cidade de Alta Floresta, Mato Grosso.

No mês de março de 2008, ingressou no curso de Engenharia de Alimentos no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, graduando-se em agosto de 2014.

Em 2011, durante o curso superior ingressou na Iniciação Científica (IC) na área de Pós-Colheita, como bolsista (PIBIC/CNPq), sob a orientação da Professora Dr. Luciana Vitorino, até a conclusão da graduação em 2014.

Em agosto de 2014, iniciou no curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, no Instituto Federal Goiano – Campus de Rio Verde - GO, como bolsista (CAPES), sob a orientação do Professor Dr. Marco Antônio Pereira da Silva, concluindo em agosto de 2016.

Em agosto de 2016, iniciou no curso de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia, no Instituto Federal Goiano – Campus de Rio Verde - GO, como bolsista (CAPES), sob a orientação do Professor Dr. Osvaldo Resende, concluindo em agosto de 2019.

ÍNDICE

	Páginas
ÍNDICE DE TABELAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1.0 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1 Sorgo.....	1
1.2 Secagem e armazenamento de produtos vegetais.....	2
1.3 Cereais na alimentação humana.....	3
1.4 Alimentos livres de Glúten.....	4
2.0 OBJETIVOS.....	6
2.1 Objetivo Geral.....	6
2.2 Objetivos Específicos.....	6
3.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	7
4.0 CAPÍTULO I - CINÉTICA DA SECAGEM DE GRÃOS DE SORGO EM DIFERENTES CONDIÇÕES.....	10
4.1 INTRODUÇÃO.....	12
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	12
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
4.4 CONCLUSÃO.....	24
4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	24
5.0 CAPÍTULO II - DIFUSÃO LÍQUIDA DURANTE A SECAGEM DE GRÃOS DE SORGO GRANÍFERO EM DIFERENTES CONDIÇÕES.....	27
5.1 INTRODUÇÃO.....	29
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
5.4 CONCLUSÃO.....	40
5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
6.0 CAPÍTULO III - CARACTERIZAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE FARINHA DE SORGO.....	44
6.1 INTRODUÇÃO.....	46
6.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	48
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52

6.4 CONCLUSÃO.....	67
6.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
7.0 CONCLUSÃO GERAL.....	67

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO I - CINÉTICA DA SECAGEM DE GRÃOS DE SORGO EM DIFERENTES CONDIÇÕES.

	Páginas
Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem dos grãos de sorgo.....	14
Tabela 2. Parâmetros estatísticos: erro médio relativo (P, %), teste <i>Qui</i> -quadrado (χ^2 , decimal x 10^{-4}) e coeficiente de determinação (R^2 , %) para os modelos ajustados às curvas de secagem dos grãos de sorgo em diferentes condições.....	16
Tabela 3. Valores dos critérios de informação de Akaike (AIC) e critérios de informação bayesiano de Schwarz (BIC) para o ajuste dos modelos utilizados para prever a secagem dos grãos de sorgo em diferentes condições.....	18
Tabela 4. Parâmetros do modelo e Midilli ajustados para as diferentes condições de secagem de grãos de sorgo, com a respectiva equação em função da temperatura.....	19

CAPÍTULO II - DIFUSÃO LÍQUIDA DURANTE A SECAGEM DE GRÃOS DE SORGO GRANÍFERO EM DIFERENTES CONDIÇÕES.

Tabela 1. Tempo (horas) necessário para o processo de secagem dos grãos de sorgo granífero até atingir o teor de água de 0,14 (kg de água kg ⁻¹ de matéria seca) nas diferentes condições.....	34
--	----

CAPÍTULO III - CARACTERIZAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE FARINHA DE SORGO.

Tabela 1. Valores médios e desvio padrão do teor de água, cinzas, proteínas, lipídeos e carboidratos (g/100g) da farinha de sorgo submetida a secagem nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C.....	52
Tabela 2. Valores médios e desvio padrão de pH, acidez (g ácido cítrico/100g), massa específica ME (g/mL) da farinha de sorgo submetida a secagem nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C.....	54
Tabela 3. Valores médios e desvio padrão dos parâmetros de cor L*, a*, b*, C* e °h da farinha de sorgo submetida a secagem nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C.....	55
Tabela 4. Valores médios da capacidade antioxidante equivalente de trolox determinada por dois métodos, utilizando os radicais DPPH e ABTS ($\mu\text{mol trolox g}^{-1}$) e teor de fenólicos totais (mg GAE ^a 100 g ⁻¹) da farinha	56

	de sorgo submetida a secagem nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C...	
Tabela 5.	Valores médios e desvio padrão referente ao índice de absorção em água (I.A.A.), índice de absorção em leite (I.A.L.), índice de absorção em óleo (I.A.O.), índice de solubilidade em água (I.S.A) expressos em (g/g) e índice de solubilidade em leite (I.S.A) expressos em (g 100g ⁻¹) da farinha de sorgo submetida a secagem nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C.....	57
Tabela 6.	Valores médios referentes aos teores de minerais em base seca de fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu) expresso em (mg 100g ⁻¹) da farinha de sorgo submetida a secagem nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I - CINÉTICA DA SECAGEM DEGRÃOS DE SORGO EM DIFERENTES CONDIÇÕES.

	Páginas
Figura 1. Valores de razão de teor de água de grãos de sorgo estimados pelo modelo de Midilli em diferentes temperaturas de secagem e teores de água (A) 0,23, (B) 0,31, (C) 0,40 e (D) 0,49 (kg de água kg ⁻¹ de matéria seca).....	22
Figura 2. Taxa de remoção de água dos grãos de sorgo ao longo do tempo de secagem (h) em diferentes teores de água e temperaturas de (A) 40,(B) 60, (C) 80 e (D) 100 °C.....	23

CAPÍTULO II - DIFUSÃO LÍQUIDA DURANTE A SECAGEM DE GRÃOS DE SORGO GRANÍFERO EM DIFERENTES CONDIÇÕES.

Figura 1. Teores de água de sorgo granífero ao longo da secagem para diferentes temperaturas (A) 40 °C, (B) 60 °C, (C) 80 °C, (D) 100 °C.....	33
Figura 2. Valores do coeficiente de difusão efetivo (m ² s ⁻¹) obtidos para a secagem dos grãos de sorgo granífero em diferentes temperaturas e teores de água iniciais de (A) 0,23 (B) 0,31 (C) 0,40 e (D) 0,49 (kg de água kg ⁻¹ de matéria seca).....	35
Figura 3. Valores do coeficiente de difusão efetivo (m ² s ⁻¹) obtidos para a secagem dos grãos de sorgo granífero em diferentes teores de água iniciais e temperaturas de (A) 40 °C, (B) 60 °C, (C) 80 °C e (D) 100 °C...	36
Figura 4. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura (40, 60, 80 e 100 °C) do ar de secagem de grãos de sorgo granífero em diferentes teores de água.	37

CAPÍTULO III - CARACTERIZAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE FARINHA DE SORGO.

Figura 1. Histograma da frequência retida das farinhas de Sorgo submetidas à secagem nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C.....	58
Figura 2. Microestrutura eletrônica de varredura das farinhas sorgo submetida a diferentes temperaturas de secagem (40, 60, 80 e 100 °C). Imagens correspondem a aumentos de 500X e 1000X.....	61
Figura 3. Valores expressos de Acidez (A), pH (B), cinzas (C) e lipídeos (D) em função do tempo de armazenamento.....	64
Figura 4. Atividade antioxidante DPPH (A), fenólicos totais (B) em função do	65

	tempo de armazenamento.....	
Figura 5.	Médias de cinzas (A) L*, (B) Chroma* (C) Hue*, em função do tempo de armazenamento.....	66

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

%	Por cento
Σ	Somatória
a*	Cromaticidade do verde ao vermelho
a, b, c, n	Coefficientes dos modelos de secagem
a	Comprimento (m)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABTS	Ácido 2,2'-azino-di- (3- etilbenzotiazolina sulfônico)
BIC	Bayesiano de Schwarz
AIC	Akaike
ANOVA	Análise de variância
ANVISA	Agência nacional de vigilância sanitária
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
b*	Cromaticidade do azul ao amarelo
b	Largura (m)
b.s.	Base seca
C*	Chroma, saturação da cor
c	Espessura (m)
Ca	Cálcio
cm	Centímetro
Cu	Cobre
CV	Coefficiente de variação
D	Coefficiente de difusão efetivo (m ² .s ⁻¹)
D ₀	Fator pré-exponencial (m ² .s ⁻¹)
DPPH	2,2-difenil-1-picril-hidrazil
E _a	Energia de ativação
Eq	Equação
exp	Expoente
Fe	Ferro
g	Gramas
GAE	Ácido Gálico equivalente
GLR	Grau de liberdade do resíduo
h	Horas
h ⁻¹ , k, k ₀ , k ₁	Constantes de secagem
h°	Hue, tonalidade ou matiz cromática (°)
IAA	Índice de absorção em água
IAL	Índice de absorção em leite

IAO.....	Índice de absorção em óleo
ISA.....	Índice de solubilidade em água
ISL.....	Índice de solubilidade em leite
K.....	Potássio
Kg^{-1}	Quilograma
KJ mol^{-1}	Kilojoule mol
L^*	Luminosidade do preto ao branco
Ma_0	Massa de água total anterior (kg)
Ma_i	Massa de água total atual (kg)
ME.....	Massa Específica
MEV.....	Microscopia eletrônica de varredura
mg.....	Miligramma
Mg.....	Magnésio
mL.....	Mililitro
Mn.....	Mânegas
Mod.....	Modelos
Ms.....	Matéria seca (kg)
n.....	Número de observações experimentais
N.....	Normalidade
NaOH.....	Hidróxido de sódio
ns.....	Não significativo
$^{\circ}\text{Brix}$	Grau Brix (escala numérica de índice de refração)
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
P.....	Erro médio relativo
P.....	Fósforo
P.A.....	Para análise
pH.....	Potencial hidrogeniônico
r.....	Raio
R.....	Constante universal dos gases
R^2	Coeficiente de determinação (%)
Rpm.....	Rotações por minuto
RX.....	Razão de teor de água (adimensional)
t.....	Tempo de secagem
t_0	Tempo total de secagem anterior (h)
T_{ab}	Temperatura absoluta (K)
t_i	Tempo total de secagem atual (h)
TRA.....	Taxa de redução de água ($\text{kg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$)
Trolox.....	6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid
T_v	Transição vítrea
V_g	Volume (m^3)
X.....	Teor de água (decimal, b.s.)
Xe.....	Teor de água de equilíbrio (decimal, b.s.)
Xi.....	Teor de água inicial (decimal, b.s.)
Y.....	Valor observado experimentalmente
\hat{Y}	Valor estimado pelo modelo
Zn.....	Zinco
μL	Micro litro
μmol	Micromol
χ^2	Qui-quadrado

RESUMO GERAL

SILVA, L. C. M. **Cinética de secagem, caracterização e armazenamento de farinha de sorgo granífero**. 2019. 94p. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias – Agronomia) - Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, Brasil.

Objetivou-se estudar a cinética de grãos de sorgo em diferentes condições de teores de água iniciais 0,49; 0,40; 0,31; 0,23 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca) em temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C; determinar o coeficiente de difusão efetivo durante a secagem; avaliar a composição centesimal, massa específica aparente, cor, teores de minerais, compostos fenólicos totais, capacidade antioxidante, análise de microestrutura, os índices de absorção (água, leite e óleo) e índices de solubilidade (água e leite) das farinhas de sorgo a diferentes condições de secagem 40, 60, 80, 100 °C e durante o armazenamento. A cinética de secagem dos grãos de sorgo em diferentes teores de água iniciais e temperaturas pode ser descrita pelo modelo de Midilli. A difusividade efetiva dos grãos de sorgo aumenta para uma mesma temperatura de secagem conforme ocorre o aumento do teor de água inicial dos grãos. A energia de ativação foi maior para grãos de sorgo granífero com maior teor de água inicial, sendo de 27,32; 26,75; 22,55 e 20,94 kJ mol⁻¹ para os teores de água iniciais de 0,49; 0,40; 0,31; e 0,23 kg de água kg⁻¹ de matéria seca, respectivamente. A secagem dos grãos de sorgo para produção de farinhas propiciou a redução do teor de água inicial, proteína, pH, e índices de solubilidade em água e leite e atividade antioxidante, exceto para o tratamento 100 °C. Provocou a elevação dos valores de fenólicos totais, acidez e índice de absorção em água, promoveu a redução da intensidade dos tons vermelhos e amarelo, aumento da tonalidade e escurecimento das amostras. A secagem não alterou o conteúdo de lipídeos, carboidratos, índice de absorção em leite e óleo, teores de fósforo, cálcio, magnésio e ferro. Apresentaram significativos teores de ferro, zinco e cobre. O armazenamento foi realizado para a farinha seca a 60 °C, pois manteve melhor as características analisadas. Durante o armazenamento a farinha de sorgo promoveu alterações significativas, apesar de pouco expressivas, puderam ser observadas a partir do sexto mês de armazenamento, em quase todas as características avaliadas, exceto para teor de água, sólidos solúveis e proteína.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor*, modelos matemáticos, teor de água, coeficiente de difusão, qualidade nutricional, conservação.

GENERAL ABSTRACT

SILVA, L. C. M. **Drying Kinetics, characterization and storage of sorghum flour.** 2019. 94p. Thesis (Doctor in Agricultural Sciences – Agronomy) Goiano Federal Institute – Campus Rio Verde – GO, Brazil.

This work aimed to study the kinetics of sorghum grains under different conditions of initial moisture contents 0.49; 0.40; 0.31; 0.23 (kg of dry matter kg⁻¹ water) at temperatures of 40, 60, 80 and 100 °C; determine the effective diffusion coefficient during drying; To evaluate centesimal composition, apparent specific mass, color, mineral content, total phenolic compounds, antioxidant capacity, microstructure analysis, absorption indices (water, milk and oil) and solubility indices (water and milk) of sorghum flour at different drying conditions 40, 60, 80, 100 °C and during storage. The drying kinetics of sorghum grains in different moisture contents and temperature can be described by the Midilli model. The effective diffusivity of sorghum grains increases at the same drying initial grain moisture content increases. The activation energy was higher for grain sorghum grains with higher initial water content, being 27.32; 26.75; 22.55 and 20.94 kJ mol⁻¹ for initial water contents of 0.49; 0.40; 0.31; and 0.23 kg water kg⁻¹ dry matter, respectively. The drying of sorghum grains for flour production reduced the initial moisture content, protein, pH, water and milk solubility indices and antioxidant activity, except for the 100 °C treatment. It caused the increase of the total phenolic values, acidity and water absorption index, promoted the reduction of the intensity of the red and yellow tones, increase of the tone and darkening of the samples. Drying did not alter the content of lipids, carbohydrates, absorption index in milk and oil, phosphorus, calcium, magnesium and iron contents. They presented significant levels of iron, zinc and copper. The storage was made for the dry flour at 60 °C, because it kept the analyzed characteristics better. During storage sorghum flour promoted significant changes, although not significant, could be observed from the sixth month of storage on almost all evaluated characteristics, except for moisture content, soluble solids and protein.

Keywords: *Sorghum bicolor*, mathematical models, moisture content, diffusion coefficient, nutritional quality, conservation.

1.0 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Sorgo

O sorgo (*Sorghum bicolor L.*) pertence à família das gramíneas sendo o quinto cereal mais produzido do mundo. De acordo com o Levantamento de Safras da Companhia Nacional de Abastecimento – Conab divulgado em maio de 2019, a estimativa de produção é mais de 2,148 milhões de toneladas, produtividade de 2,915 kg ha^{-1} e área plantada de 737,1 mil hectares. Dentre os maiores produtores, destacam-se Goiás e Bahia (CONAB, 2019).

O sorgo (*Sorghum bicolor L.*) é um cereal sem glúten, de intenso cultivo mundial, e promissor, pois é fácil de produzir e pode crescer sob condições ambientais adversas, como áreas muito secas, salinas e quentes, onde a produção de outros cereais não é viável economicamente. Em países como África e Ásia, o cereal chega a suprir 70% da ingestão calórica diária tendo, dessa forma, papel fundamental na segurança alimentar (Queiroz et al., 2009; FAO, 2015).



Figura 1. Plantação de sorgo vermelho (*Sorghum bicolor*) Fonte:Arquivo pessoal.

É um grão versátil, podendo ser utilizado tanto na alimentação humana como na alimentação animal, servindo de matéria-prima para a produção biocombustíveis, amido, farinha, cera, bebidas alcoólicas, óleo comestível, ração, forragem e mais vários produtos, dependendo do grau de industrialização a que ele seja submetido (IBGE, 2015).

1.2 Modelagem matemática e armazenamento de produtos vegetais

O sorgo pode ser armazenado por longo período, na fase de pós-colheita a secagem é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e estabilidade dos produtos vegetais, pois a diminuição do teor de água do material reduz a atividade biológica na massa de grãos, assim como as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (Araújo et al., 2014)

A secagem consiste em um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água contida no mesmo por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido (Goneli et al., 2014).

O conhecimento das alterações que a secagem induz na composição química do alimento, principalmente sobre os nutrientes de interesse para especificidade de aplicação do material, pode auxiliar na escolha do melhor método de secagem (Michalska et al., 2017).

A cinética e a modelagem matemática da secagem são consideradas ferramentas importantes na otimização do processo de secagem (Resende et al., 2010; Ferreira et al., 2012; Goneli et al., 2014; Leite et al., 2015).

O processo de secagem, que reduz a atividade de água, inibe a deterioração microbiana e reações químicas que conduzem à deterioração dos alimentos. Além disso, auxilia na preservação, armazenamento, e redução de custos no transporte dos alimentos, os mesmos apresentam-se mais leves em razão da perda de água (Suriya et al., 2016).

A partir do uso do modelo da difusão, podem-se determinar as principais propriedades termodinâmicas envolvidas no fenômeno de desidratação (Araújo et al., 2017). Dentre os diferentes índices usados para avaliar a cinética de secagem dos produtos agrícolas, o coeficiente de difusão é um dos mais importantes. Esse índice possibilita avaliar e comparar a velocidade de secagem de produtos com tamanhos,

formas e texturas diferentes. Além disso, por meio de análise da dependência do coeficiente de difusão com a temperatura, podem-se determinar índices termodinâmicos que possibilitam analisar energeticamente o processo de secagem (Botelho et al., 2015).

Durante o armazenamento a deterioração, alterações de cor, sabor, textura, qualidade nutricional e funcional, podem comprometer o alimento. Diversos parâmetros podem avaliar a condição de um determinado alimento, processado durante o período de armazenamento, como cor, composição química, nutricional, funcional e física, avaliando onde há perdas expressivas para reduzir estas variações durante o período armazenado.

1.3 Cereais na alimentação humana

No Brasil, bem como nos Estados Unidos e Austrália, o sorgo é empregado principalmente na produção de ração animal. No entanto, em países da África, Ásia e outras regiões semiáridas do mundo, este cereal é utilizado para consumo humano (Anunciação et al., 2017).

Em todos os grãos de cereais, as principais fontes de energia são carboidratos, proteína e, em menor abundância, os lipídeos. Grãos também podem conter teores importantes de fibras alimentares, minerais, vitaminas e fito químicos (Khan et al., 2014; Queiroz et al., 2015),

Em sua composição química, o sorgo exhibe diversos antioxidantes, compostos bioativos importante para o consumo humano, tais como, carotenóides, taninos em alguns genótipos de sorgo, fenólicos, flavonóides, antocianinas e fito esteróis. O sorgo é considerado excelente opção para a indústria de alimentos, com valor agregado (Anunciação et al., 2017).

Corroborando com o crescente interesse em usar sorgo na alimentação humana em todo o mundo, o mesmo está relacionado à promoção de saúde, principalmente para dietas sem glúten (Paiva et al., 2015), e pode ser uma alternativa para substituir cereais convencionais, por ser um alimento que apresenta potencial sensorial e funcional, a exemplo os antioxidantes que são fitoquímicos bastante apreciados nutricionalmente, pois além de provocar aumento das propriedades sensoriais dos alimentos, tais como cor e sabor, o seu consumo regular pode auxiliar na promoção a saúde, protegendo o organismo de várias doenças crônicas (Rocchett et al., 2017).

Todavia, no mercado brasileiro, a inserção do sorgo na alimentação humana é ainda recente. Alguns produtos à base de sorgo já foram propostos em trabalhos

acadêmicos, como barras de cereais (Paiva et al., 2018; Queiroz et al., 2012), cookies (Ferreira et al., 2009), preparados em pó para bebida de baixa caloria (Queiroz et al., 2018) e cereais matinais (Anuniação et al., 2017), todos com as propostas de diversificar receitas e oferecer alternativas de consumo a pessoas intolerantes ao glúten.

1.4 Alimentos livres de Glúten

O termo glúten refere-se à uma fração protéica presente em cereais tais como o trigo, centeio, cevada, aveia dentre outros, formado por importantes proteínas de armazenamento que constituem entre 70% e 80% do teor total de proteína dos grãos (Rzychon et al., 2017).

A farinha de sorgo tem sido amplamente estudada para consumo humano e de acordo com pesquisas, podem ser substituta da farinha de trigo em produtos sem glúten, como bolos, cereais matinais, pães, tortilhas, biscoitos e massas (Ferreira et al., 2016).

Atualmente, a mudança no estilo de vida e hábitos alimentares vieram acompanhados por um aumento gradual de casos de alergia e intolerância alimentares em todo o mundo (Gilissen et al., 2014). Doenças causadas pela ingestão do glúten também podem ocorrer em pacientes não celíacos, tal transtorno é descrito então como sensibilidade mediada pelo glúten, assim existe uma crescente tendência para eliminar qualquer proteína potencialmente alergênica em uma dieta (Witczak et al., 2016).

A remoção de glúten de produtos alimentares tradicionalmente à base de trigo como o pão tem um impacto significativo na sua estrutura e textura (Witczak et al., 2016). Sendo assim, a elaboração de farinha de sorgo é uma alternativa para a indústria, pode ser utilizada na formulação de diversos produtos, tendo em vista uma digestibilidade aceitável.

2.0 OBJETIVOS

2.1 Geral

Estudar a cinética de secagem e difusividade efetiva dos grãos de sorgo (*Sorghum bicolor*) durante a secagem em diferentes condições de temperatura e teores de água iniciais, avaliar o potencial das farinhas sorgo integral e sua estabilidade durante o armazenamento.

2.2 Específicos

Avaliar a cinética de secagem dos grãos de sorgo nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C em diferentes teores de água 0,49; 0,40; 0,31; 0,23 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca).

Calcular o coeficiente de difusão e a energia de ativação para a secagem dos grãos de sorgo nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C em diferentes teores de água 0,49; 0,40; 0,31; 0,23 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca).

Obter as farinhas de sorgo a partir das diferentes temperaturas de secagem e caracterizar por meio do teor de água, carboidratos totais, proteína, cinzas, lipídeos, pH, acidez, sólidos solúveis, massa específica, granulometria e teores de macro e micro minerais.

Avaliar a atividade antioxidante e compostos fenólicos, além de analisar as farinhas por microscopia eletrônica de varredura.

Verificar a coloração das farinhas por reflectometria a partir das leituras de L* (luminosidade), a* e b* (parâmetros de Hunter) e croma (Cr).

Avaliar as características tecnológicas funcionais das farinhas, tais como índices de absorção em água, leite e óleo, índices de solubilidade em água e leite.

Armazenar as farinhas cuja temperatura de secagem mantiver as características nutricionais e funcionais, por doze meses e realizar as análises de cor, acidez, pH, sólidos totais, proteína, lipídeos, teor de água, cinzas, antioxidantes e compostos fenólicos a cada três meses, afim de verificar a estabilidade das farinhas de sorgo durante o tempo de armazenamento.

3.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anunciação, P. C.; Cardoso, L. de. M.; Gomes, J. V. P. Lucia, C. M. D.; Carvalho, C. W. P.; Galdeano M. C.; Queiroz, V. A.; Alfenas, R. de. C. G.; Martino, H. S. D.; Pinheiros, H. M. Comparing sorghum and wheat whole grain breakfast cereals: Sensorial acceptance and bioactive compound content. *Food Chemistry, Viçosa*, v.221, n.5, p. 984–989, 2017.
- Araujo, W. D.; Goneli, A. L. D.; Souza, C. M. A.; Gonçalves, A. A.; Vilhasantis, 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.
- Araújo, W. D., Goneli; A. L. D. Corrêa; P. C., Hartmann Filho; C. P., & Martins, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. *Ciência Agronômica*, v. 48, n. 3, p. 448-457.
- Botelho, S. C. C.; Sousa, A. M. B. Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo de grãos de sorgo. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG*, v.14, n.2, p. 260- 272, 2015.
- Conab - Companhia nacional de abastecimento. Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: Nono levantamento, setembro 2018 – safra 2018/2019. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2018. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS>>. Acesso em: 04 jun. 2019.
- Fao - Food and Agricultural Organization of the United Nations. 2015. Disponível em <<http://faostat3.fao.org>> Acesso em: 03 jun. 2019.
- Ferreira, L. F. D. Dias, L. F. D; Pirozi, M. R.; Pereira, A. M.; Marques, J. A. Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, n. 6, p. 855-862, 2012.
- Ferreira, S. M. R., Luparelli, P. C., Schieferdecker, M. E.; Vilela, R. M. Cookies sem glúten a partir da farinha de sorgo. *Archivos Latino americanos de Nutricion*, v.59, n.4, p. 433-440, 2009.

- Ferreira, S. M. R.; de Mello, A. R.; Anjos, M. C. R.; Krüger, C. C. H.; Azoubel, P. M.; Alves, M. A. O. Utilization of sorghum, rice, corn flours with potato starch for the preparation of gluten-free pasta. *Food Chemistry*, Curitiba, v. 191, n. 8, p. 147–151, 2016.
- Gilissen, L. J. W. J.; Van der Meer, I. M.; Smulders, M. J. M. Reducing the incidence of allergy and intolerance to cereals. *Journal of Cereal Science*, Wageningen, v. 59, n. 3, p. 337 – 353, 2014.
- Goneli, A. L. D.; Vieira, M. C.; Vilhasanti, H. C. B.; Goncalves, A. A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, *Produção Agrícola Municipal 2015*. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.
- Khan, I.; Yousif, A. M.; Johnson, S. K.; Gamlath, S. Sorghum flour addition the effect on in vitro digestibility of starch, baking quality and acceptability of durum wheat consumer, pasta. *Journal of Food Science*, Vitoria, v. 79, n. 8, p. 1560-1567, 2014.
- Leite, A. L. M. P.; Silva, F. S.; Porto, A. G.; Piasson, D.; Santos, P. Contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 45, n. 2, p. 155-162, 2015.
- Michalska, A.; Wojdyło, A.; Łysiak, G. P.; Lech, K.; Figiel, A. Functional relationships between phytochemicals and drying conditions during the processing of blackcurrant pomace into powders. *Advanced Powder Technology*, v. 28, n. 5, p. 1340–1348, 2017.
- Paiva C. L.; Evangelista W. P.; Queiroz V. A. V.; Glória M. B. A. Bioactive amines in sorghum: Method optimization and influence of line, tannin and hydric stress. *Food Chemistry*, v. 173, n.2, p. 224-230, 2015.
- Paiva, C. L.; Queiroz, V. A. V.; Carvalho, C. W. P.; Garcia, M. A. V. T. Acceptability and study of shelf life of gluten free cereal bar with popped and extruded sorghum based on a consumer acceptability. *Caderno de Ciências Agrárias*, v. 10, n. 3, p.52-58, 2018.
- Queiroz, V. A. V.; Aguiar, A. S., Menezes, C. B.; Carvalho, C. W. P., Paiva, C. L., Fonseca, P. C.; Conceição, R. R. P. A low calorie and nutritive sorghum powdered drink mix: Influence of tannin on the sensorial and functional properties. *Journal of Cereal Science*, v. 79, n 5. p. 43-49, 2018.
- Queiroz, V. A. V.; Carneiro, H. L., Deliza, R.; Rodrigues, J. A. S.; Vasconcellos, J. H., Tardin, F. D.; Queiroz, L. R; Genótipos de sorgo para produção de barra de cereais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, n.2, p. 287-293, 2012.

- Queiroz, V. A. V.; Silva, K. S.; Menezes, C. B.; Schafferth, R. E.; Guimarães, F. F. M.; Guimarães, L. J. M.; Guimarães, P. E. O.; Tardin, F. D. Nutritional composition of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] genotypes with and without water stress. *Journal of Cereal Science*, Sete Lagoas, v. 65, n. 4, p. 103-111, 2015.
- Queiroz, V. A. V.; Vizzotto, M., Carvalho, C. W. P., Martino, H. S. D. O sorgo na Alimentação Humana. Sete Lagoas: EMBRAPA Milho e Sorgo, Circular técnica, n. 133, p 19, 2009.
- Resende, O.; Ferreira, L. U.; Almeida, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki (*Vigna angularis*). *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.
- Rocchetti, G.; Lucini, L.; Chiodelli, G.; Giuberti, G.; Gallo, A.; Masoero, F.; Trevisan, M. Phenolic profile and fermentation patterns of different commercial gluten-free pasta during in vitro large intestine fermentation. *Food Research International*, Piacenza, v. 97, n. 6 p. 78–86, 2017.
- Rzychon, M.; Brohée, M.; Cordeiro, F.; Haraszi, R.; Ulberth, F.; O'connor, G. The feasibility of harmonizing gluten ELISA measurements. *Food Chemistry*, v. 243, n. 1, p. 144 – 154, 2017.
- Suriya, M.; Baranwal, G.; Bashir, M.; Reddy, C. K.; Haripriya, S. Influence of blanching and drying methods on molecular structure and functional properties of elephant foot yam (*Amorphophallus paeoniifolius*) flour. *Food Science and Technology*, v. 68, n.1, p. 235 - 243, 2016.
- Witczak M., Ziobro R., Juszczak L., Korus J., 2016, Starch and starch derivatives in gluten-free systems e: A review. *Journal of Cereal Science*, v. 67, n.6, p. 46-57, 2016.

CAPÍTULO I

(Normas de acordo com a revista Engenharia Agrícola e Ambiental)

CINÉTICA DA SECAGEM DE GRÃOS DE SORGO EM DIFERENTES TEMPERTURAS E TEORES DE ÁGUA

DRYING KINETICS OF GRANIFEROUS SORGHUM GRAINS IN DIFFERENT TEMPERTURES AND MOINSTURE CONTENT

Resumo: Objetivou-se estudar a cinética de secagem de grãos de sorgo em diferentes condições teores de água iniciais 0,49; 0,40; 0,31; 0,23 kg de água kg^{-1} de matéria seca, e temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C, e definir o comportamento da taxa de redução de água ao longo do tempo de secagem. A partir do teor de água inicial dos grãos de sorgo de 0,49 (kg de água kg^{-1} de matéria seca) foram obtidos outros três teores de água pela secagem em estufa com temperatura de secagem de 40 °C de 0,40; 0,31 e 0,23 (kg de água kg^{-1} de matéria seca). Em seguida, os grãos com diferentes teores de água foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada nas quatro condições de temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C. A cinética de secagem dos grãos de sorgo em diferentes teores de água iniciais e temperaturas podem ser descrita pelo modelo de Midilli, não sendo possível a utilização de uma única equação para as diferentes condições de secagem. O aumento da temperatura de secagem resultou em menor tempo para atingir o teor de água de 0,14 kg de água kg^{-1} de matéria seca.

Palavras-chave: Modelos matemáticos, *sorghum bicolor*, diferentes condições.

Abstract: This study aimed to study drying kinetics of graniferous sorghum grains during in different temperatures and initial moisture contents 0.49; 0.39; 0.31; 0.23 (kg water kg⁻¹ dry matter) and temperatures 40, 60, 80 e 100 °C. As define the rate behavior water reduction over the drying time. Drying The initial water content of sorghum grains of 0.49 (kg of dry matter kg⁻¹ water) was determined from the moisture contents 0.49; 0.39; 0.31; 0.23 (kg water kg⁻¹ dry matter) with drying temperature of 40 °C. Then grains with different moisture contents were submitted to drying at four different air temperatures of 40, 60, 80 e 100 °C. The drying kinetics of sorghum grains in different initial water contents and temperatures can be described by the Midilli model. It is not possible to use a single equation for the different drying conditions.

Keywords: Mathematical models, sorghum bicolor, different conditions.

4.1 INTRODUÇÃO

Sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é uma cultura semelhante ao milho em relação ao seu valor agrônomo e nutricional. Devido a facilidade de produção e versatilidade, o sorgo tem sido utilizado em outros países como base alimentar de milhares de pessoas. Todavia, no mercado brasileiro, a inserção do sorgo na alimentação humana é ainda recente (Paiva et al., 2018).

De maneira geral, os vegetais apresentam elevados valores de teor de água, que favorece a deterioração, contaminação e perdas econômicas (Souza et al., 2011). Os grãos de sorgo secos apresentam vantagens na facilidade de manuseio e armazenagem, sendo um dos processos mais adequados para um armazenamento seguro.

Diante disto, é de fundamental importância o emprego de modelos matemáticos para representar o processo de secagem, haja vista que as informações geradas são relevantes para o desenvolvimento de equipamentos e a predição dos tempos de secagem. A representação matemática da secagem de diversos produtos agrícolas vem, já há algum tempo, sendo estudada e utilizada na tentativa de prever os fenômenos que ocorrem durante este processo, sendo representada pelas curvas e taxas de secagem (Silva, 2018).

Diante o exposto, objetivou-se estudar a cinética de secagem de grãos de sorgo em diferentes condições teores de água iniciais 0,49; 0,40; 0,31; 0,23 kg de água kg⁻¹ de matéria seca, e temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C, bem como recomendar uma única equação a partir do melhor modelo ajustado para estimar a secagem nas diferentes condições e definir o comportamento da taxa de redução de água ao longo do tempo de secagem.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde. Os grãos de sorgo (cultivar Dekalb 640) foram colhidos manualmente, no município de Jataí - GO, com teor de água inicial de (0,49 kg de água kg⁻¹ de matéria seca). As impurezas foram removidas com auxílio de peneiras de classificação de 3,00 mm de crivos circulares e peneiras de crivos oblongos de 3,00 x 22,00 mm e, posteriormente, os grãos foram homogeneizados em equipamento tipo Boerner.

A partir do teor de água inicial dos grãos foram obtidos outros três teores de água pela secagem em estufa com temperatura de secagem de 40 °C, por meio de gravimetria até os teores de água estipulados de 0,40; 0,31; 0,23 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca). Em seguida, os grãos com diferentes teores de água foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada nas quatro condições de temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C, e umidades relativas de 18,23; 6,75; 2,84 e 1,32%, respectivamente. Os grãos foram inseridos em bandejas perfuradas de aço inox de 25 cm de diâmetro, perfazendo uma camada de 4 cm contendo em cada bandeja 0,25 kg de amostra. As temperaturas do ar de secagem e ambiente foram monitoradas por meio de um termômetro no interior e exterior da estufa, sendo a umidade relativa no interior da estufa obtida por meio dos princípios básicos de psicrometria, com o auxílio do programa computacional GRAPSI.

Ao longo da secagem foi acompanhada a redução do teor de água pelo método gravimétrico (perda de massa), com auxílio de uma balança analítica com resolução de 0,01 g, conhecendo-se o teor de água inicial do produto, até atingir o teor de água desejado.

O processo de secagem foi interrompido quando os grãos de sorgo granífero atingiram o teor de água final de 0,14±0,007 kg de água kg⁻¹ de matéria seca, determinado em estufa a 105 ± 1 °C, durante 24 horas, em três repetições (BRASIL, 2009).

Para a determinação das razões de teor de água dos grãos de sorgo durante a secagem utilizou-se a seguinte expressão:

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

Em que,

RX - Razão de teor de água;

X - Teor de água do produto (kg de água kg⁻¹ de matéria seca);

X_i - Teor de água inicial do produto (kg de água kg⁻¹ de matéria seca);

X_e - Teor de água de equilíbrio do produto (kg de água kg⁻¹ de matéria seca).

Os teores de água de equilíbrio dos grãos de sorgo foram de 0,0742; 0,0323; 0,0146 e 0,0044 kg de água kg⁻¹ de matéria seca, para as temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C, respectivamente. Os modelos matemáticos descritos na Tabela 1 foram

ajustados aos dados experimentais da secagem dos grãos de sorgo, a partir dos diferentes teores de água iniciais.

Tabela 1 -Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem dos grãos de sorgo

Designação do modelo	Modelo	
$RX = \exp(-k \cdot t)$	Newton	(2)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis	(3)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	Logarítmico	(4)
$RX = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	Wang e Sing	(5)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	Midilli	(6)
$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	Page	(7)

Em que: t - tempo de secagem, h; k, k₀, k₁ - constantes de secagem h⁻¹; e a, b, c, n - coeficientes dos modelos.

Os modelos matemáticos foram ajustados, a partir de análise de regressão não-linear pelo método Gauss Newton. Os coeficientes dos modelos foram avaliados pelo teste t adotando o nível de 5% de significância. O grau de ajuste de cada modelo foi verificado pelas magnitudes do coeficiente de determinação (R²), do erro médio relativo (P) e o teste de *Qui*-quadrado (χ^2) ao nível de significância de 0,01% e o intervalo de confiança a 99% (P < 0,01). O erro médio relativo e o teste de *Qui*-quadrado para cada um dos modelos, foram calculados conforme as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (8)$$

$$\chi^2 = \sum \frac{(Y - \hat{Y})^2}{GLR} \quad (9)$$

em que,

Y - Valor experimental;

\hat{Y} - Valor estimado pelo modelo;

n - número de observações experimentais;

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

Na seleção de um único modelo para descrição do processo de secagem em cada condição, aqueles que tiveram os melhores ajustes foram submetidos aos critérios de seleção da Informação de Akaike (AIC) e Informação Bayesiano de Schwarz (BIC), conforme seguintes expressões:

$$AIC = -2\log like + 2p \quad (10)$$

$$BIC = -2\log like + p \cdot \ln(n) \quad (11)$$

Em que,

p - Número de parâmetros;

Loglike: Valor do logaritmo da função de verossimilhança considerando as estimativas dos parâmetros.

Para a avaliação da secagem dos grãos de sorgo em diferentes condições, procedeu-se à determinação da taxa de redução de água do produto por unidade de tempo, de acordo com a expressão descrita por Corrêa et al. (2001):

$$TRA = \frac{Ma_0 - Ma_i}{Ms \cdot (t_i - t_0)} \quad (12)$$

Em que,

TRA - Taxa de redução de água ($\text{kg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$);

Ma₀- Massa de água total anterior (kg);

Ma_i- Massa de água total atual (kg);

Ms- Matéria seca (kg);

t₀- Tempo total de secagem anterior (h);

t_i- Tempo total de secagem atual (h).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação ao erro médio relativo (P), para todas as condições de secagem, os valores encontrados para os modelos ajustados estiveram abaixo de 5,10% (Tabela 2). De acordo com Mohapatra & Rao (2005) modelos que apresentam valores de erro médio relativo superior a 10% são inadequados para representar o processo de secagem.

Tabela 2. Parâmetros estatísticos: erro médio relativo (P, %), teste *Qui*-quadrado (χ^2 , decimalx10⁻⁴) e coeficiente de determinação (R², %) para os modelos (Mod.) ajustados às curvas de secagem dos grãos de sorgo em diferentes condições

Mod.	40 °C			60 °C			80 °C			100 °C		
	P	χ^2	R ²	P	χ^2	R ²	P	χ^2	R ²	P	χ^2	R ²
----- 0,23 kg de água kg ⁻¹ de matéria seca -----												
2	1,51	2,083	99,46	0,62	0,437	99,82	1,80	4,355	98,37	1,00	2,073	99,45
3	0,75	0,798	99,81	0,48	0,377	99,86	1,54	4,024	98,80	1,00	2,026	99,60
4	0,78	0,681	99,82	0,39	0,263	99,24	1,18	1,946	99,27	1,02	1,504	99,60
5	1,55	1,885	99,47	0,39	0,236	99,91	1,17	1,673	99,25	0,94	1,370	99,55
6	0,47	0,315	99,92	0,38	0,295	99,89	1,14	2,399	99,28	0,36	0,375	99,92
7	0,83	0,575	99,84	0,35	0,241	99,89	1,09	1,649	99,26	0,97	1,115	99,63
-----0,31 kg de água kg ⁻¹ de matéria seca -----												
2	3,08	5,715	99,10	2,31	3,884	99,09	2,24	4,379	98,94	2,89	8,377	98,27
3	1,04	1,162	99,82	2,17	3,987	99,16	2,01	4,025	99,16	2,10	5,590	99,04
4	0,92	0,864	99,86	2,10	3,221	99,24	0,38	0,197	99,95	0,95	0,915	99,81
5	3,35	6,012	99,00	2,45	3,908	98,99	0,46	0,242	99,93	1,08	1,104	99,73
6	0,82	0,377	99,94	1,77	3,023	99,36	0,24	0,114	99,97	0,29	0,116	99,98
7	1,31	0,931	99,84	2,24	3,476	99,10	1,09	1,019	99,71	0,36	0,132	99,96
-----0,40 kg de água kg ⁻¹ de matéria seca -----												
2	3,31	4,068	99,43	1,74	2,261	99,51	2,77	5,211	99,15	2,29	4,739	99,21
3	2,03	1,752	99,79	1,53	1,782	99,62	1,86	3,531	99,49	1,51	3,107	99,55
4	2,19	1,619	99,80	0,55	0,289	99,93	1,53	1,714	99,72	1,55	1,854	99,69
5	5,10	6,642	98,95	0,71	0,401	99,90	1,51	1,518	99,72	1,58	1,798	99,65
6	1,03	0,387	99,95	0,40	0,282	99,94	1,29	1,187	99,83	0,42	0,230	99,96
7	2,85	1,412	99,83	1,09	0,760	99,82	1,32	0,760	99,81	1,32	0,760	99,81
-----0,49 kg de água kg ⁻¹ de matéria seca -----												
2	2,58	4,346	99,51	3,14	4,674	99,26	4,79	11,78	98,53	3,48	6,433	99,13
3	2,29	1,932	99,79	3,04	4,732	99,31	1,86	3,531	99,49	2,42	4,179	99,51
4	2,07	1,723	99,80	2,27	3,024	99,52	1,69	2,381	99,70	1,21	1,009	99,86
5	3,13	6,732	99,21	3,09	5,335	99,09	1,92	2,696	99,62	1,15	0,903	99,88
6	2,37	1,514	99,83	1,61	1,623	99,76	0,98	0,892	99,90	0,60	0,272	99,98
7	3,03	6,436	99,66	3,13	4,277	99,27	0,99	0,897	99,87	0,69	0,239	99,95

O erro médio relativo é originário da diferença entre os valores experimentais e estimados pelo modelo, portanto menores valores para este parâmetro indicam melhores ajustes aos dados experimentais. Observando-se os valores do erro médio relativo na Tabela 2 nota-se que com exceção das condições de secagem nos teores de água iniciais de 0,23 (60 e 80 °C) e 0,49 (40 °C) kg de água kg⁻¹ de matéria seca, o modelo de Midilli (6) apresentou os menores valores para o erro médio relativo.

Em relação aos valores de *Qui*-quadrado (Tabela 2) observa-se a variação de 0,114 a 11,78 x10⁻⁵. Menores valores para o teste de *Qui*-quadrado indicam melhores ajustes dos dados estimados às condições reais do fenômeno em estudo (Günhan et al., 2005; Oliveira et al., 2018). De modo geral, o modelo de Midilli (6) apresentou os menores valores para o teste de *Qui*-quadrado.

O coeficiente de determinação (R²) dos modelos matemáticos para a secagem dos grãos de sorgo em diferentes condições apresentaram-se superiores a 98% (Tabela 2). O modelo de Midilli (6) se destaca apresentando maiores valores.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores dos parâmetros AIC e BIC, que têm sido utilizados para seleção de modelos matemáticos em processos pós-colheita de produtos vegetais (Gomes et al., 2018; Ferreira Junior et al., 2018; Quequeto et al., 2019).

De acordo com os critérios AIC e BIC o modelo de Midilli (6) apresenta menores valores, indicando melhor ajuste dos dados estimados as condições experimentais (Tabela 3). Os princípios destes testes sugerem que a escolha do modelo seja para aquele que apresenta menores valores para estes parâmetros. Gomes et al. (2018) utilizaram estes parâmetros com sucesso para escolher apenas um modelo dentre aqueles que apresentaram melhores resultados para os demais parâmetros analisados.

Os resultados dos parâmetros AIC e BIC estão de acordo com os critérios de ajustes de P, *Qui*-quadrado e R², indicando que o modelo de Midilli (6) melhor se ajusta as diferentes condições de secagem dos grãos de sorgo. Este resultado corrobora aqueles obtidos por Botelho et al. (2015) que recomendaram também o modelo de Midilli para estimar as curvas de secagem de grãos de sorgo de duas cultivares BRS 308 e NIDERA A 9721 nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C.

Tabela 3. Valores dos critérios de informação de Akaike (AIC) e critérios de informação bayesiano de Schwarz (BIC) para o ajuste dos modelos utilizados para prever a secagem dos grãos de sorgo em diferentes condições

Modelos	40 °C		60 °C		80 °C		100 °C	
	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
----- 0,23 kg de água kg ⁻¹ de matéria seca -----								
2	-89,38	-87,84	-86,15	-85,18	-38,71	-38,55	-38,91	-39,01
3	-86,99	-85,54	-86,99	-85,54	-39,13	-38,89	-38,98	-39,14
4	-103,47	-100,38	-88,00	-86,06	-40,03	-40,31	-37,03	-37,25
5	-87,80	-85,48	-89,78	-88,33	-40,77	-40,53	-38,15	-38,31
6	-115,60	-111,74	-89,78	-88,55	-39,14	-38,75	-45,18	-45,45
7	-106,90	-104,90	-90,00	-88,60	-40,91	-40,67	-39,50	-39,66
----- 0,31 kg de água kg ⁻¹ de matéria seca -----								
2	-91,92	-89,93	-63,17	-60,34	-48,74	-48,14	-37,52	-37,13
3	-122,95	-119,97	-63,46	-61,77	-49,25	-48,34	-40,78	-40,19
4	-125,43	-121,45	-62,94	-60,68	-76,45	-75,24	-53,23	-52,44
5	-87,63	-84,65	-61,23	-59,54	-75,24	-74,33	-52,28	-51,69
6	-141,58	-136,60	-64,50	-63,37	-81,21	-79,69	-68,31	-67,32
7	-124,78	-121,79	-62,67	-60,98	-60,37	-59,46	-66,24	-65,65
----- 0,40 kg de água kg ⁻¹ de matéria seca -----								
2	-120,12	-117,69	-77,29	-76,01	-51,29	-50,49	-53,23	-52,43
3	-143,33	-139,67	-78,69	-76,77	-55,10	-53,91	-55,38	-54,19
4	-142,17	-137,30	-102,17	-99,61	-59,20	-57,61	-53,38	-51,79
5	-103,07	-99,42	-97,83	-95,92	-61,12	-59,92	-56,42	-55,22
6	-176,78	-170,68	-101,71	-98,52	-65,50	-64,30	-82,51	-80,52
7	-149,24	-145,59	-89,51	-87,59	-62,58	-60,60	-56,04	-54,84
----- 0,49 kg de água kg ⁻¹ de matéria seca -----								
2	-141,54	-138,80	-71,57	-70,16	-46,21	-45,24	-44,60	-44,00
3	-164,22	-160,12	-70,70	-68,58	-52,32	-50,86	-48,51	-47,60
4	-164,35	-158,88	-73,93	-71,10	-61,25	-59,31	-58,31	-57,10
5	-125,70	-121,59	-66,35	-64,22	-60,53	-59,08	-59,95	-59,04
6	-167,19	-160,36	-82,93	-78,93	-71,46	-69,04	-69,20	-67,68
7	-150,65	-146,55	-69,72	-67,60	-69,11	-67,66	-67,65	-65,74

Em relações aos coeficientes do modelo Midilli não foi possível observar tendência clara (Tabela 4) para as condições de secagem em estudo, corroborando com resultados obtidos por Sousa et al. (2011) no processo de secagem do nabo forrageiro. Nota-se que para constante k, com exceção da secagem do teor de água inicial de 0,31 kg de água kg⁻¹ de matéria seca, houve tendência linear crescente dos valores em função da temperatura do ar de secagem.

Tabela 4 - Parâmetros do modelo Midilli ajustados para as diferentes condições de secagem de grãos de sorgo, com a respectiva equação em função da temperatura

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	40	60	80	100
----- 0,23 kg de água kg ⁻¹ de matéria seca -----				
A	1,0000**	1,0007**	1,0028**	1,0007**
K	0,1268**	0,1857**	0,2483 ^{ns}	1,0630**
N	0,7981**	1,0132**	1,0934**	1,2518**
B	-0,0202**	-0,0125 ^{ns}	-0,0911 ^{ns}	0,2297**
----- 0,31 kg de água kg ⁻¹ de matéria seca -----				
A	0,9962**	0,9995**	1,0000**	1,0004**
K	0,1341**	0,1224 ^{ns}	0,0305 ^{ns}	0,6159**
N	0,7164**	0,6694 ^{ns}	0,4148 ^{ns}	1,2853**
B	-0,0226**	-0,0857 ^{ns}	-0,2578**	0,0395**
----- 0,40 kg de água kg ⁻¹ de matéria seca -----				
A	1,0034**	1,0000**	0,9979**	0,9957**
K	0,1334**	0,2578**	0,4266**	0,7615**
N	0,7876**	1,0196**	1,1864**	1,3028**
B	-0,0074**	0,0216**	0,0201 ^{ns}	0,0939**
----- 0,49 kg de água kg ⁻¹ de matéria seca -----				
A	0,9845**	1,0057**	0,9992**	0,9993**
K	0,0957**	0,1295**	0,3721**	0,5879**
N	0,8843**	0,6570**	1,2539**	1,1854**
B	-0,0039**	-0,0528**	0,0153 ^{ns}	0,0134 ^{ns}

**Significativo a 1% pelo teste t. ^{ns} não significativo pelo teste t.

De acordo com Brooker et al. (1992) o valor de k varia de acordo com a temperatura do ar de secagem e o teor de água inicial do produto. O aumento da constante k em função do acréscimo da temperatura do ar de secagem foi observado na secagem de milho (Oliveira et al., 2012; Coradi et al., 2015), folhas de timbó (Martins et al., 2015), frutos de amendoim (Araújo et al., 2017), sementes de melão (Silva et al., 2018).

A constante k pode ser utilizada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura, e está relacionada à difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente, sendo a difusão líquida que controla o processo (Madamba et al., 1996; Babalis & Belessiotis, 2004). A relação da constante k com a temperatura do ar de secagem para os teores de água iniciais de 0,23; 0,31; 0,40 e 0,49 kg de água kg^{-1} de matéria seca, são descritas pelas Eqs. 13, 14, 15 e 16, respectivamente.

$$k = 0,0144T - 0,599 \quad (R^2 = 70,70\%) \quad (13)$$

$$k = 0,0068T - 0,248 \quad (R^2 = 43,74\%) \quad (14)$$

$$k = 0,0103T - 0,324 \quad (R^2 = 94,69\%) \quad (15)$$

$$k = 0,0086T - 0,305 \quad (R^2 = 93,04\%) \quad (16)$$

Observa-se que a relação da constante k para o teor de água de 0,31 kg de água kg^{-1} de matéria seca (Eq. 14) apresenta ajuste de equação linear com baixo valor de R^2 , portanto a relação dessa constante de secagem em função do teor de água não pode ser descrita matematicamente. Apesar das equações lineares em função da temperatura de secagem para a constante k , não foi possível a sua inclusão no modelo de Midilli para facilitar a estimativa da secagem do sorgo em diferentes temperaturas de secagem com apenas uma equação para cada teor de água inicial, pois a utilização das médias dos coeficientes a , n e b apresentaram valores superiores a 89% para o erro médio relativo.

A inexistência da tendência linear da constante k para o teor de água inicial de 0,31 kg de água kg^{-1} de matéria seca (Eq. 14) deve-se ao fato deste coeficiente não ter sido significativo pelo teste de t para as temperaturas de 60 e 80 °C (Tabela 4). De um modo geral, observou-se que tanto para a constante k e também para os coeficientes a , n e b aqueles em que os valores não foram significativos, apresentaram-se maiores desvios e erros das estimativas.

Porém, mesmo com estas limitações, o modelo de Midilli apresentou melhor ajuste de acordo com os parâmetros estatísticos testados (P , χ^2 , R^2 , AIC e BIC). Outros estudos de cinética de secagem obtiveram ajustes de modelos com estimativas dos parâmetros não significativas (Sousa et al., 2011; Siqueira et al., 2012; Quequeto et al., 2019).

Em relação aos diferentes teores de água iniciais para a mesma temperatura do ar de secagem, também não houve tendência da constante k corroborando com Madamba et al. (1996), Babalis & Belessiotis, (2004). Faria et al. (2012) também não observaram tendência da constante k em função do teor de água para uma mesma temperatura na secagem de sementes de crambe com os teores de água iniciais variando de 0,11 a 0,28 kg de água kg⁻¹ de matéria seca, e temperaturas do ar de secagem de 30, 40, 50, 60 e 70 °C.

Substituindo-se os valores dos parâmetros do modelo de Midilli da Tabela 4, na equação do modelo (Eq. 6), têm-se a representação da cinética da secagem dos grãos de sorgo em diferentes condições (Figura 1). O modelo de Midilli também foi recomendado para estimar as curvas de secagem de diversos produtos agrícolas (Sousa et al., 2011; Siqueira et al., 2012; Camicia et al., 2015; Botelho et al., 2018).

O tempo necessário para os grãos de sorgo atingirem o teor de água de 0,14±0,007 kg de água kg⁻¹ de matéria seca, foi diretamente proporcional ao teor de água inicial dos grãos, sendo de 21,0; 14,0; 10,0 e 7,0 h para a temperatura de 40 °C; de 7,0; 6,0, 3,8 e 2,6 h para 60 °C; 3,15, 2,5; 2,0 e 1,33 h para temperatura de 80 °C e de 2,0; 1,97; 1,33 e 1,0 h para a temperatura de 100 °C, considerando-se os teores de água de 0,49, 0,40, 0,31 e 0,23 kg de água kg⁻¹ de matéria seca, respectivamente (Figura 1).

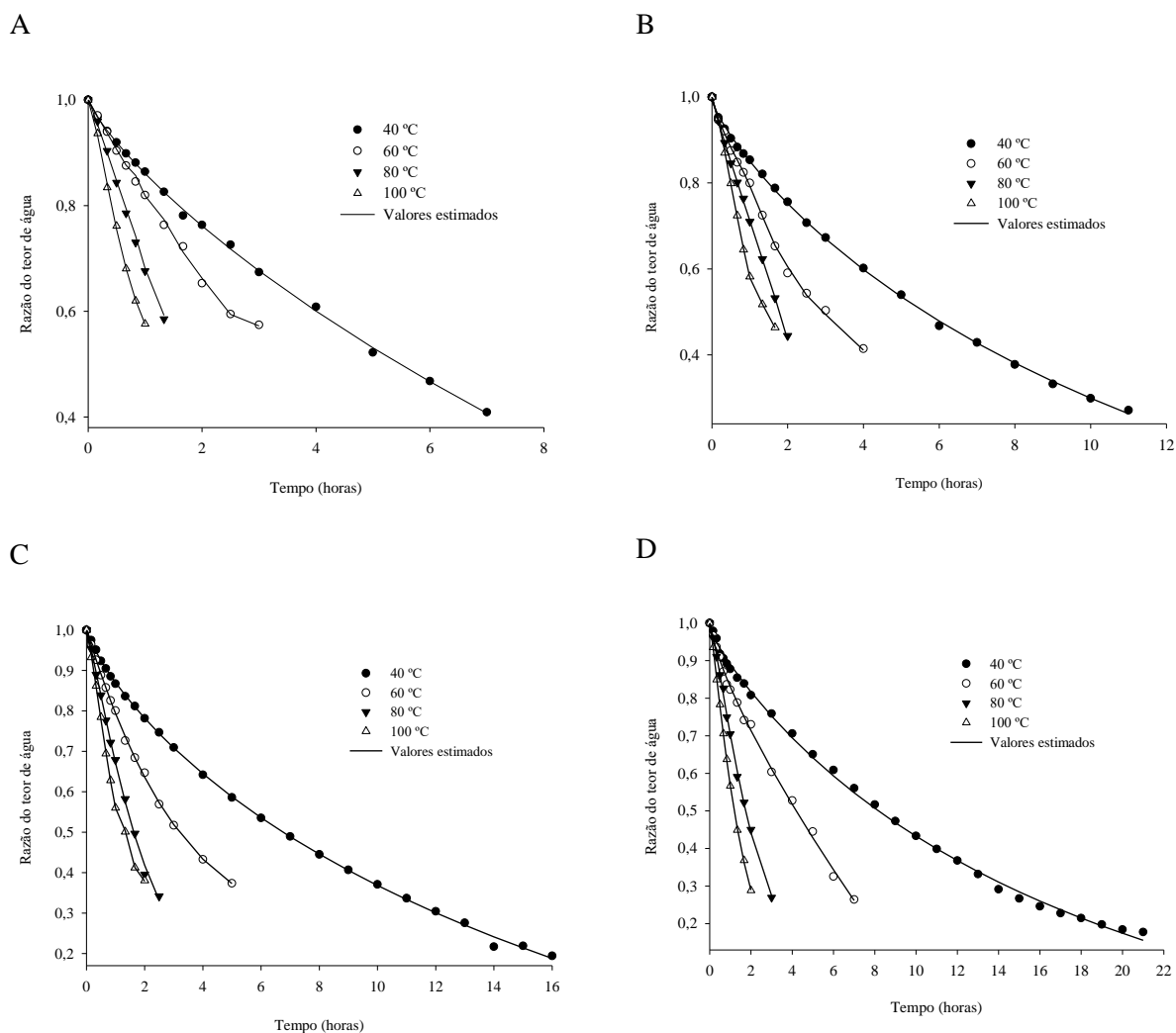


Figura 1. Valores de razão de teor de água de grãos de sorgo estimados pelo modelo de Midilli em diferentes temperaturas de secagem e teores de água (A) 0,23, (B) 0,31, (C) 0,40 e (D) 0,49 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca).

Observa-se que o aumento da temperatura do ar de secagem promove maior taxa de remoção de água no produto (Figura 2), correspondendo em menor tempo de secagem (Figura 1). Menores quantidades de energia e tempo são necessários para remover a água em excesso do produto, a medida que o teor de água decresce a água retida no produto se encontra mais fortemente ligada aos constituintes da matéria seca requerendo uma maior quantidade de energia para promover alterações na difusão da água nos capilares dos grãos de sorgo (Goneli et al., 2009).

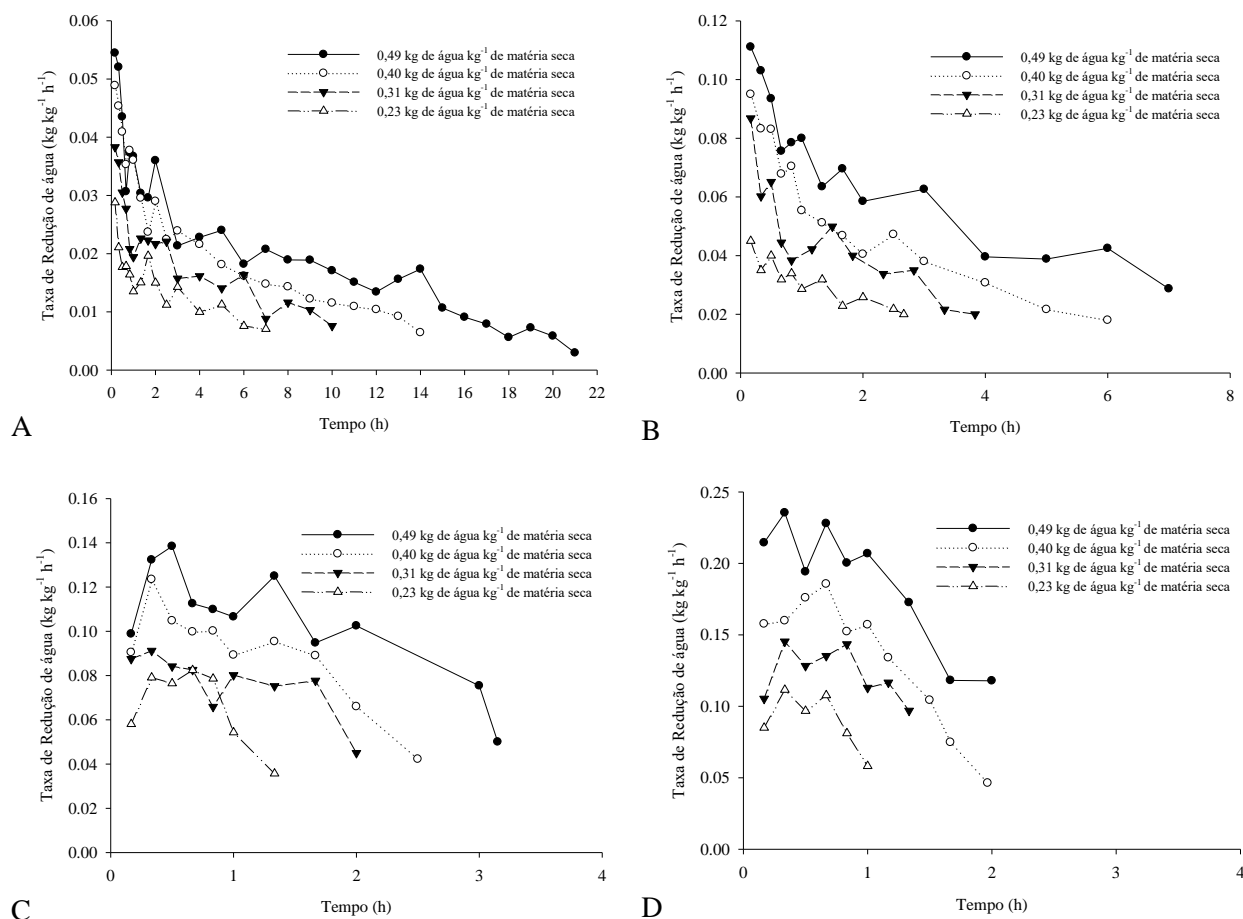


Figura 2. Taxa de remoção de água dos grãos de sorgo ao longo do tempo de secagem (h) em diferentes teores de água e temperaturas de (A) 40, (B) 60, (C) 80 e (D) 100 °C.

Ao longo do tempo de secagem observa-se que taxa de remoção de água é variável para as diferentes condições de secagem, este comportamento é explicado pelas propriedades térmicas do produto, sendo intrínsecas às suas características físico-químicas (Borém et al., 2002). As propriedades térmicas determinam o comportamento do produto durante o processo de secagem e são influenciados pela temperatura, teor de água, composição química e estrutural, massa específica e porosidade (Borém et al., 2002; Corrêa et al., 2004, Tres et al., 2011)

4.4 CONCLUSÃO

1. A cinética de secagem dos grãos de sorgo em diferentes teores de água iniciais e temperaturas podem ser descrita pelo modelo de Midilli, não sendo possível a utilização de uma única equação para as diferentes condições de secagem.

2. O aumento da temperatura de secagem resultou em menor tempo para atingir o teor de água de 0,14 kg de água kg⁻¹ de matéria seca, enquanto o aumento do teor de água teve comportamento inverso.

4.5 REFERÊNCIAS

Araújo, W. D.; Goneli, A. L. D.; Corrêa, P. C.; Hartmann Filho, C. P.; Martins, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. *Revista Ciência Agronômica*, v. 48, p. 448-457, 2017.

Babalís, S. J.; Belessiotis, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, v.65, n.3, p.449-458, 2004.

Borém, F. M.; Ribeiro, R. C. M. S.; Corrêa, P. C.; Pereira, R. G. F. A. Propriedades térmicas de cinco variedades de café cereja descascado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, p. 475-480, 2002.

Botelho, F. M.; Garcia, T. R. B.; Viana, J. L.; Botelho, S. C. C.; Sousa, A. M. B. Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo de grãos de sorgo. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 14, p. 260-272, 2015.

Botelho, F. M.; Hoscher, R. H.; Hauth, M. R.; Botelho, S. C. C. Cinética de secagem de grãos de soja: influência varietal. *Engenharia na Agricultura*, v. 26, p. 13-25, 2018.

Brasil, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Regras para Análise de Sementes. Brasília: MAPA, 2009. 395p.

Brooker, D. B.; Bakker-Arkema, F. W.; Hall, C. W. Drying and storage of grains and oilseeds. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450p.

Camicia, R. G. M.; Christ, D.; Coelho, S. R. M.; Camicia, R. F. M. Modelagem do processo de secagem de grãos de feijão-caupi. *Revista Caatinga*, v. 28, p. 206-214, 2015.

Coradí, P. C.; Milane, L. V.; Dias, C. F.; Baio, F. H. R. Mathematical modeling of drying maize grains in different temperatures. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.14, p. 247-259, 2015.

Corrêa, P. C.; Andrade, E. T.; Afonso Júnior, P. C. Propriedades térmicas da massa granular de milheto, alpiste e painço: determinação e modelagem. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 6, p. 39-45, 2004.

- 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, p.573-583, 2012.
- Ferreira Junior, W. N.; Resende, O.; Oliveira, D. E. C.; Costa, L. M. Isotherms and isosteric heat desorption of *Hymenaea stigonocarpa* Mart. seeds. *Journal of Agricultural Science*, v. 10, p. 504-512, 2018.
- Gomes, F. P.; Resende, O.; Sousa, E. P.; Oliveira, D. E. C.; Araújo Neto, F. R. Drying kinetics of crushed mass of 'jambu': effective diffusivity and activation energy. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, p. 499-505, 2018.
- 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, Especial Café*, p.64-73, 2009.
- Günhan, T.; Demir, V.; Hancioglu, E.; Hepbasli, A. Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, v. 46, n. 11, p. 1667-1679, 2005.
- Madamba, P. S.; Driscoll, R. H.; Buckle, K. A. The thin layer drying characteristic of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, v.29, p.75-97, 1996.
- Martins, E. A. S.; Lage, E. Z.; Goneli, A. L. D.; Hartmann Filho, C. P.; Lopes, J. G. Cinética de secagem de folhas de timbó (*Serjania marginata* Casar). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.19, p.238-244, 2015.
- Mohapatra, D.; Rao, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, v.66, p.513-518, 2015.
- Paiva, C. L.; Queiroz, V. A. V.; Carvalho, C. W. P.; Garcia, M. A. V. T. Acceptability and study of shelf life of gluten free cereal bar with popped and extruded sorghum based on a consumer acceptability. *Caderno de Ciências Agrárias*, v. 10, p. 52-58, 2018.
- Oliveira, D. E. C.; Resende, O.; Smaniotto, T. A.; Campos, R. C.; Chaves, T. H. Cinética de secagem dos grãos de milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.11, p. 190-201, 2012.
- Oliveira, P. M.; Oliveira, D. E. C.; Resende, O.; Silva, D. V. Estudo da secagem do mesocarpo dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vog.). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, p. 827-877, 2018.
- Quequeto, W. D.; Resende, O.; Silva, P. C.; Santos, F. A.; Silva, L. C. M. Drying Kinetics of Noni Seeds. *Journal of Agricultural Science*, v. 11, p. 250-258, 2019.

Silva, I. L.; Silva, H. W.; Camargo, F. R. T.; Farias, H. F. L.; Freitas, E. F. M. Secagem e difusividade de sementes de melão. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 41, p. 309-315, 2018.

Siqueira, V. C.; Resende, Chaves, T. H. Drying kinetics of *Jatropha* seeds. *Revista Ceres*, v. 59, p. 171-177, 2012.

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, p. 883-892, 2011.

Tres, M. V.; Borges, G. R.; Corazza, M. L.; Zakrzewski, C. A. Determinação da difusividade térmica de alimentos: medidas experimentais e simulação numérica. *Perspectiva*, v. 35, p. 43-56, 2011.

CAPÍTULO II

(Normas de acordo com a revista Engenharia Agrícola e Ambiental)

DIFUSÃO LÍQUIDA EFETIVA DURANTE A SECAGEM DE GRÃOS DE SORGO GRANÍFERO EM DIFERENTES TEMPERATURAS E TEORES DE ÁGUA

LIQUID DIFFUSION DURING DRYING OF GRANIFEROUS SORGHUM GRAINS IN DIFFERENT TEMPERATURES

Resumo: O sorgo (*Sorghum bicolor L.*) pertence à família das gramíneas sendo o quinto cereal mais produzido do mundo. Na fase de pós-colheita, a secagem é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e estabilidade dos produtos vegetais. Portanto, objetivou-se com este estudo determinar a difusividade efetiva da água e a energia de ativação em grãos de sorgo granífero durante a secagem em diferentes temperaturas e teores de água iniciais. Os grãos de sorgo (cultivar Dekalb 640) foram colhidos com teor de água inicial de 0,49 kg de água kg⁻¹ de matéria seca. O coeficiente de difusão efetivo foi determinado a partir dos diferentes teores de água iniciais de, aproximadamente, 0,49; 0,40; 0,31; 0,23 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca). Os grãos com diferentes teores de água foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada nas quatro condições de temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C, em bandejas perfuradas. Para descrever a difusão líquida, foi utilizado o modelo da forma geométrica esférica, com aproximação de oito termos. A relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a elevação da temperatura do ar de secagem foi descrita pela equação de Arrhenius. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, seguindo o esquema fatorial 4 x 4 (4 teores de água x 4 temperaturas de secagem), em

três repetições. Os dados de coeficiente de difusão foram submetidos à análise de variância e regressão utilizando software estatístico SISVAR®. Conclui-se que a difusividade dos grãos de sorgo aumenta para uma mesma temperatura de secagem como incremento do teor de água inicial dos grãos. A energia de ativação foi maior para grãos com maior teor de água inicial, sendo de 27,32; 26,75; 22,55 e 20,94 kJ mol⁻¹ para os teores de água iniciais de 0,49; 0,40; 0,31; e 0,23 kg de água kg⁻¹ de matéria seca, respectivamente.

Palavras chave: energia de ativação, coeficiente de difusão, *Sorghum bicolor*.

Abstract: Sorghum belongs to the gramineae family and is the fifth most produced cereal in the world. The post-harvest phase, drying process is the most used to ensure the quality and stability of the vegetables products. Therefore this study aimed to determine the effective diffusivity of water, and the activation energy of graniferous sorghum grains during in different temperatures and initial moisture contents. Sorghum grains (Dekalb 640 cultivate) were harvested with initial moisture content of 0.49 kg water/kg dry matter. Drying was determined from the moisture contents 0.49; 0.39; 0.31; 0.23 (kg water kg⁻¹ dry matter). The grains with different moisture contents were submitted to drying at four different air temperatures of 40, 60, 80 e 100 °C, in a forced circulation convection oven of the air in perforated trays. To describe net diffusion, the spherical geometric shape model was used, with an approximation of eight terms. The relationship between the effective diffusion coefficient and the drying air temperature elevation was described by the Arrhenius equation. The experiment was conducted as a completely randomized design, in a 4 x 4 factorial scheme (4 moisture contents x 4 drying temperatures), with three replicates. The diffusion coefficient data were submitted to analysis of variance and regression using the software statistical SISVAR®. It is concluded that the diffusivity of sorghum grains increases at the same drying temperature as the increment in initial moisture content of grains occurs. The activation energy was higher for grains of sorghum at high initial moisture content, being 27.32; 26.75; 22.55 e 20.94 kJ mol⁻¹ for initial moisture contents of 0.49; 0.40; 0.31; and 0.23 (kg water kg⁻¹ dry matter), respectively.

Kew words: activation energy, diffusion coefficient, *Sorghum bicolor*.

5.1 INTRODUÇÃO

O sorgo (*Sorghum bicolor L.*) pertence à família das gramíneas sendo o quinto cereal mais produzido do mundo. A área cultivada de sorgo no Brasil está estimada em 626,5 mil hectares, com uma produção de grãos de 1,845 milhões toneladas e produtividade média de 2,97 toneladas ha⁻¹. O Estado de Goiás lidera a produção nacional com 851,5 mil toneladas. Em segundo lugar com 499,7 mil toneladas está Minas Gerais, e em terceiro, Mato Grosso com 291,5 mil toneladas (CONAB, 2017).

Com a perspectiva de crescimento da cultura do sorgo, aumentará significativamente a necessidade do aprimoramento de técnicas de produção, colheita e secagem para garantir a sustentabilidade do sistema (Silva, 2010). Conhecer a constituição dos grãos é fundamental para que se possa estabelecer padrões, visando à utilização como fonte básica de alimento para o homem (Magalhães & Durães, 2003).

Na fase de pós-colheita, a secagem é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e estabilidade dos produtos vegetais, pois a diminuição do teor de água do material reduz a atividade biológica na massa de grãos, assim como as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (Araújo et al., 2014).

O tempo para remoção de água de produtos vegetais é dependente de alguns fatores como: método de secagem, temperatura, umidade relativa, teor de água e velocidade do ar de secagem (Dalpasquale & Sperandio, 2010). A modelagem das curvas de secagem determina índices físicos e termodinâmicos relacionados às transferências de calor e massa, dimensionamento de equipamentos, sendo possível comparar a secagem entre espécies ou materiais diferentes e avaliar as peculiaridades dos produtos, um dos índices mais importantes é o coeficiente de difusão (Botelho et al., 2015).

O modelo da difusão líquida tem sido estudado e destaca-se entre os modelos teóricos aplicados ao processo de secagem de produtos vegetais, cujos parâmetros não são rigorosamente representativos dos diversos mecanismos que prevalecem no transporte de água em produtos agrícolas. Pesquisadores como (Costa et al., 2011; Araújo et al., 2017) têm se baseado na teoria da difusão líquida para estabelecer a difusão da água em função do gradiente de concentração (Brooker et al., 1992).

A água movimenta-se no interior dos produtos vegetais durante a secagem por diferentes formas, dentre elas a difusão líquida, difusão capilar, difusão na superfície, o fluxo hidrodinâmico, a difusão de vapor e difusão térmica (Martinazzo et al., 2007). O coeficiente de difusão descreve a velocidade de saída de água do grão, como a

difusividade varia conforme mudam as condições de secagem, como temperatura, teor de água inicial, composição, velocidade do ar, ela não é intrínseca ao material, e assim, convencionou-se denominá-la de difusividade efetiva (Oliveira et al., 2006).

Devido a variação da difusividade conforme a mudança nas condições de secagem, objetivou-se com este estudo determinar a difusividade efetiva da água e a energia de ativação em grãos de sorgo granífero durante a secagem em diferentes temperaturas e teores de água iniciais.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Pós-colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde. Os grãos de sorgo (cultivar Dekalb 640) foram colhidos manualmente, no município de Jataí (GO), com teor de água inicial de (0,49 kg de água kg^{-1} de matéria seca). Para o beneficiamento dos grãos foram utilizadas peneiras para pré-limpeza e homogeneizador.

A partir do teor de água inicial dos grãos foram obtidos mais três teores de água em estufa com temperatura de secagem de 40 °C, conhecendo-se o teor de água inicial de 0,49 (kg de água kg^{-1} de matéria seca), acompanhando-se a redução por gravimetria, obteve-se os teores de água estipulados de 0,40; 0,31; 0,23 (kg de água kg^{-1} de matéria seca). Assim o coeficiente de difusão efetivo foi determinado a partir dos diferentes teores de água iniciais de, aproximadamente, 0,49; 0,40; 0,31; 0,23 (kg de água kg^{-1} de matéria seca). Os grãos com diferentes teores de água foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada nas quatro condições de temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C, em bandejas perfuradas de aço inox de 25 cm de diâmetro, perfazendo uma camada de 4 cm contendo em cada bandeja 0,25 kg de amostra de grãos. A temperatura média do ar ambiente foi $25,3 \pm 1,1$ °C e a umidade relativa de $39,8 \pm 2,3\%$ durante todo o período de secagem.

O processo de secagem foi interrompido quando os grãos de sorgo granífero atingiram os teores de água final de $0,14 \pm 0,007$ kg de água kg^{-1} de matéria seca, para as temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C, respectivamente, determinado em estufa a 105 ± 1 °C, durante 24 horas, em três repetições (BRASIL, 2009), com adaptações.

Para a determinação das razões de teor de água do sorgo durante a secagem utilizou-se a seguinte expressão:

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

em que:

RX: razão de teor de água;

X: teor de água do produto (kg de água kg⁻¹ de matéria seca);

X_i: teor de água inicial do produto (kg de água kg⁻¹ de matéria seca);

X_e: teor de água de equilíbrio do produto (kg de água kg⁻¹ de matéria seca).

Ao longo da secagem foi acompanhada a redução do teor de água pelo método gravimétrico (perda de massa), com auxílio de uma balança analítica com resolução de 0,01 g, conhecendo-se o teor de água inicial do produto, até atingir o teor de água desejado.

Para descrever a difusão líquida, foi utilizado o modelo da forma geométrica esférica, com aproximação de oito termos (Afonso Júnior & Corrêa, 1999), de acordo com a seguinte expressão:

$$RX = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{r} \right] \quad (2)$$

em que:

n: número de termos;

D: coeficiente de difusão líquida, m² s⁻¹;

r: raio equivalente, m.

Os raios equivalentes dos grãos de sorgo foram determinados pela seguinte expressão:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_g}{4 \cdot \pi}} \quad (3)$$

em que:

V_g: volume dos grãos, m³.

O volume de cada grão de sorgo (V_g) foi obtido pela medição dos três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura), em quinze unidades, no final da secagem, com auxílio de um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm, de acordo com a seguinte expressão:

$$Vg = \frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot c}{6} \quad (4)$$

em que:

a: comprimento, m;

b: largura, m;

c: espessura, m.

A relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a elevação da temperatura do ar de secagem foi descrita pela equação de Arrhenius:

$$D = D_o \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T_{abs}}\right) \quad (5)$$

em que:

D_o : fator pré-exponencial;

E_a : energia de ativação, kJ mol^{-1} ;

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

T_{abs} : temperatura absoluta, K.

Os coeficientes da expressão de Arrhenius podem ser facilmente obtidos linearizando a equação 6 com aplicação do logaritmo na seguinte forma:

$$\text{Ln}D = \text{Ln}D_o - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T_{ab}} \quad (6)$$

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, seguindo o esquema fatorial 4×4 (4 teores de água x 4 temperaturas de secagem), em três repetições. Os dados de coeficiente de difusão foram submetidos à análise de variância e regressão utilizando software estatístico SISVAR® (Ferreira, 2011). Os modelos foram selecionados com base na significância da equação, pelo teste F, na significância dos coeficientes de regressão utilizando-se o teste de “t”, adotando-se o nível de 5% de significância, no coeficiente de determinação.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 estão apresentadas as curvas de secagem do sorgo granífero para as temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C, com diferentes teores de água iniciais de 0,49; 0,40; 0,31; e 0,23 (kg de água kg^{-1} de matéria seca).

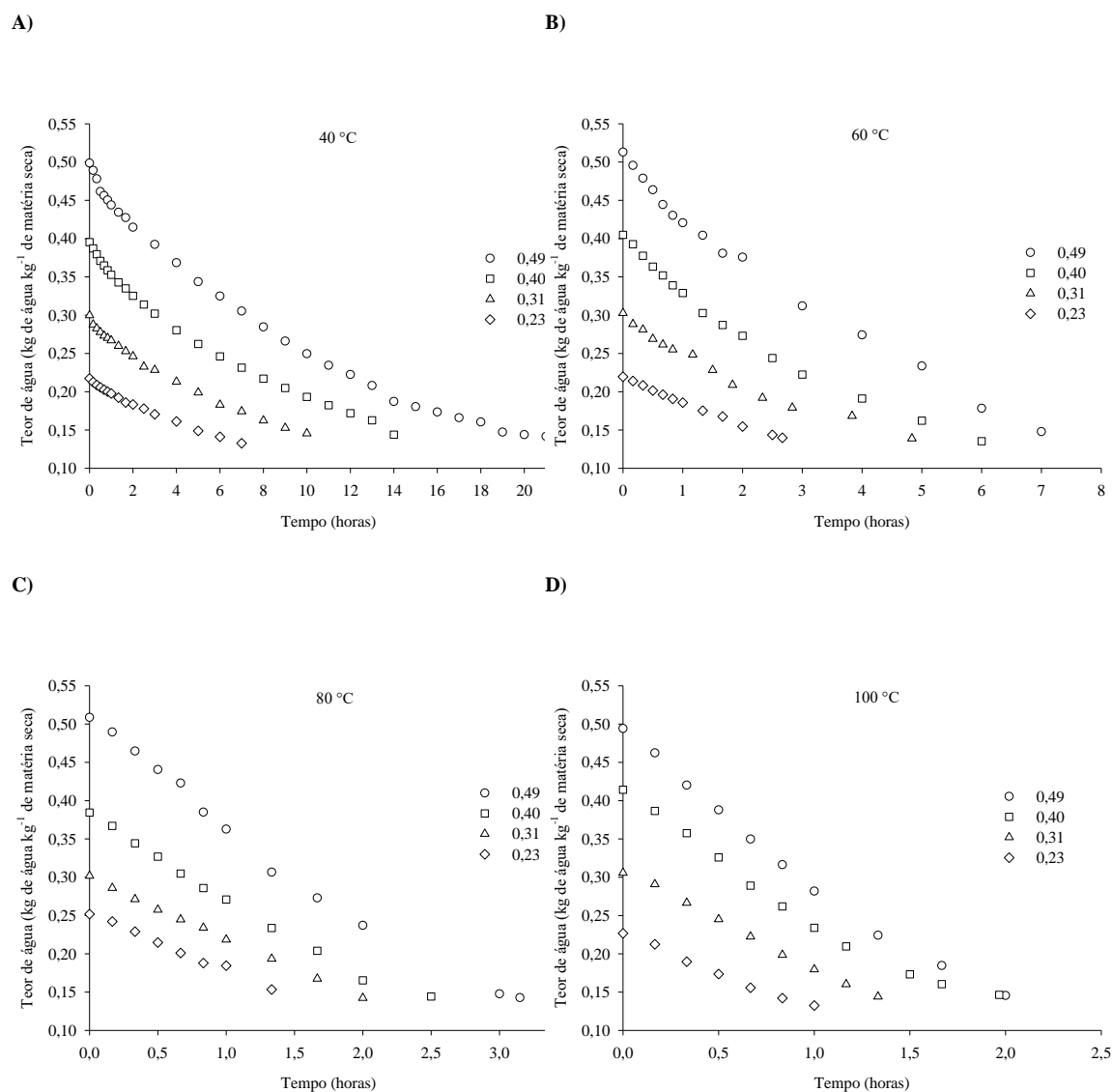


Figura 1. Teores de água de sorgo granífero ao longo da secagem para diferentes temperaturas (A) 40 °C, (B) 60 °C, (C) 80 °C, (D) 100 °C.

Observa-se que à medida que a temperatura aumenta o tempo de secagem diminui, e os teores de água iniciais mais altos necessitam maior tempo de secagem em relação aos teores menores para atingir o teor de água de 0,14 kg de água kg^{-1} de matéria seca. Isso ocorre devido ao aumento da disponibilidade de energia para que ocorra a vaporização da água e a elevação do coeficiente de transferência de massa com o aumento da temperatura do ar de secagem. Desta forma, evidencia que a cinética de secagem dos grãos de sorgo apresenta comportamento semelhante da maioria dos produtos agrícolas observado por diversos pesquisadores (Resende et al., 2007; Ullmann et al., 2010; Oliveira et al., 2014).

Na Tabela 1 pode se observar o tempo necessário para que ocorresse a secagem em cada temperatura e teor de água, até atingirem teores de água final de $0,14 \pm 0,007$ kg de água kg^{-1} de matéria seca. Destacam-se os menores teores de água com menor tempo de secagem conforme o aumento da temperatura.

Tabela 1. Tempo (horas) necessário para o processo de secagem dos grãos de sorgo granífero até atingir o teor de água de 0,14 (kg de água kg^{-1} de matéria seca) nas diferentes condições

Temperatura (°C)	Teor de água inicial (kg de água kg^{-1} de matéria seca)			
	0,23	0,31	0,40	0,49
40	7,0	10,0	14,0	21,0
60	2,6	4,8	6,0	7,0
80	1,33	2,0	2,5	3,15
100	1,0	1,33	1,97	2,0

A difusividade dos grãos de sorgo aumenta para uma mesma temperatura de secagem conforme ocorre o aumento do teor de água inicial dos grãos (Figura 2).

Para cada 1 °C de aumento na temperatura ocorre a elevação de 0,0173; 0,0201; 0,0280; 0,0298 $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ no coeficiente de difusão efetivo, para os teores de água 0,23; 0,31; 0,40; 0,49 (kg de água kg^{-1} de matéria seca) (Figura 2). Observa-se um comportamento linear crescente, entre os diferentes teores de água para as temperaturas de secagem, em que os valores variaram na faixa de teor de água de 0,23 a 0,49 kg de água kg^{-1} de matéria seca, de $0,39 \times 10^{-11}$ a $0,45 \times 10^{-11} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, respectivamente, para a temperatura de 40 °C. Enquanto que para as temperaturas de 60; 80 e 100 °C os valores do coeficiente de difusão encontraram-se na faixa de $0,47 \times 10^{-11}$ a $0,69 \times 10^{-11} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$; $0,78 \times 10^{-11}$ a $1,43 \times 10^{-11} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, e $1,44 \times 10^{-11}$ a $2,43 \times 10^{-11} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, respectivamente. Estes resultados estão coerentes com os relatados na literatura para secagem de produtos agrícolas que, de acordo com Madamba et al. (1996), apresentam-se na ordem de 10^{-9} a $10^{-11} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

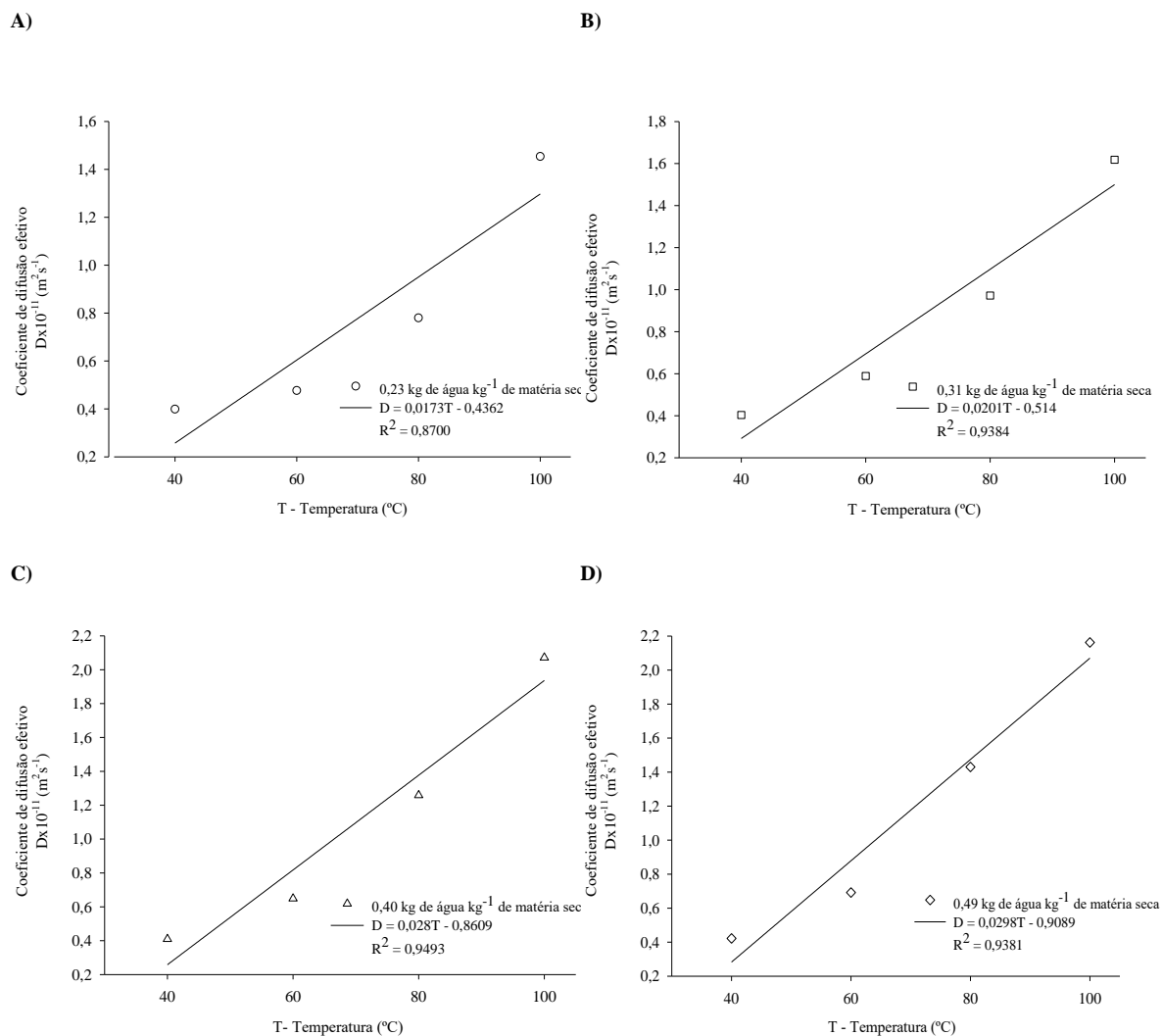


Figura 2. Valores do coeficiente de difusão efetivo ($m^2 s^{-1}$) obtidos para a secagem dos grãos de sorgo granífero em diferentes temperaturas e teores de água iniciais de (A) 0,23 (B) 0,31 (C) 0,40 e (D) 0,49 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca).

Houve efeito da temperatura e do teor de água inicial no coeficiente de difusão efetivo. Sabe-se que quando ocorre aumento na temperatura do ar de secagem, a viscosidade, que representa a resistência do fluido ao escoamento da água, diminui, resultando em alterações na difusão da água nos capilares dos grãos de sorgo, favorecendo a movimentação deste fluido no produto (Goneli et al., 2009). Consequentemente, a redução do teor de água provoca o decréscimo da resistência do fluido, afetando positivamente a secagem.

Para a temperatura de secagem de 40 °C (Figura 3), observou-se menor variação nos valores do coeficiente de difusão, sendo de $0,39 \times 10^{-11}$; $0,40 \times 10^{-11}$; $0,42 \times 10^{-11}$ e $0,45 \times 10^{-11}$, para os teores de água de 0,23; 0,31; 0,40; 0,49 kg de água kg⁻¹ de matéria

seca, respectivamente. A tendência de redução da difusividade com o decréscimo do teor de água inicial dos grãos foi linear. A medida que ocorre um aumento da temperatura de secagem, a diferença dos coeficientes de difusão entre os teores de água iniciais apresenta maiores variações, seguindo o comportamento linear de maior difusividade para grãos com teores de água maiores.

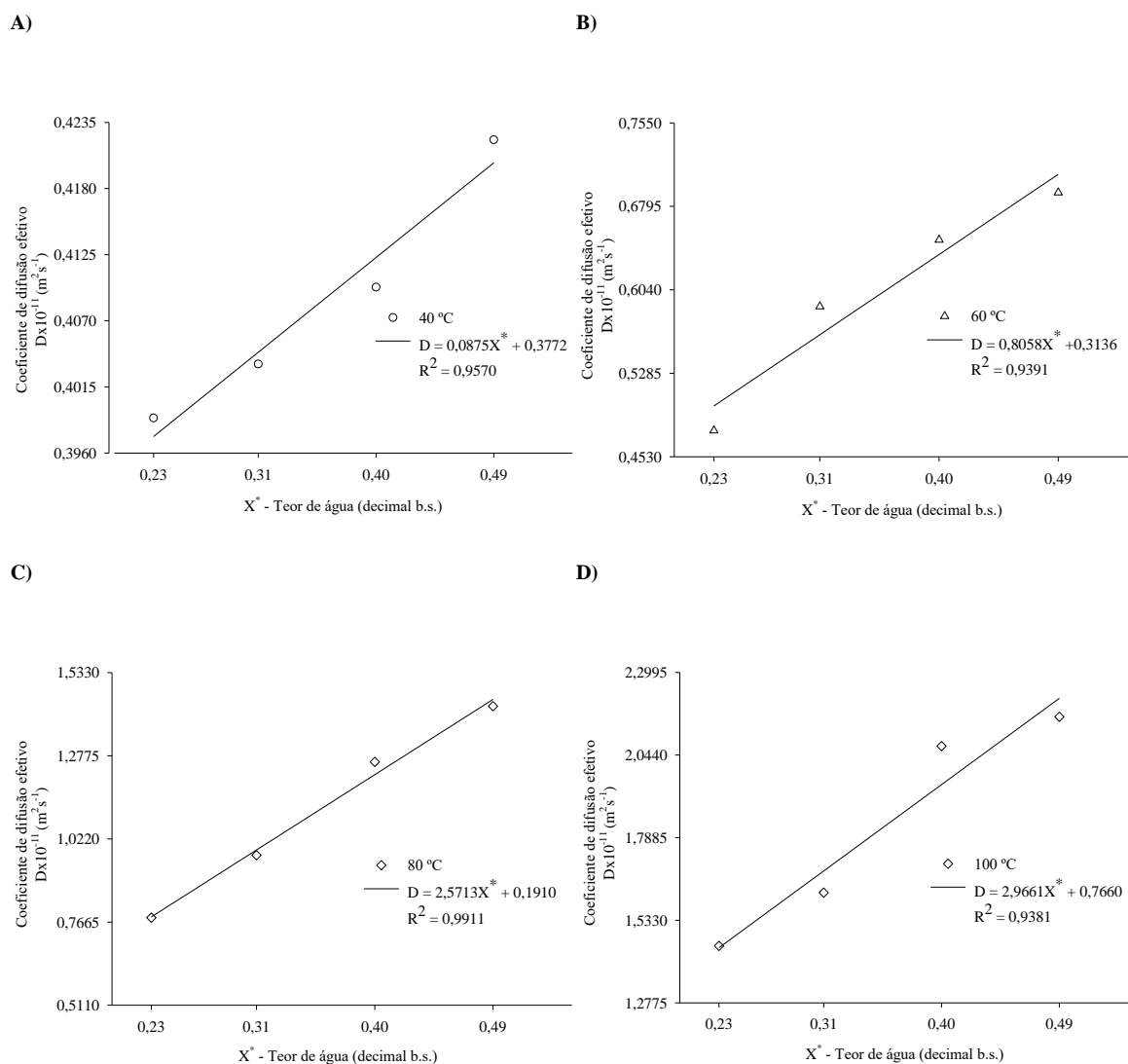


Figura 3. Valores do coeficiente de difusão efetivo ($m^2 s^{-1}$) obtidos para a secagem dos grãos de sorgo granífero em diferentes teores de água iniciais e temperaturas de (A) 40 °C, (B) 60 °C, (C) 80 °C e (D) 100 °C.

Os valores do coeficiente de difusão efetivo dos grãos de sorgo granífero aumentaram linearmente com a elevação da temperatura corroborando aos resultados relatados por: Almeida et al. (2009), para sementes de feijão adzuki; Botelho et al. (2015) grãos de sorgo e Araújo et al. (2017) para frutos de amendoim.

O fator que pode ser acrescentado a esta variação do coeficiente de difusão efetivo é que, com a elevação da temperatura, aumenta-se o nível de vibração das moléculas de água, o que, também, contribui para a celeridade da difusão (Goneli et al., 2007), conseqüentemente, em temperaturas mais baixas o nível de vibração é menor, que possibilita o aumento da resistência da transferência de massa e dificulta a saída de água em maior velocidade.

Neste sentido, o teor de água do produto também influi na condição da vibração, pois quanto maior a disponibilidade de água no produto, maior o nível de vibração das moléculas de água, e conseqüentemente, maior é a taxa de secagem, por decorrência do aumento da difusividade.

O coeficiente de difusão efetivo dos grãos de sorgo com relação à temperatura do ar de secagem foi representado pela expressão de Arrhenius que fornece a relação $E_a R^{-1}$ enquanto a interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de D_0 ; conforme Figura 4. Sendo a energia de ativação calculada da reta de 27,32; 26,75; 22,55 e 20,94 kJ mol^{-1} para os teores de água iniciais de 0,49; 0,40; 0,31; e 0,23 $\text{kg de água kg}^{-1}$ de matéria seca, respectivamente.

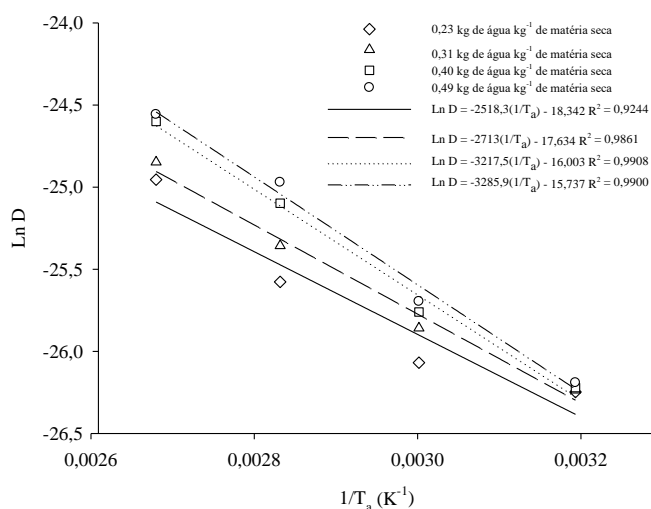


Figura 1. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura (40, 60, 80 e 100 °C) do ar de secagem de grãos de sorgo granífero em diferentes teores de água.

Observa-se que com o aumento do teor de água inicial dos grãos de sorgo granífero ocorre um aumento na energia de ativação. Trabalhando com duas cultivares de sorgo com teores de água de 0,37 (BRS 308) e 0,39 (NIDERA A 9721) $\text{kg de água kg de matéria seca}^{-1}$, Botelho et al. (2015) encontraram os valores de energia de ativação, 33,71 kJ mol^{-1} para a cultivar BRS 308 e 35,71 kJ mol^{-1} para a cultivar

NIDERA A 972; é possível observar que em ambos os trabalhos a maior energia de ativação ocorreu em grãos teores de água iniciais superiores.

Na secagem do sorgo cultivar AS4620 com o teor de água inicial de $0,228 \pm 0,003$ kg de água kg^{-1} de matéria seca nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C sob duas diferentes velocidades de ar de secagem, 0,5 e 1,0 m s^{-1} , Resende et al. (2014) observaram que o coeficiente de difusão aumentou de acordo que se aumentou a velocidade do ar de secagem; $0,638 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $1,11 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a velocidade de ar de 0,5 m s^{-1} e $1,024 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $2,355 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a velocidade do ar de secagem de 1,0 m s^{-1} , na faixa de temperatura de 40 a 60 °C. Conseqüentemente, esse aumento da difusividade provocou o aumento da energia de ativação para a condição de maior difusividade, variando de 27,12 a 42,05 kJ mol^{-1} , para 0,5 a 1,0 m s^{-1} respectivamente, assim como observado no presente trabalho.

Em função da temperatura de secagem Gely & Giner (2007) trabalhando com soja, definiram a energia de ativação para dois intervalos de temperaturas; superiores a 50 °C a energia de ativação foi de 28,80 kJ mol^{-1} , e para temperaturas abaixo de 50 °C foi de 16,60 kJ mol^{-1} . Assim como o presente trabalho, os autores obtiveram maior energia de ativação para a situação de maior difusividade. Os autores atribuíram à elevação da energia de ativação a alta mobilidade molecular, o mesmo pode ser observado para a secagem de sorgo granífero em diferentes teores de água, onde grãos com maior teor de água apresentam maior taxa de mobilidade de água, conseqüentemente maior difusividade e maior energia de ativação para ocorrer o processo.

A energia de ativação na secagem relaciona-se juntamente com a difusividade na quantidade de energia necessária para que a transformação física ocorra, ou seja, a transformação da água livre em vapor (Corrêa et al., 2010). Para a secagem dos grãos de sorgo granífero em diferentes teores de água o maior consumo energético é atribuído ao maior teor de água inicial, seguindo pela teoria de energia de transformação, o alto teor de água no estado adsorvido e livre requer uma demanda energética superior aos grãos de menor teor de água para que ocorra o processo de dessorção. De acordo com Brooker et al. (1974), a quantidade de energia absorvida pelo material na secagem está diretamente relacionada à quantidade de água, promovendo a elevação da temperatura e evaporação da água.

A diferença na energia de ativação para a secagem do sorgo granífero também pode ser explicada pela temperatura de transição vítrea (T_v), que varia em função da composição química do alimento, como amido podendo influenciar a estabilidade da textura, assim como as propriedades espessante e gelatinizantes (Guillon; Champ, 2000), e principalmente do teor de água (Leite et al., 2005). Ross & Karel (1991) observaram um decréscimo na T_v com o aumento do teor de água do produto. A água provoca uma redução drástica na T_v de polímeros alimentícios (Slade & Levine, 1991).

A redução na T_v faz com que ocorram distintos valores de energia de ativação para diferentes teores de água do produto. Em temperaturas menores a energia de ativação é mais fraca, devido a rigidez do material, com menor volume livre disponível para o movimento translacional de moléculas de água. Além disso, a secagem em altas temperaturas faz com que o material se torne mais macio e mais elástico, ocasionando uma maior energia de ativação (Ross, 1995; Yang et al., 2003). Em decorrência de uma maior exposição às temperaturas superiores a T_v os grãos de sorgo com maiores teores de água iniciais apresentaram valores de energia de ativação superiores.

Boudries et al. (2009) relataram maior temperatura máxima de gelatinização e menor entalpia de gelatinização do amido do sorgo em comparação ao amido de outros cereais, como trigo, milho e arroz, além de maior poder de inchamento e solubilidade. Valores semelhantes para a energia de ativação foram destacados para diversos produtos agrícolas como o trigo parboilizado de $27,01 \text{ kJ mol}^{-1}$ (Mohapatra & Rao, 2005); nabo forrageiro de $24,78 \text{ kJ mol}^{-1}$ (Sousa et al., 2011); grãos de crambe $37,07 \text{ kJ mol}^{-1}$ (Costa et al., 2011); feijão apresentou-se de $27,16 \text{ kJ mol}^{-1}$ (Morais et al., 2013). De acordo com Zogzas et al. (1996) a energia de ativação para produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110 kJ mol^{-1} , estando a energia de ativação encontrada para os diferentes teores de água iniciais do sorgo incluída neste intervalo.

Comparando-se a energia de ativação do sorgo granífero com diferentes cultivares de milho, observa-se que os valores encontrados para o sorgo granífero foram superiores aos obtidos para o milho cultivar AG 7088 com teor de água inicial de $0,235 \text{ kg de água kg}^{-1}$, de matéria seca sendo de $19,09 \text{ kJ mol}^{-1}$ (Oliveira et al., 2012), e para a secagem do milho em espiga com teor de água inicial de $0,45 \text{ kg de água kg}^{-1}$ de matéria seca, a energia de ativação foi de $17,64 \text{ kJ mol}^{-1}$ (Corrêa et al., 2011). Por outro lado, Vitorino (2009) trabalhando com a cultivar DKB 979, verificou o valor de $31,54 \text{ kJ mol}^{-1}$, para o teor de água inicial de $0,35 \text{ kg de água kg}^{-1}$ de matéria seca, no início da secagem, sendo este valor superior ao encontrado para o sorgo nos diferentes teores de

água. Convertendo-se em energia despendida para o processo de secagem ambas as culturas apresentam eficiência energética equivalente.

5.4 CONCLUSÃO

A difusividade efetiva dos grãos de sorgo aumenta para uma mesma temperatura de secagem conforme ocorre o aumento do teor de água inicial dos grãos.

A energia de ativação foi maior para grãos de sorgo granífero com maior teor de água inicial, sendo de 27,32; 26,75; 22,55 e 20,94 kJ mol⁻¹ para os teores de água iniciais de 0,49; 0,40; 0,31; e 0,23 kg de água kg⁻¹ de matéria seca, respectivamente.

5.5 REFERÊNCIAS

- Almeida, D. P.; Resende, O.; Costa, L. M.; Mendes, U. C.; Sales, J. F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). Global Science and Technology, v. 2, p. 72-83, 2009.
- Araujo, W.D.; Goneli, A. L. D.; Souza, C.M.A.; Gonçalves, A. A.; Vilhasantis, H.C.B. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.18, p.279–286, 2014.
- Araújo, W. D.; Goneli, A. L. D.; Hartmann Filho, C. P.; Martins, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. Revista Ciência Agronômica, v. 48, p. 448-457, 2017.
- Brooker, D.B.; Bakker-Arkema, F. W. E.; Hall, C. W. Drying Cereal Grains. Connecticut. The Avi Publishing Company.265 p, 1974.
- Brooker, D.B.; Bakker-Arkema, F.W.; Hall, C.M. Drying and storage of grains and oilseeds. New York: Van Nostrand Reinhold. 450 p., 1992.
- Botelho, F.M.; Garcia, T.R.B.; Viana, J.L.; Botelho, S.C.C.; Sousa, A.M.B.S. Cinética de secagem e determinação do coeficiente de difusão efetivo de grãos de sorgo. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.14, p. 260-272, 2015.
- CONAB - Companhia Nacional De Abastecimento 2017. Acompanhamento da safra brasileira: grãos safra 2016/2017– 1º levantamento. Disponível em http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_10_16_16_34_39_graos_outubro_2017.pdf. Acesso em 15 nov. 2017.

- Corrêa, P. C.; Botelho, F. M.; Oliveira, G. H. H.; Goneli, A. L. G.; Resende, O.; Campos, S. C. Mathematical modeling of the drying process of corn ears. *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, v. 33, p. 575-581, 2011.
- Costa, L. M.; Resende, O.; Gonçalves, D. N.; Sousa, K. A. Coeficiente de difusão efetivo para a secagem de sementes de crambe (*Crambe abyssinica*). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 1089-1096, 2011.
- Dalpasquale, V.A.; Sperandio, D. Modelo de simulação de secagem de produtos agrícolas usando entalpia do ar constante. *Engenharia Agrícola*, v.30, p.726-731, 2010.
- Gely, M. C.; Giner, S. A. Diffusion coefficient relationships during drying of soybean cultivars. *Biosystems Engineering*, v. 96, p. 213-222, 2007.
- Goneli, A. L. D.; Corrêa, P. C.; Resende, O.; Reis Neto, S. A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 27, p. 135-140, 2007.
- Goneli, A. L. D.; Corrêa, P. C.; Afonso Júnior, P. C.; Oliveira, G. H. H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. *Revista Brasileira de Armazenamento, Especial Café*, p.64-73, 2009.
- Guillon, F.; Champ, M. Structural and physical properties of dietary fibres, and consequences of processing on human physiology. *Food Research International*, v. 33, p. 233–245, 2000.
- Leite, J. T. C.; Murr, F. E. X.; Park, K. J. Transições de fases em alimentos: influência no processamento e na armazenagem. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande*, v.7, p.83-96, 2005.
- Madamba, P.S.; Driscoll, R.H.; Buckle, K.A. The thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, v.29, p.75-97, 1996.
- Martinazzo, A. P.; Corrêa, P. C.; Resende, O.; Melo, E. C. M. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, p. 301-306, 2007.
- Mohapatra, D.; Rao, P. S. A Thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, v. 66, p. 513-518, 2005.
- Morais, S. J. S.; Devilla, I. A.; Ferreira, D. A.; Teixeira, I. R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). *Revista Ciência Agronômica*, v. 44, n. 3, p. 455-463, 2013.
- Oliveira, R. A.; Oliveira, W. P.; Park, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.26, p.181-189, 2006.

- Oliveira, D. E. C.; Resende, O.; Smaniotto, T. A. S.; Campos, R. C.; Chaves, T. H. Cinética de Secagem dos grãos de milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 11, p. 190-201, 2012.
- Oliveira, D. E. C.; Resende, O.; Bessa, J. F. V.; Kester, A. N.; Smaniotto, T. A. S. Mathematical modeling and thermodynamic properties for drying soybean grains. *African Journal of Agricultural Research*, v.10, p.31-38, 2014.
- Resende, O.; Corrêa, P. C.; Jarén, C.; Moure, A. J. Bean moisture diffusivity and drying kinetics: a comparison of the liquid diffusion model when taking into account and neglecting grain shrinkage. *Spanish Journal of Agricultural Research*, v. 05, p. 51-58, 2007.
- Resende, O.; Oliveira, D. E. C.; Chaves, T. H.; Bessa, J. F. V. Kinetics and thermodynamic properties of the drying process of sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) grains. *African Journal of Agricultural Research*, v. 09, p. 2453-2462, 2014.
- Roos, Y.; Karel, M. Plasticizing effect of water on thermal behavior and crystallization of amorphous food models. *Journal of food science*. v.56 p. 38-43. 1991
- Ross, Y. H. Phase transitions in foods. Academic Press, New York, 1995.
- Tardin, F.D.; Rodrigues, J.A.S.; Coelho, R. R. Cultivo do Sorgo. Cultivares. Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de Produção, 2010.
- Ullmann, R.; Resende, O.; Sales, J. F.; Chaves, T. H. Qualidade das sementes de pinhão manso submetidas à secagem artificial. *Revista Ciência Agronômica*, v. 41, p. 442-447, 2010.
- Slade, L.; Levine, H. Beyond water activity: recent advances based on an alternative approach to the assessment of food quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. v.30, p. 115- 360. 1991.
- 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, p. 883-892, 2011.
- Vitorino, R. B. Modelagem e simulação matemática do processo de secagem de milho. 2009. 52 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados
- Yang, W.; Jia, C. C.; Siebenmorgen, T. J.; Pan, Z.; Cnossen, A. G. Relationship of kernel moisture content gradients and glass transition temperatures to head rice yield. *Biosystems Engineering*, v. 85, p. 467-476, 2003.
- Zogzas, N. P.; Maroulis, Z. B.; Marinou-Kouris, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, v.14, p.2225-2253, 1996.

CAPÍTULO III

(Normas de acordo com a revista Engenharia Agrícola e Ambiental)

CARACTERIZAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE FARINHA DE SORGO

SORGHUM FLOUR CHARACTERIZATION AND STORAGE

Resumo: O presente estudo foi conduzido com objetivo de avaliar as características nutricionais e físico-químicas, funcionais e o armazenamento de farinhas produzidas a partir de grãos de sorgo submetidos a secagem. Os grãos de sorgo (cultivar Dekalb 640) foram colhidos manualmente, no município de Jataí Goiás, os grãos foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada sob condições de temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C até as amostras apresentar teores de água final de aproximadamente $0,14 \pm 0,007$ kg de água kg^{-1} de matéria seca. A caracterização das farinhas foi realizada para cada temperatura de secagem 40, 60, 80 e 100 °C, no final da obtenção (T0). O estudo da estabilidade das farinhas foi realizado depois de 3, 6, 9, 12 meses de armazenamento. A secagem propiciou a redução do teor de água inicial, proteína, pH, e índices de solubilidade em água e leite e atividade antioxidante exceto para o tratamento 100 °C, aumento do conteúdo de fenólicos totais, acidez e índice de absorção em água e massa específica aparente. Promoveu alterações na cor induzindo a redução da

intensidade dos tons vermelhos e amarelo aumento da tonalidade e escurecimento das farinhas. Provocou desnaturação e redução no teor de proteínas e gelatinização do amido, tratamentos de 40 e 60 °C apresentaram propriedades tecnológicas favoráveis para enriquecer alimentos. Foram observados ao longo do armazenamento aumento do índice de acidez e cinzas e redução dos valores de pH, compostos fenólicos e atividade antioxidante. O armazenamento da farinha de sorgo promoveu alterações nas características avaliadas, exceto para o teor de água, sólidos solúveis e proteína.

Palavras chave: Estabilidade de compostos, qualidade nutricional, temperatura de secagem.

Abstract: This study aimed to evaluate nutritional, physicochemical, functional characteristics and storage of flour produced from sorghum grains submitted to drying. Sorghum grains (cultivar Dekalb 640) were harvested by hand in the municipality of Jataí Goiás. The grains were submitted to drying at four different air temperatures of 40, 60, 80 e 100 °C, in a forced circulation convection oven of the air in perforated trays, until the samples showed final moisture content of approximately $0,14 \pm 0,007$ kg water kg^{-1} dry matter. Flour characterization was performed for each drying temperature 40, 60, 80 and 100 °C, at the end of the production (T0). The flour stability study was performed after 3, 6, 9, 12 months of storage. Drying provided the reduction of initial moisture content, protein, pH, water and milk solubility indexes and antioxidant activity except for the 100 °C treatment, increase of total phenolic content, acidity and absorption index in water and specific mass. apparent. It promoted changes in color inducing a reduction in the intensity red and yellow tones, increasing the hue and darkening of the flour. It caused denaturation and reduction in protein content and starch gelatinization, treatments of 40 and 60 °C showed favorable technological properties to enrich food. Increasing acidity and ash index and reduction of pH, phenolic compounds and antioxidant activity were observed throughout storage. The sorghum flour storage promoted alterations in the evaluated characteristics, except for the water content, soluble solids and protein.

Keywords: Compound stability, drying temperature, nutritional quality.

6.1 INTRODUÇÃO

O sorgo possui elevado valor nutricional, é um alimento livre de glúten, contém altos níveis de amido e fitoquímicos, particularmente fenólicos ricos em antioxidantes, entretanto este cereal não é valorizado nos sistemas alimentares comerciais (Anyango & Taylor, 2019; Palavecino et al., 2019).

Os compostos bioativos presentes em algumas variedades de sorgo como os ácidos fenólicos, oferecem alta capacidade antioxidante a este alimento, podem reduzir o risco de desenvolver doenças crônicas, como diabetes, obesidade, hipertensão, doenças cardiovasculares, câncer, atuam como antimicrobianos, anti-inflamatório e na redução do estresse oxidativo (Rao et al., 2018; Oliveira et al., 2017).

Em países como Brasil, Austrália e Estados Unidos e Brasil, o sorgo é cultivado principalmente para a produção de ração animal. Entretanto o consumo deste cereal na alimentação humana está se expandindo em função do seu potencial funcional e sensorial e benefícios a saúde, pois é um grão isento de proteínas formadoras de glúten, pode ser uma alternativa para indivíduos com doença celíaca e intolerâncias ao trigo, bem como ser um substituto dos cereais convencionais em razão dos altos níveis de compostos bioativos, minerais, fibra alimentar e vitamina E (Anuniação et al., 2017).

De acordo com Chávez et al. (2018), existem poucos produtos sem glúten disponíveis no mercado. A doença celíaca acomete cerca de 1% da população mundial, e atualmente o único tratamento para pessoas intolerantes é a eliminação do glúten da sua dieta. O progressivo aumento de população celíaca, e de pessoas com sensibilidade ao glúten, ou mesmo aqueles que se privam do consumo, ocasionou uma crescente demanda por produtos isento glúten (Bromilow et al., 2017; Noya et al., 2017; Rzychon et al., 2017).

Dessa forma, são necessárias maneiras inovadoras de incorporar o sorgo à dieta tradicional, a fim de aproveitar as potencialidades deste cereal, e os benefícios que elas podem oferecer (Awika & Rooney, 2004).

O melhoramento das propriedades da farinha de sorgo poderia permitir a introdução desse cereal na indústria alimentícia e, portanto, nas dietas humanas em todo o mundo. Neste sentido, tem-se um interesse crescente nos últimos anos em métodos físicos para melhorar as propriedades funcionais da farinha, uma vez que aumentam suas aplicações sem recorrer a reagentes químicos. Isso os transforma em métodos ecologicamente corretos, com maior aceitação pelos consumidores (Palavecino et al., 2019).

O tratamento térmico tem sido sugerido como sendo um método viável para melhorar a qualidade do bolo e do pão, a exposição ao calor desnatura a proteína e as enzimas na farinha enquanto aumenta a expansão da massa, alterando a viscosidade da massa ocasionando a redução do encolhimento durante o cozimento (Marston et al., 2016).

Assim, objetivou-se com este estudo avaliar o potencial das farinhas de sorgo integral produzidas a partir de grãos submetidos a diferentes temperaturas de secagem, e avaliar a qualidade da farinha de sorgo ao longo do armazenamento.

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Pós-colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde. Os grãos de sorgo (cultivar Dekalb 640) foram colhidos manualmente, no município de Jataí (GO), com teor de água inicial de $(0,49 \text{ kg de água kg}^{-1} \text{ de matéria seca})$. Para o beneficiamento dos grãos foram utilizadas peneiras para pré-limpeza e homogeneizador.

A partir do teor de água inicial os grãos foram submetidos à secagem em estufa com ventilação de ar forçada nas quatro condições de temperaturas de 40, 60, 80 e 100°C, em bandejas perfuradas de aço inox de 25 cm de diâmetro, pesadas e divididas em 3 porções com 450 gramas de grãos para cada temperatura respectivamente. A temperatura média do ar ambiente foi $25,3 \pm 1,1 \text{ }^\circ\text{C}$ e a umidade relativa de $79,8 \pm 2,3\%$ durante todo o período de secagem.

O processo de secagem (Tabela 1) foi interrompido quando os grãos de sorgo granífero atingiram os teores de água final de aproximadamente $0,14 \pm 0,007 \text{ kg de água kg}^{-1} \text{ de matéria seca}$, para as temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C, determinado em estufa a $105 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 24 horas, em três repetições (BRASIL,2009).

Obtenção e Armazenamento das Farinhas de Sorgo

Após o processo de secagem as amostras de grãos de sorgo foram moídas (moinho elétrico DIOGOMAQ) e peneiradas (peneira de aço inox de 1 mm). As farinhas foram acondicionadas em embalagens plásticas de polipropileno transparente e armazenadas à temperatura ambiente ao abrigo da luz.

A caracterização das farinhas foi realizada para cada temperatura de secagem 40, 60, 80 e 100 °C, no final da obtenção (T0). O estudo da estabilidade das farinhas foi

realizado aos 3, 6, 9, 12 meses de armazenamento, somente para a farinha cuja temperatura de secagem mantivesse as características nutricionais e funcionais, mediante o resultado das análises da caracterização. As análises subsequentes foram realizadas em triplicata.

Composição centesimal

O teor de água foi realizado segundo metodologia do Instituto Adolfo Lutz (2008) por secagem direta a 105 °C até massa constante. As cinzas (matéria mineral) foram determinadas pelo método gravimétrico de incineração em mufla (Quimis®/Q318S), a 550 °C, por 5 horas, conforme método nº 923.03 (AOAC, 2000). O resultado foi expresso em g/100g⁻¹ de matéria seca. O teor de proteína bruta foi determinado segundo método quantitativo nº 920.87 em destilador micro-Kjeldahl (Tecnal®/TE-0363), a partir do teor de nitrogênio total, com fator de conversão de 5,75 para proteínas vegetais (AOAC, 2000; Greenfield & Southgate, 2003). O resultado foi expresso em g/100 g de matéria seca. Para a determinação do extrato etéreo, utilizou-se metodologia de extração contínua em aparelho tipo Soxhlet, com uso de solvente orgânico hexano P.A., durante o período de 8 horas de extração, segundo método nº 925.38 (AOAC, 2000). O resultado foi expresso em g/100g⁻¹ de matéria seca. Os carboidratos totais foram calculados pelo método da diferença da composição centesimal, subtraindo de 100% os teores de cinzas, proteína bruta e extrato etéreo, expresso em g/100 g de matéria seca (Sniffen et al., 1992; FAO, 2003).

Análises Físico-Químicas

O pH (potencial hidrogeniônico) foi aferido em peagâmetro digital de bancada (ION®/PHB-500) com compensação de temperatura, previamente calibrado em soluções tamponantes de pH 4,0 e 7,0, a partir da imersão do eletrodo em solução aquosa da FMP (1:10), após dez minutos de agitação em agitador magnético (Biomixer®/78 HW-1) (AOAC, 2000).

A acidez foi determinada por titulação potenciométrica, a partir da solução previamente preparada para análise de pH. Procedeu-se titulação ácido-alcalimétrica com a base NaOH 0,1N e indicador fenolftaleína 1%. O resultado foi corrigido para equivalente-grama de ácido cítrico (64,02) e expresso em miliequivalente do ácido orgânico por 100 g (Cecchi, 2003).

O teor de sólidos solúveis foi determinado por refratômetro digital Krüss Optronic®/DR 301-95) após diluição prévia em água destilada na proporção 1:100. Após a leitura do filtrado, foi efetuada a correção pelo fator de multiplicação 100, o resultado foi expresso em °Brix (IAL, 2005).

A classificação granulométrica foi realizada por meio de um tamisador vibratório eletromagnético (BERTEL®, Ltda, Cadeiras, SP, Brasil) o conjunto foi composto por cinco peneiras com aberturas de diferentes diâmetros e o fundo, padrão ABNT, *mesh*, 30, 50, 60, 120 e 300 com respectivas aberturas de malha de 0,5; 0,3; 0,25; 0,125; 0,5 µm. Para cada tratamento 100 g de farinha foram submetidas à tamisação por 15 minutos, e a quantidade de amostra em cada tamiz foi pesada e calculada a frequência retida e a frequência acumulada, expressas em porcentagem (Perry & Chilton, 1973).

A massa específica aparente foi determinada por meio da relação entre a massa e a leitura direta do volume ocupado, utilizando uma proveta, que foi previamente tarada, em seguida foram adicionados farinha até a marca de 10 mL da proveta. A amostra foi embalada e bateu-se suavemente a base da proveta na bancada a altura de 5 cm até não haver mais diminuição do nível da amostra. A massa da amostra e o volume foram registrados massa específica aparente foi calculada utilizando a massa da amostra por unidade de volume ocupado expressa em g/mL (Wani et al., 2015).

Compostos Bioativos

A avaliação da atividade antioxidante foi determinada pela capacidade de sequestrar o radical livre DPPH, segundo metodologia descrita por Rufino et al. (2007).

O índice de polifenóis totais foi determinado pelo método espectrofotométrico desenvolvido por Folin-Ciocalteu (Rossi, 1965). Os resultados obtidos foram calculados com base no ácido gálico como padrão, preparou-se uma curva e os resultados foram calculados e representados graficamente, utilizando o gradiente concentração em função da absorbância. Foram expressos em mg ácido gálico 100g^{-1} de massa seca.

Propriedades Tecnológicas das Farinhas

Os índices de absorção em água, leite, e óleo, e índices de solubilidade em água e em leite, foram avaliados de acordo com Anderson et al. (1969), com adaptações. Foram pesados em tubo de ensaio 1,0 g de amostra, e adicionados 10 mL do solvente. Os tubos foram agitados e centrifugados a 3000 rpm durante 40 minutos. O líquido

sobrenadante foi transferido para cadinhos de alumínio e submetidos a secagem em estufa a 105 °C por três horas. O gel excedente no tubo da centrífuga foi pesado. O índice de absorção foi determinado a partir do resíduo da evaporação e do sobrenadante

Coordenadas Colorimétricas

A cor instrumental foi medida à temperatura ambiente utilizando Colorímetro Hunter Lab, modelo Color Flex EZ. Os resultados foram expressos em coordenadas de cores do espaço CIELAB (L^* a^* b^*). Os valores de L^* (luminosidade ou brilho) variam do preto (0) ao branco (100), os valores do croma a^* variam do verde (-60) ao vermelho (+60) e os valores do croma b^* variam do azul ao amarelo, ou seja, de -60 a +60, respectivamente. Foram avaliados a saturação da cor Chroma (C^*) e o ângulo °Hue (ABNT, 1992). Todas as medidas foram realizadas em triplicata.

Perfil de Minerais

As análises de macro e micronutrientes minerais da farinha sorgo foram realizadas no Laboratório Solotech localizado no município de Rio Verde – Goiás. Para análise de fósforo fez-se a digestão da amostra (FCG) com mistura Nitroperclórica e determinação do elemento por colorimetria com Molibdato de Amônio e Ácido Ascórbico. Na análise de potássio ocorreu a digestão da amostra (FCG) com mistura nitroperclórica e determinação do elemento por Fotometria de Chama. Para determinação de cálcio e magnésio e dos micronutrientes (Cu, Fe, Mn, Zn), fez-se a digestão da amostra com mistura nitroperclórica e determinação dos elementos por absorção atômica (AOAC,1995).

Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise microestrutural foi utilizada para avaliar a morfologia de partículas de farinha, principalmente grânulos de amido, foi realizada no Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução da Universidade Federal de Goiás, através de microscópio eletrônico de varredura eletrônica (JSM-6610/ Jeol®), equipado com EDS, ThermoScientific NSS Spectral Imaging. As amostras foram previamente desengorduradas por extração em Soxhlet, método nº 1.122 (IUPAC, 1979), alocadas em *stubs* de alumínio com fita dupla face, banhadas por um filme ultrafino de ouro (material eletricamente condutivo), permitindo o princípio de funcionamento do MEV, por emissão de feixes de elétrons com voltagem de aceleração de 5 kV por um

filamento de tungstênio. As micrografias foram realizadas com aumentos de 500x e 1000x.

Análise estatística

Os resultados foram analisados utilizando software estatístico SISVAR® versão 6.0. (FERREIRA, 2011). Os resultados foram expressos como média \pm desvios-padrão em tabelas e gráficos. As análises foram realizadas em triplicata e os valores médios dos resultados dos 4 tratamentos de farinha do sorgo foram avaliados por análise de variância (ANOVA) seguida do teste de médias de Tukey a 5% de significância. Para o fator tempo durante o armazenamento, foi feita análise de regressão.

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 consta a composição proximal das farinhas de sorgo. Observa-se que a secagem a 80 °C propiciou obtenção de farinha com menor valor de teor de água (10,11 g 100g⁻¹), diferindo ($p < 0,05$) da secagem a 40 °C (11,23 g 100g⁻¹), entretanto, todas as farinhas apresentaram valores inferiores ao limite máximo de 15 g 100g⁻¹ permitido para farinhas, pela RDC n°263/2005/ANVISA (BRASIL, 2005).

Tabela 1. Valores médios e desvio padrão do teor de água, cinzas, proteínas, lipídeos e carboidratos (g 100g⁻¹) da farinha de sorgo submetida a secagem nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C

Parâmetros	Farinha de sorgo (FS)				CV (%)
	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C	
Teor de água	11,24 \pm 0,26a	10,34 \pm 0,38ab	10,22 \pm 0,48b	10,40 \pm 0,13ab	3,27
Cinzas	1,89 \pm 0,10b	1,62 \pm 0,18b	1,45 \pm 0,05b	2,19 \pm 0,48a	6,92
Proteínas	12,27 \pm 1,59a	11,04 \pm 1,18b	10,73 \pm 0,47b	10,82 \pm 0,53b	9,41
Lipídeos	4,68 \pm 0,01a	4,69 \pm 0,01a	4,70 \pm 0,01a	4,73 \pm 0,01a	0,21
Carboidratos	69,92 \pm 1,60a	72,31 \pm 1,37a	72,90 \pm 0,92a	71,52 \pm 0,47a	1,64

Médias seguidas de mesma letra na mesma linha não diferem entre si, conforme teste de médias Tukey, a 5% de significância. CV: coeficiente de variação.

Prado et al. (2019) avaliaram farinhas integrais de duas cultivares de sorgo, BR 501 e BR 305, relataram valores de teor de água próximos ao presente estudo de 10,40 g 100g⁻¹ e 11,00 g 100g⁻¹.

Valores semelhantes de carboidratos, proteínas e cinzas foram descrito no estudo de Queiroz et al. (2015) os quais avaliaram a composição nutricional de 100 genótipos de sorgo, encontraram variações de 55,2 e 75,2 g.100g⁻¹ de carboidratos, 8,6 a 18,9 g 100g⁻¹ de proteína, 1,7 a 4,9 g 100g⁻¹ de lipídeos e 1,1 - 2,4g 100g⁻¹ de cinzas.

O teor de cinzas (Tabela 1) da FS seca a 40 °C diferiu (p>0,05) entre os tratamentos de 60, 80 e 100 °C. Os teores de cinzas das farinhas de sorgo variam entre 1,45 – 2,19 g 100g⁻¹. Valores semelhantes foram encontrados por Souza et al. (2005) em farinhas de sorgo Sacarino, identificaram teores de cinzas de 1,98 g 100g⁻¹, 1,87 g 100g⁻¹, 1,80 g 100g⁻¹.

O método de avaliação de cinzas por combustão dos compostos orgânicos fornece uma estimativa da quantidade total de minerais nos alimentos, estes podem estar presentes em forma de óxidos metálicos, sulfatos, fosfatos, nitratos dentre outros halogenatos, superestimando o conteúdo mineral total, uma vez que o oxigênio está presente em muitos dos ânions (Damodaran et al., 2010).

Quanto aos teores de proteína (Tabela 1) observa-se que a secagem nas temperaturas 60, 80 e 100 °C não ocasionou diferenças (p>0,05) em relação a perda de proteínas, entretanto esses valores foram significativamente menores que o teor de proteína (12,27 g 100g⁻¹) da farinha seca a 40 °C.

Damodaran et al. (2010), relatam que a maioria das proteínas dos alimentos sofrem desnaturação quando submetidas a tratamentos térmicos moderados variando de 60 a 90 °C por tempo igual ou inferior a 1 hora.

Morais et al. (2015) encontraram teor de proteína de 11,67 g 100g⁻¹ em farinha de sorgo integral de genótipo SC 21. Srichuwong et al. (2017) avaliaram farinhas produzidas a partir de grãos de variedades branca e vermelha de sorgo (*Sorghum bicolor*), obtiveram valores de proteína de 11,4 g 100g⁻¹ e 9,8 g 100g⁻¹.

Os tratamentos de secagem a 40, 60, 80 e 100 °C não influenciou de modo significativo os teores de carboidratos e lipídeos das amostras de farinha de sorgo (Tabela 1).

No estudo de Meera et al. (2011) os teores de lipídeos em farinhas de sorgo das variedades CSH9-13, CSH-5 e M35-1 e uma local variaram entre 2,2 – 3,6 g 100g⁻¹.

Os resultados de teor de lipídeos corroboram os achados de Mohapatra et al. (2019) encontraram teor de 4,70 g 100g⁻¹ em farinha de sorgo crua produzidas de grão de sorgo (c.v. Dadar).

Tabela 2. Valores médios e desvio padrão de pH, acidez (g ácido cítrico 100g⁻¹), massa específica ME (g mL⁻¹) e sólidos solúveis (S.S) da farinha de sorgo submetida a secagem nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C

Farinha de sorgo (FS)					
Parâmetros	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C	CV(%)
pH	7,16±0,05 ^a	7,11±0,02 ^a	6,83±0,01 ^b	6,82±0,01 ^b	0,21
Acidez	1,00±0,01 ^c	1,14±0,05 ^b	1,16±0,05 ^{ab}	1,26±0,05 ^a	4,38
ME	0,64±0,01 ^d	0,76±0,01 ^b	0,84±0,01 ^a	0,69±0,01 ^c	1,57
S S	0,40±0,01 ^c	0,43±0,01 ^b	0,30±0,02 ^{ab}	0,50±0,01 ^a	7,07

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si, ao nível de 5% de significância, conforme teste de médias Tukey. Coeficiente de variação (CV).

As farinhas provenientes de grãos secos a 80 e 100 °C, apresentaram valores de pH menores ($p < 0,05$), comparativamente com os tratamentos de 40 e 60 °C. As farinhas de sorgo (Tabela 2) secos a 40 e 60 °C apresentaram pH neutro (pH igual a 7), a elevação da temperatura a 80 e 100 °C propiciou a redução do pH apresentando-se ligeiramente ácidos ($pH < 7$) (Kotz et al., 2012). Valores semelhantes de pH foram observados nos estudos de Marston et al. (2015) ao analisar farinha de sorgo integral comercial encontraram valor de pH de 6,14. Souza et al. (2005) identificaram valores de pH de 6,28; 6,42 e 6,30 em farinhas de três tipos de sorgo da variedade IPA - 467.

Os valores de acidez exibiram comportamento inverso ao pH, as amostras secas a 60, 80 e 100 °C (Tabela 2) foram maiores ($p < 0,05$) que as amostras secas a 40 °C. Ferreira et al. (2009) constataram valor de acidez de 1,45 g de ácido equivalente/100g, semelhante aos valores deste estudo. Souza et al. (2005) identificaram valores superiores variando entre 2,79- 3,24 mL de NaOH.

A legislação brasileira não estabelece parâmetros de acidez específico para farinha de sorgo, entretanto, estabelece um limite máximo de 3% de acidez para a farinha de trigo comum (ANVISA, 1978). Os valores de acidez das amostras variaram entre 1,00 – 1,26 % valores toleráveis para a farinha de trigo comum.

Os resultados indicam que a secagem provocou alterações estruturais e físicas uma vez que a massa específica aparente das amostras de farinha aumentou

significativamente ($p \leq 0,05$) (Tabela 2) de acordo com a elevação da temperatura de secagem. O processo de secagem pode ocasionar a redução do volume celular pois o transporte de solutos nas células vegetais ocorre por meio de interconexões por plasmodesmas (Oliveira et al., 2011). Quando ocorre a redução da porosidade o produto apresenta-se mais compacto e rígido consequentemente resultando em maiores valores de massa específica aparente (Caparino et al., 2012).

Elmoneim et al. (2010), encontraram valor de massa específica aparente de $0,73 \text{ g mL}^{-1}$ em farinha de sorgo produzidas a partir de grãos com baixo teor de tanino.

Os teores de sólidos solúveis das amostras secas a 60, 80 e 100 °C foi significativamente maior ($p < 0,05$) que o tratamento de 40 °C.

Tabela 3. Valores médios e desvio padrão dos parâmetros de cor L*, a*, b*, C* e °h da farinha de sorgo submetida a secagem nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C

Farinha de sorgo					
Parâmetros	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C	CV(%)
L*	70,52±0,27c	69,87±0,23d	71,79±0,15a	71,22±0,13b	0,29
a*	7,44±0,06a	7,05±0,11b	6,79±0,17b	6,95±0,05b	1,81
b*	12,84±0,07a	12,44±0,12b	12,20±0,16b	12,29±0,04b	0,90
C*	14,84±0,09a	14,30±0,16b	13,96±0,22b	14,12±0,06b	1,07
°h	59,89±0,08b	60,44±0,16a	60,88±0,30a	60,50±0,08a	0,30

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si, ao nível de 5% de significância, conforme teste de médias Tukey. Coeficiente de variação (CV). L* (luminosidade), a* (vermelho a verde), b* (azula amarelo) C* (Chroma) e °h (ângulo Hue).

Os valores médios dos parâmetros de cor estão apresentados na Tabela 3, verifica-se que a secagem influenciou significativamente a luminosidade (L*) das farinhas, o aumento dos valores de L* nos tratamentos de 80 e 100 °C indicam amostras mais claras, entretanto a secagem a 60°C provou o escurecimento da farinha de sorgo. O aumento no parâmetro L* está associado ao aumento da área de superfície que reflete mais luz (Savlak et al., 2016).

Observa-se na Tabela 3 que as amostras secas a 60, 80 e 100 °C não diferiram entre si para os parâmetros a*, b* e C* entretanto, estes reduziram ($p \leq 0,05$) em relação ao tratamento de 40 °C. A redução dos valores a*, b* e C* indicam redução da intensidade dos tons vermelhos e amarelo, e menor grau de intensidade de saturação da

cor. O aumento significativo ($p \leq 0,05$) do °Hue, nos tratamentos de 60, 80 e 100 °C comparativamente com 40 °C indica tonalidade mais elevada.

O valor do Croma aumenta com o incremento da concentração de pigmento, e diminui de acordo com o escurecimento das amostras, portanto os resultados indicam (Tabela 3) a perda de pigmentos, devido redução da intensidade de saturação da cor (C^*). O processo de secagem pode ocasionar degradação de cor em função de alterações em componentes sensíveis ao calor (Dong et al., 2017; Savlak et al., 2016).

Tabela 4. Valores médios da capacidade antioxidante equivalente de trolox determinada por dois métodos, utilizando os radicais DPPH e ABTS ($\mu\text{mol trolox g}^{-1}$) e teor de fenólicos totais ($\text{mg GAE}^a \text{ 100 g}^{-1}$) da farinha de sorgo submetida a secagem nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C

Farinha de sorgo					
Parâmetros	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C	CV(%)
DPPH	183,73±2,30a	152,66±0,46b	156,40±0,56b	179,73±2,30a	1,15
ABTS	261,33±7,50a	208,52±2,82b	169,22±5,09c	248,11±5,06a	2,38
Fenólicos	33,04±0,60c	31,09±1,56c	41,95±1,30b	51,09±0,52a	2,79

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si, ao nível de 5% de significância, conforme teste de médias Tukey. Coeficiente de variação (CV). ^aÁcido Gálico equivalente.

A atividade antioxidante reduziu significativamente nos tratamentos de 60 e 80 °C em comparação com a temperatura de 40°C, entretanto a temperatura de 100 °C não apresentou diferenças significativas.

Cardoso et al. (2015) observaram comportamento semelhante em três genótipos de sorgo, constataram o aumento da capacidade antioxidante após tratamento de secagem em estufa convencional a 121 °C. As 3- deoxiantocianidinas (3-DXAs) são importantes antioxidantes presentes no sorgo, a estabilidade térmica elevada desses compostos podem ter contribuído para este resultado.

Valores próximos foram encontrados por Morais et al. (2015) no estudo com farinha de sorgo integral de genótipo SC 21, as quais apresentaram atividade antioxidante entre 355,40 - 180,70 $\mu\text{mol trolox g}^{-1}$.

O teor de fenólicos totais das amostras de farinha de sorgo foi significativamente maior nas temperaturas de 80 e 100 °C. Oliveira et al. (2017) avaliaram os fenóis totais

em farinhas de sorgo dos genótipos SC319 E TX430, encontraram respectivos valores de 11,13 e 11,73 mg GAE. As farinhas de sorgo do genótipo Dekalb 540 do presente estudo apresentaram teores variando entre 31,09 – 51,09 mg GAE.

Mohapatra et al. (2019) avaliaram farinha de sorgo bruta, farinha de sorgo cozida, farinha de sorgo fermentado, farinha de sorgo fermentada e vaporizada, farinha de sorgo fermentado, cozido no vapor e em flocos, relataram teores de fenólicos totais variando de 5,53 – 8,61 mg GAE g⁻¹.

Segundo Awika & Rooney (2004) a composição e conteúdo fenólico do sorgo é variável e fatores como genética e meio ambiente afetando o tipo e o nível dos compostos fenólicos.

Tabela 5. Valores médios e desvio padrão referente ao índice de absorção em água (I.A.A.), índice de absorção em leite (I.A.L.), índice de absorção em óleo (I.A.O.), índice de solubilidade em água (I.S.A) expressos em (g/g) e índice de solubilidade em leite (I.S.L) expressos em (g 100g⁻¹) da farinha de sorgo submetida a secagem nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C

Farinha de sorgo					
Parâmetros	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C	CV(%)
I.A.A	2,59±0,06c	2,82±0,10a	2,75±0,06ab	2,73±0,14ab	3,24
I.A.L	2,76±0,14a	2,82±0,13a	2,83±0,11a	2,85±0,12a	3,89
I.A.O	1,73±0,07a	1,70±0,11a	1,66±0,01a	1,72±0,02a	3,95
I.S.A	80,04±0,30a	77,26±0,56a	75,95±1,30b	74,09±0,52b	3,99
I.S.L	87,65±2,56a	72,53±1,10ab	70,80±1,33b	69,51±1,04b	8,24

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si, ao nível de 5% de significância, conforme teste de médias Tukey. Coeficiente de variação (CV).

Os resultados do índice de absorção em água aumentaram com a elevação da temperatura de secagem, apresentando maior valor no tratamento de 60 °C (Tabela 4). A secagem possivelmente não alterou de forma negativa a capacidade das fibras de reter água e pode ter ocasionado aumento na capacidade dos grânulos de amido absorver água.

O índice de absorção em água relaciona-se com a conformação molecular, tamanho das partículas e números de sítios de ligação das moléculas. Entretanto os tamanhos das partículas das farinhas foram uniformizados, possivelmente o teor de

fibras da farinha pode ter contribuído para a maior capacidade de hidratação. A principal característica físico-química das fibras é a propriedade de hidratação, pela presença de componentes insolúveis, como celulose, hemicelulose e lignina, que são materiais hidrofílicos (Barbosa et al., 2011).

No estudo de Marston et al. (2016) o tratamento térmico aliado ao tempo de exposição, ocasionou o aumento da viscosidade da massa de pães, possivelmente devido as propriedades de inchamento dos grânulos de amido e gelatinização.

O valor médio de 2,72 g/g referente ao índice de absorção em água das farinhas de sorgo submetidas a diferentes temperaturas de secagem, encontra-se próximo aos valores do estudo de Palavecino et al. (2019), os quais avaliaram o índice de absorção em água em amostras de farinha de sorgo branco (Pannar-8706 W) tratadas com moinho planetário, obtiveram valor médio de 2,40 g/g. Elmoneim et al. (2010), encontraram valores superiores de capacidade de ligação em água 4,69 g/g e capacidade de ligação em óleo de 3,43 g/g em farinha de sorgo.

Os índices de absorção nos solventes leite e óleo não diferiram entre os tratamentos. Segundo Oliveira et al. (2019), o sorgo também apresenta características tecnológicas desejáveis para produtos de carne processada, tais como boa capacidade de retenção de água e gordura e presença de antioxidante natural (Oliveira et al., 2019)

Os índices de solubilidade em água e em leite das farinhas de sorgo reduziram significativamente nas temperaturas de secagem de 80 e 100 °C. A secagem pode ter provocado a desnaturação das proteínas, uma vez que o calor é um agente desnaturante (Damodaran et al., 2010). A desnaturação das proteínas pode induz a redução da solubilidade devido a alterações no balanço entre hidrofobicidade e hidrofiliidade (Khattab & Arntfield, 2009).

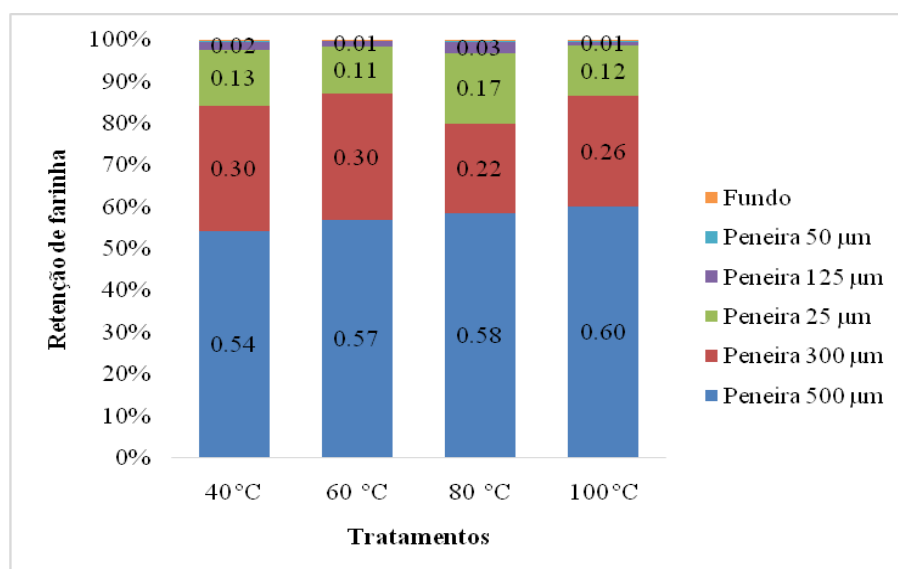


Figura 1. Histograma da frequência retida das farinhas de Sorgo submetidas à secagem nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C.

Observa-se no histograma da Figura 1 que as quatro farinhas de sorgo apresentaram comportamento semelhantes de retenção, os resultados da granulometria demonstraram que maiores percentuais de partículas ficaram retidas na peneira de 500 µm, verifica-se que a retenção neste diâmetro aumenta de acordo com a elevação da temperatura de secagem.

Os tamanhos médios das partículas das farinhas de sorgo apresentaram-se superiores aos de granulometria de farinha de trigo estabelecidos pela RDC nº 263/2005/ANVISA, que determina que 95% deve passar pela peneira de malha de 250 µm (BRASIL, 2005).

As farinhas de sorgo apresentaram uma distribuição de tamanho de partícula similar ao do estudo de Morais et al. (2015) no qual a maioria da farinha de sorgo integral (90,36%) apresentaram granulometria entre 0,5 e 0,25 mm, as farinhas de sorgo integral foram obtidas pela moagem em moinho de impacto e padronizadas por uma peneira de 0,850 mm.

Segundo Morais et al. (2015) o tamanho da partícula pode influenciar taxa de digestão, uma vez que quanto menor o tamanho da partícula, maior é a taxa de digestão de nutrientes devido a um aumento na superfície relativa para reação de enzimas.

Os resultados da granulometria das amostras demonstraram que as farinhas de sorgo são constituídas de partículas finas, visto que a média do diâmetro das partículas são menores que 0,6 mm (Zanotto & Bellaver, 1996).

Os teores de fósforo, cálcio, magnésio, ferro (Tabela 6) não diferiram ($p < 0,05$) em função dos tratamentos de secagem.

Quanto ao teor de manganês e zinco (Tabela 5) o maior valor foi encontrado na farinha seca a 40 °C, os valores de manganês diferiram entre os tratamentos. Os teores de zinco diferiram com a elevação da temperatura (80 e 100 °C). O maior valor de cobre foi encontrado no tratamento de 60 °C apresentando diferenças significativas em relação aos tratamentos de 80 e 100 °C.

Tabela 6. Valores médios referentes aos teores de minerais em base seca de fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu) expresso em ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$) da farinha de sorgo submetida a secagem nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C

Parâmetros	Farinha de sorgo				CV (%)
	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C	
P	0,28±0,01a	0,26±0,01a	0,29±0,02a	0,28±0,05a	3,12
Ca	0,22±0,20a	0,24±0,12a	0,28±0,10a	0,29±0,05a	11,20
Mg	0,37±0,06a	0,35±0,16a	0,39±0,30a	0,41±0,02a	14,30
Fe	3,90±1,27a	4,06±1,30a	4,02±0,03a	4,04±1,15a	10,60
Mn	0,42±1,60a	0,35±1,60b	0,33±0,01b	0,35±1,75b	7,03
Zn	2,30±0,03a	2,26±0,06a	2,10±0,40b	2,06±0,20b	8,10
Cu	0,39±0,07ab	0,42±0,09a	0,35±0,10b	0,33±0,05b	14,10

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si, ao nível de 5% de significância, conforme teste de médias Tukey. Coeficiente de variação (CV).

Ndimba et al. (2015) encontraram valores superiores a este estudo, relataram teores de zinco de $4,26 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$, ferro $5,19 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$, fósforo $442,6 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$, magnésio $189,9 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$ em farinhas de sorgo da cultivar P898012.

Badigannavar et al. (2016) avaliaram os teores de minerais de 112 genótipos de sorgo encontraram valores superiores ao presente estudo para Ca ($1,6 - 2,76 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$), Mg ($96 - 365 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$), Mn ($0,68 - 0,84 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$), e valores semelhantes de Fe ($3,12 - 4,38 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$), Zn ($1,92 - 2,21 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$), e Cu ($0,35 - 0,98 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$).

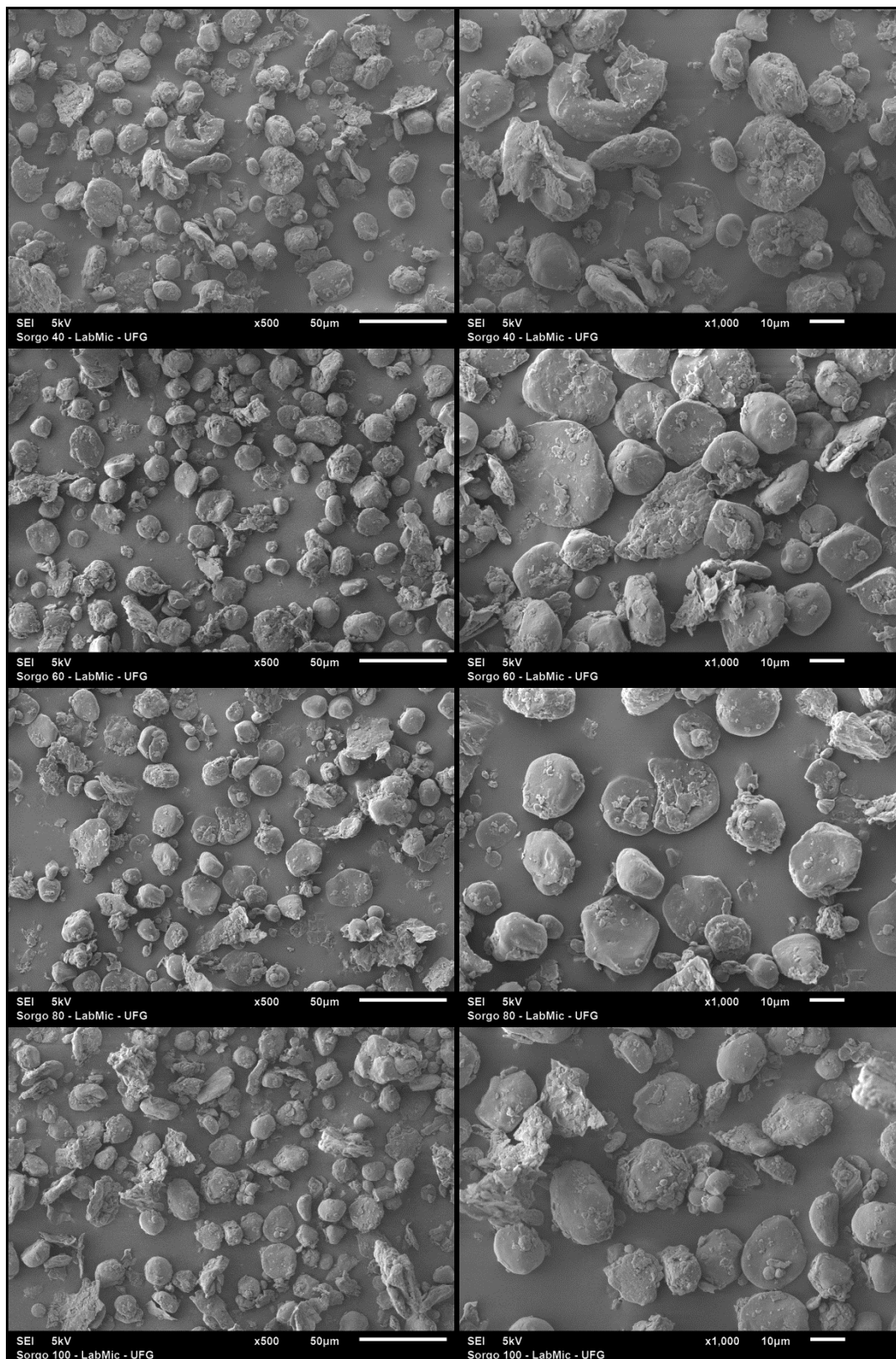


Figura 2. Microestrutura eletrônica de varredura das farinhas sorgo submetida a diferentes temperaturas de secagem (40, 60, 80 e 100 °C). Imagens correspondem a aumentos de 500X e 1000X.

Pode ser observado na Figura 2 que as farinhas de sorgo apresentam grânulos de amido de formatos poligonais, ovais e esféricas com presença de corpos proteicos localizados entre os grânulos. Os formatos observados encontram-se de acordo com os descritos por Damodaran et al. (2010). Ai et al. (2011) e Meera et al. (2011) encontraram grânulos de amido com formato esféricos em farinhas de sorgo.

As imagens demonstram que no tratamento de 40 °C os formatos dos grânulos de amido estão mais definidos, porém de acordo com elevação da temperatura de secagem (60, 80 e 100 °C) os grânulos de amido foram perdendo a forma inicial apresentaram-se achatados e sem forma definida, com menor quantidade de proteínas caracterizando superfície mais lisa. De acordo com Thomas & Atwell (1999) grânulos maiores, achatados, sem formato definido e com superfície enrugada são características de amido gelatinizado.

Os aspectos quebrados e pequenos poros na superfície dos grânulos indicam a liberação da amilose em razão do tratamento térmico (Damodaran et al., 2010; Yadav et al., 2006).

O processamento térmico pode ocasionar a desnaturação e gelatinização parcial dos grânulos de amido (Marston et al., 2016).

Teixeira et al. (2016) avaliaram o efeito do processamento no teor de amido resistente de dois genótipos de sorgo (SC 59 e BR 305) observaram que o tratamento térmico influenciou o conteúdo de amido resistente em grãos e farinhas para ambos os genótipos, o calor úmido causou uma redução drástica nos níveis desse componente. O calor seco (secos em estufa por 2 dias a 65 °C) ocasionou uma redução de até 15%, portanto foi uma alternativa melhor para o processamento de grãos de sorgo para manter os altos teores de amido resistente.

Estabilidade da farinha de sorgo durante o armazenamento

Após a caracterização das farinhas de sorgo secas em diferentes temperaturas 40, 60, 80, e 100 °C verificou-se de maneira geral por meio dos dados obtidos, que a farinha cuja temperatura de secagem 40 e 60 °C mantiveram melhor as propriedades analisadas, em relação as temperaturas mais altas. Neste sentido, escolheu-se a farinha de sorgo a temperatura de 60 °C para realizar o armazenamento e verificar a estabilidade da mesma por doze meses.

Verificou-se que para as variáveis teor de água, proteína e sólidos solúveis não tiveram efeito do tempo de armazenamento com valores médios de 10,39; 10,55 e 0,44

(g 100g⁻¹) respectivamente. Segundo Smaniotto et al. (2014), a variação do teor de água pode ser relacionada com a permeabilidade da embalagem utilizada no armazenamento pois são materiais higroscópicos e estão sujeitos aos processos de sorção, tendendo o teor de água sempre a se equilibrar com a temperatura e a umidade relativa do ambiente de armazenamento.

A partir dos resultados experimentais de acidez total titulável ajustados por equação linear (Figura 3A), o índice de acidez da farinha de sorgo aumentou com o tempo de armazenamento. No tempo zero o índice de acidez da farinha foi de 1,15 a 1,41 (g ác.cítrico 100g⁻¹), que corresponde a um aumento de 22,6 % (0,26 g ác.cítrico 100g⁻¹).

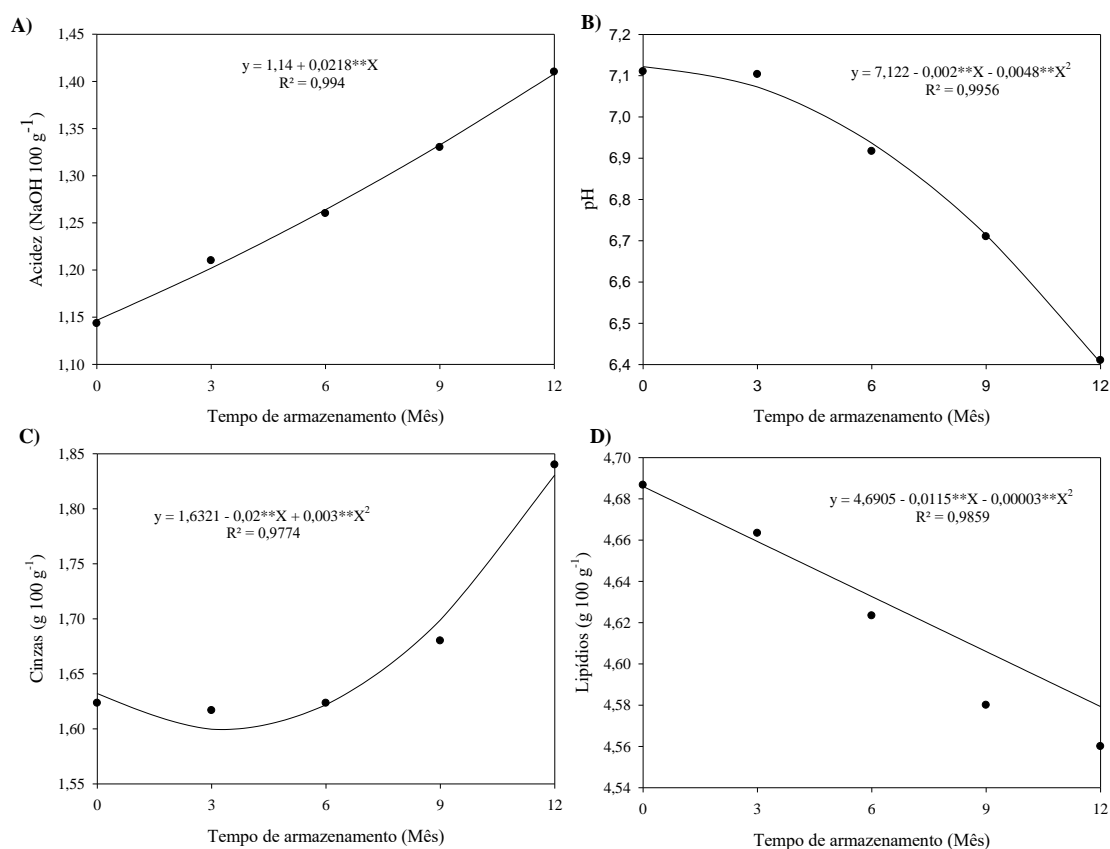
Segundo Ferreira et al. (2013), o aumento da acidez titulável pode estar associada às transformações dos ácidos orgânicos, entre o dióxido de carbono e a água, durante o armazenamento. Estes resultados de acidez estão de acordo com os valores de pH (Figura 3B) os quais apresentaram um decréscimo, para o mesmo período. Os valores de pH variaram de 7,12 a 6,40 que corresponde ao decréscimo de 11%.

Em relação aos teores de cinzas observa-se que entre o intervalo das épocas seis e nove houve um aumento de cinzas de 1,62 a 1,70 (g 100g⁻¹), sendo mais claro este fato nas farinhas armazenadas aos doze meses de 1,83 (g 100g⁻¹). O aumento no teor de minerais durante o armazenamento implica em degradação da fração orgânica, pois a atividade metabólica dos grãos e dos microrganismos associados consome materiais orgânicos durante o armazenamento (Bhattacharya & Raha, 2002; Fleurat-Lessard, 2002), produzindo gás carbônico, água e calor, podendo alterar a proporção de minerais presentes nos grãos, assumindo valores proporcionalmente maiores a medida que a matéria orgânica é consumida. Os teores de cinzas após o tempo de armazenamento mantiveram-se dentro dos padrões que a legislação brasileira estabelece o limite de 6,0% para o teor de cinzas totais para farinhas vegetais (BRASIL, 2005).

Ocorreu uma variação nos teores de lipídeos 4,69 a 4,58 (g 100g⁻¹) durante o processamento dos grãos de sorgo por meio de secagem e moagem induz alterações químicas e enzimáticas podem ter contribuído para redução dos lipídeos, formando compostos de baixo peso molecular como peróxidos (Damodaran et al., 2010).

Meera et al. (2011) relataram em estudo com farinhas de sorgo que o tratamento térmico por 15 min em autoclave a 97 °C à pressão atmosférica reduziu significativamente a atividade da enzima lipase, estendendo a vida útil de

armazenamento de 15 dias para quase oito meses, independentemente das variações morfológicas.



** e * significativo respectivamente a 1% e 5% de significância segundo teste F.

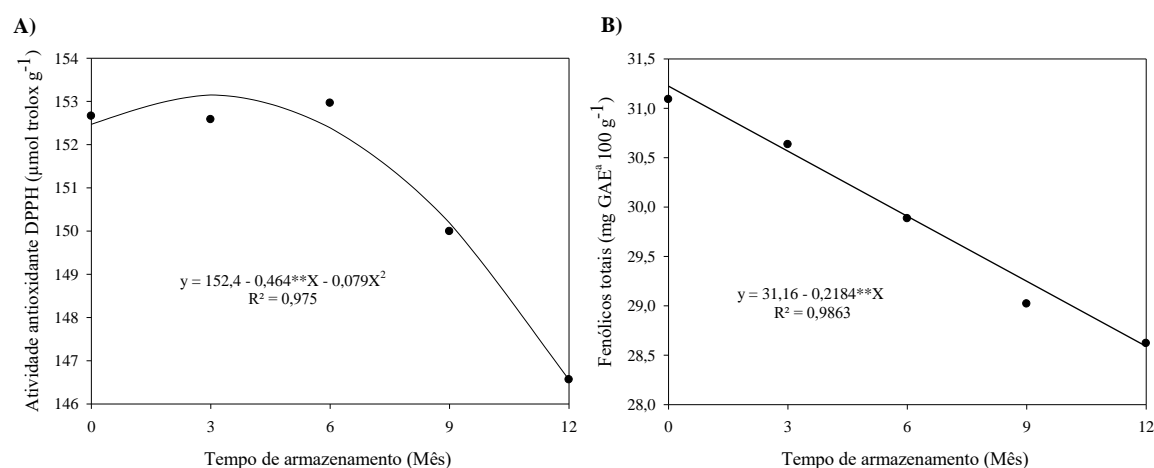
Figura 3. Médias de acidez (A), pH (B), cinzas (C) e lipídeos (D) em função do tempo de armazenamento.

A farinha de sorgo seca a 60 °C apresentou redução dos compostos fenólicos totais e antioxidantes ao longo do armazenamento, os resultados demonstraram que houve diferenças quanto ao tempo de armazenamento para os mesmos períodos ($p < 0,05$). A perda de compostos bioativos pode ser resultado das reações de oxidação e polimerização do polifenol, que diminuem o número de grupos hidroxila livres quantificados pelo ensaio de Folin-Ciocalteu (klopotek et al., 2005).

Oliveira et al. (2017) avaliaram os fenóis totais em farinha e farelo de sorgo dos genótipos SC319 e TX430, neste estudo observaram redução nos teores de compostos fenólicos de ambos os genótipos nos primeiros 60 dias de armazenamento a três temperaturas (4, 25 e 40 °C). Assim como redução em todos os conteúdos de 3-desoxi-

isocianinas em grãos e farinha de sorgo de T0 a T60, as 3-DXAs são antocianinas do sorgo e influenciam na capacidade antioxidante.

A atividade antioxidante das farinhas de sorgo mesmo no final do armazenamento mostraram valores superiores aos encontrados no estudo de Cardoso et al. (2014), no qual encontraram 21,79 $\mu\text{mol TE/g}$ em farinhas produzidas de Sorgo com pericarpo vermelho sem tanino (genótipo BRS 310) submetidos a tratamento térmico em forno convencional (121 ° C, 25 min).



** e * significativo respectivamente a 1% e 5% de probabilidade segundo teste F.

Figura 4. Atividade antioxidante DPPH (A), fenólicos totais (B) em função do tempo de armazenamento.

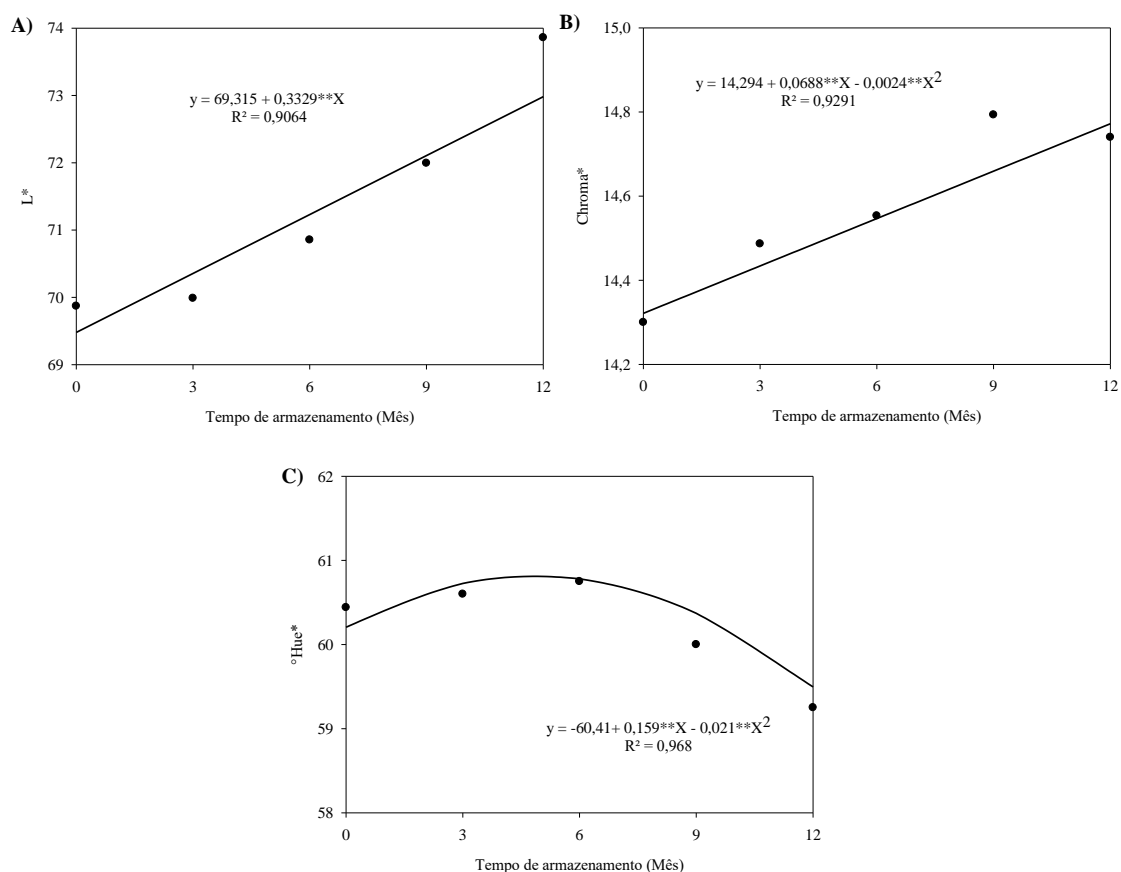
O armazenamento propiciou incremento nos valores de L^* , Chroma^* e redução da intensidade da cor (Hue^*).

Segundo Damodaran et al. (2010) os compostos fenólicos e flavonoides são responsáveis pela ocorrência de coloração laranja, vermelho e azul em alimentos, na Figura 2 observa-se que ocorreu a redução do conteúdo de fenólicos totais, tal comportamento pode ter influenciado na coloração da farinha.

Os compostos fenólicos do sorgo estão presentes em grande parte no pericarpo, grãos coloridos podem conter maiores teores (Bernardo et al., 2019). O aumento do valor do L^* indica o aumento na brancura de farinha possivelmente devido ao decréscimo dos teores de fenólicos que confere a cor do sorgo vermelho, tornando mais evidente a cor do endosperma (creme), uma vez que a farinha é uma mistura do pericarpo e endosperma.

Oliveira et al. (2017) obtiveram resultados semelhantes, neste trabalho observaram que as farinhas de sorgo (genótipo SC 319) após 120 dias de armazenamento apresentaram aumento no valor de L*, entretanto clareamento observado provavelmente não afeta a qualidade dos produtos finais, pois os genótipos estudados (SC319 - marrom e TX430 - preto) são naturalmente escuros.

Em relação ao calor do Chroma* foi observado que a secagem propiciou a diminuição do mesmo indicando perdas de pigmentos, entretanto o armazenamento induziu o aumento do valor do Chroma* o qual está relacionado com o aumento da concentração de pigmento (Dong et al., 2017; Savlak et al., 2016). Concordando com o aumento do °Hue indicando tonalidade mais elevada.



* e * significativo respectivamente a 1% e 5% de probabilidade segundo teste F.

Figura 5. Médias de cinzas (A) L*, (B) Chroma* (C) Hue*, em função do tempo de armazenamento.

A alteração na cor das farinhas pode ter ocorrido devido a reação de Maillard que envolve a interação entre aminoácidos e açúcares e produzem polímeros de cor marrom, denominados melanoidinas. A temperatura afeta o mecanismo e velocidade da reação, bem como o atinge seu máximo em pH próximos a neutralidade (6-7), em

baixos teores de água a reação é mais lenta. Esta reação continua em temperaturas na ordem de 20 °C ao longo do processamento e armazenamento (Damodaran et al., 2010; Ribeiro & Seravalli, 2007).

6.4 CONCLUSÃO

A secagem dos grãos de sorgo para produção de farinhas propiciou a redução do teor de água inicial, proteína, pH, e índices de solubilidade em água e leite e atividade antioxidante, exceto para a temperatura de 100 °C. Provocou a elevação dos valores de fenólicos totais, acidez e índice de absorção em água; promoveu a redução da intensidade dos tons vermelhos e amarelo aumento da tonalidade e escurecimento das amostras.

A secagem a 60 °C influenciou de modo relevante os teores de proteínas, integridade dos grânulos evidenciada pela MEV e propriedades funcionais das farinhas, sendo uma alternativa para o processamento dos grãos de sorgo para enriquecer alimentos.

A secagem não alterou o conteúdo de lipídeos, carboidratos, índice de absorção em leite e óleo, teores de fósforo, cálcio, magnésio e ferro, assim como apresentaram expressivos teores de ferro, zinco e cobre.

As farinhas de sorgo são compostas por partículas finas identificadas na distribuição granulométrica. A elevação da temperatura de secagem propiciou aumento no diâmetro das partículas, maior percentual foi retido na peneira de 500 µm, a secagem originou aumento no volume das partículas e maiores valores de massa específica aparente.

O armazenamento da farinha de sorgo promoveu alterações nas características avaliadas, exceto para teor de água, sólidos solúveis e proteína.

6.5 REFERÊNCIAS

Agência Nacional da Vigilância Sanitária - ANVISA. Farinhas. Resolução CNNPA n. 12. Diário Oficial da União, 1978. Disponível em: http://www.anvisa.gov.br/anvisa/legis/resol/12_78_farinhas.htm. Acesso em: 20/12/2015.

- Ai, Y.; Medic, J.; Jiang, H.; Wang, D.; Jane, J. Starch characterization and ethanol production of sorghum. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 59, p. 7385-7392, 2011.
- Anunciação, P. C.; Cardoso, L. De. M.; Gomes, J. V. P. Lucia, C. M. D.; Carvalho, C. W. P.; Galdeano, M. C. Queiroz, V. A. V; Alfenas, R. de. C. G.; Martino, H. S. D.; Pinheiro sant'ana, H. M. Comparing sorghum and wheat whole grain breakfast cereals: Sensorial acceptance and bioactive compound content. *Food Chemistry*, v. 221, p. 984–989, 2017.
- Anyango, J.O.; Taylor, J. Rn. *Flour and Breads and their Fortification in Health and Disease Prevention*. 2 ed. p. 137-151. Academic Press: 2019. P. 501.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas - ABNT. Especificações de cores de acordo com o sistema de notação Munsell - NBR 12694. Rio de Janeiro, 1992.
- Awika, J. M.; Rooney, L. W. Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. *Phytochemistry*, v. 65, p. 1199-1221, 2004.
- Barbosa, R. J.; Beltrame, S. C.; Bragatto, M. M.; Débia, P. J. G.; Bolanho, B. C.; Danesi, E. D. G. Avaliação da composição e dos parâmetros tecnológicos de farinhas produzidas a partir de subprodutos agroindustriais. *Revista Tecnológica, Edição Especial V Simpósio de Engenharia, Ciência e Tecnologia de Alimentos*, p. 21-28, 2011.
- Bernardo, C. O.; Ascheri, J. R. A.; Carvalho, C. W. P.; Chávez, D. W. H.; Martins, I. B. A.; Deliza, R.; Freitas, D.de. G. C, Queiroz, V. A. V. Impact of extruded sorghum genotypes on the rehydration and sensory properties of soluble beverages and the Brazilian consumers' perception of sorghum and cereal beverage using word association. *Journal of Cereal Science*, v. 89, p. 102-793, 2019.
- Bromilow, S.; Gethings, L. A.; Buckley, M.; Bromley, M.; Shewry, P. R.; Langridge, J. I.; Mills, E. N. C. A curated gluten protein sequence database to support development of proteomics methods for determination of gluten in gluten-free foods. *Journal of Proteomics*, v. 163, p. 67–75, 2017.
- Bucsella, B.; Ágnes Takács, Á.; Vizer, V.; Schwendener, U.; Tömösközi, S. Comparison of the effects of different heat treatment processes on rheological properties of cake and bread wheat flours. *Food Chemistry*, v. 190, p. 990–996, 2016.
- Buthelezia, N. M. D. B.; Magwazaa, L. S.; Tesfaya, S. Z. Postharvest pre-storage processing improves antioxidants, nutritional and sensory quality of macadamia nuts. *Scientia Horticulturae*, v. 251, p.197–208, 2019.

- Caparino, O. A.; Tang, J.; Nindo, C.I.; Sablani, S. S.; Powers, J.R.; Fellman, J. K. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. *Journal of Food Engineering*, v.111, p. 135-148, 2012.
- Cardoso, L. de. M.; Montini, T. A.; Pinheiro, S. S.; Pinheiro-Sant'Ana, H. M.; Martino, H. S. D.; Moreira, A. V. B. Effects of processing with dry heat and wet heat on the antioxidant profile of sorghum. *Food Chemistry*, V. 152, N. 1, p. 210–217, 2014.
- Cardoso, L. De. M.; Pinheiro, S. S.; Carvalho, C. W. P. de.; Queiroz, V. A. V.; Menezes, C. B. de.; Moreira, A. V. B. Barros, F. A. R. de.; Awika, J. M.; Martino, H. S. D.; Pinheiro-Sant'ana, H. M. Phenolic compounds profile in sorghum processed by extrusion cooking and dry heat in a conventional oven. *Journal of Cereal Science*, v. 65, p. 220 – 226, 2015.
- Chávez, D.; Ascheri, J.; Martins, A.; Carvalho, C.; Bernardo, C.; Teles, A. Sorghum, an alternative cereal for gluten-free product *Revista Chilena de Nutricion*. v.45, p. 169–177, 2018.
- Damodaran, S.; Parkin, K. L.; Fennema, O. R. *Química de alimentos de Fennema*. 4 ed. Artmed. Porto Alegre: Brasil, 900 p., 2010.
- Dong, W.; Hu, R.; Chu, Z.; Zhao, J.; Tan, L. Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. *Food Chemistry*. v. 234, p. 121–130, 2017.
- Elmoneim, A.; Elkhalfifa, O.; Schiffler, B.; Bernhardt, R. Effect of fermentation on the functional properties of sorghum flour. *Food Chemistry*, v. 92, p. 1–5, 2005.
- Ferreira, S. M. R.; Luparelli, P.C.; Schieferdecker, M. E. M.; Vilela, R. M. Cookies sem glúten a partir da farinha de sorgo. *Archivos Latino americanos de Nutrición*, v. 59, N. 4, 2009.
- Jihéne, L.; Amira, T.; Saber, C.; Fethi, Z. Impact of Infra-red drying temperature on total phenolic and flavonoid contents, on antioxidant and antibacterial activities of ginger (*Zingiberofficinale Roscoe*). *Journal of Environmental Science, Toxicology And Food Technology*, v. 6, n. 5, p. 38-46, 2013.
- Khattab, R. Y.; Arntfield, S. D. Functional properties of raw and processed canola meal. *Food Science and Technology*, v. 42, n. 6, p. 1119–1124, 2009.
- Kotz, J. C.; Treichel, P. M.; Weaver, G. C. *Química Geral e Reações Químicas*. v. 1, 6 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2012. 611 p.

Marston, K.; Khouryieh, H.; Aramouni, F. Effect of heat treatment of sorghum flour on the functional properties of gluten-free bread and cake. *LWT - Food Science and Technology*, v. 65, p.637-644, 2016.

Marston, K.; Khouryieh, H.; Aramouni, F. Evaluation of sorghum flour functionality and quality characteristics of gluten-free bread and cake as influenced by ozone treatment. *Food Science and Technology International*, v. 21, n. 8, p. 631-640, 2014.

Meera, M. S.; Bhashyam, M. K.; Ali, S. Z. Effect of heat treatment of sorghum grains on storage stability of flour. *LWT - Food Science and Technology*, v. 4, p. 2199 -2204, 2011.

Mohapatra, D.; Patel, A. S.; Kar, A.; Deshpande, S. S.; Tripathi, M. K. Effect of different processing conditions on proximate composition, anti-oxidants, anti-nutrients and amino acid profile of grain sorghum, *Food Chemistry* v. 271, p. 129-135, 2019.

Moraes, E. A.; Marineli, R. Da. S.; Lenquiste, S. A.; Steel, C.J.; Menezes, C. B. De.; Queiroz, V. A. V.; Maróstica Júnior, M. R. Sorghum flour fractions: correlations among polysaccharides, phenolic compounds, antioxidant activity and glycemic index. *Food Chemistry*, v. 180, p. 116–123, 2015.

NdimbaR.; Grootboom, A. W.; Mehlo, L.; Mkhonza, N. L.; Kossmann, J.; Barnabas, A. D.; Mtshali, C.; Pineda-Vargas, C. Detecting changes in the nutritional value and elemental composition of transgenic sorghum grain. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, v. 363, p. 183–187, 2015.

Noya, I.; Vasilaki, V.; Stojceska, V.; González-García, S.; Kleynhans, C.; Tassou, S.; Moreira, M. T.; Katsou, E. An environmental evaluation of food supply chain using life cycle assessment: A case study on gluten free biscuit products. *Journal of Cleaner Production*, v. 170, p. 451-461, 2018.

Oliveira, K. G. de; Queiroz, V. A. V.; Carlos, L. de. A.; Cardoso, L. de. M.; Pinheiro-Sant'ana, H. M.; Anunciação, P. C.; Menezes, C. B. de.; Silva, E. C. da.; Barros, F. Effect of the storage time and temperature on phenolic compounds of sorghum grain and flour Effect of the storage time and temperature on phenolic compounds of sorghum grain and flour. *Food Chemistry*, v. 216, p. 390–398, 2017.

Palavecino, P. M.; Penci, M. C.; Ribotta, P. D. Effect of planetary ball milling on physicochemical and morphological properties of sorghum flour. *Journal of Food Engineering*, v. 262, p. 22–28, 2019.

- Prado, M. E. A. do.; Queiroz, V. A. V.; Correia, V. T. da. V.; Neves, E. O.; Ronchetti, E. F. S. R.; Gonçalves, A. C. A. G.; Menezes, C. B. de.; Oliveira, F. C. E. de. Physico chemical and sensorial characteristics of beef burgers with added tannin and tannin-free whole sorghum flours as isolated soy protein replacer. *Meat Science*, v. 150, p. 93–100, 2019.
- Queiroz, V. A. V.; da Silva, C. S.; de Menezes, C. B.; Schaffert, R. E.; Guimarães, F. F. M.; Guimarães, L.J. M.; Guimarães, P. E. de O.; Tardin, F. D. Nutritional composition of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] genotypes with and without water stress. *Journal of Cereal Science*, v. 65, p. 103-111, 2015.
- Ribeiro, E. P. Seravalli, E. A. G. *Química de alimentos*. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2007. 184 p.
- Rzychon, M., Brohée, M., Cordeiro, F., Haraszi, R., Ulberth, F., O'connor, G. The feasibility of harmonizing gluten ELISA measurements. *Food Chemistry*, v. 243, p. 144 – 154, 2017.
- Savlak, N.; Türker, B.; Yesilkanat, N. Effects of particle size distribution on some physical, chemical and functional properties of unripe banana flour. *Food Chemistry*, v. 213, p.180–186, 2016.
- Shiwangni Rao, S.; Santhakumara, A. B.; Chinkwoa, K. A.; Wu, G.; Johnson, S. K.; Blanchard, C. L. Characterization of phenolic compound sand antioxidant activity in sorghum grains. *Journal of Cereal Science*, v. 84, p. 103–111, 2018.
- Souza, C. C. de.; Dantas, J. P.; Silva, S. de. M.; Souza, V. C. de.; Almeida, F. A. de.; Silva, L. E. da. Produtividade do sorgo granífero cv. Sacarino e qualidade de produtos formulados isoladamente ou combinados ao caldo de cana-de-açúcar. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 25, p. 512-517, 2005.
- Srichuwong, S.; Curti, D.; Austin, S.; King, R.; Lamothe, L.; Gloria-Hernandez, H. Physico chemical propertie sand starch digestibility of whole grain sorghums, millet, quinoa and amaranth flours, as affected by starch and non-starch constituents. *Food Chemistry*, v. 233, p. 1–10, 2017.
- Teixeira, N. de. C.; Queiroz, V. A. V.; Rocha, M. C.; Amorim. A. C. P.; Thayana Oliveira Soares, T. O.; Monteiro, M. A. M, Menezes, C. B. De.; Schaffert, R. E.; Garcia, M. A. V. T.; Junqueira, R. G. Resistant starch content among several sorghum (*Sorghum bicolor*) genotypes and the effect of heat treatment on resistant starch retention in two genotypes. *Food Chemistry*, v. 197, p. 291–296, 2016.

Thomas, D.J.; Atwell, W.A. Starch analysis methods. In: Starches. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, 1999, p. 13 – 24.

Yadava, A. R.; Guhab, M.; Tharanathanc, R. N.; Ramtekea, R. S. Changes in characteristics of sweet potato flour prepared by different drying techniques. Food Science and Technology. v.39, p. 20-26, 2006.

Zanotto, D. L.; Bellaver, C. Método de determinação da granulometria de ingredientes para uso em rações de suínos e aves. Concórdia: EMBRAPA-CNPSA, 1996. p.1-5. (Comunicado técnico, 215).

7.0 CONCLUSÃO GERAL

Os resultados do estudo da cinética de secagem dos grãos de sorgo (cultivar Dekalb 640) em diferentes teores de água iniciais e temperaturas indicam que o modelo de Midilli apresentou melhor ajuste conforme os parâmetros estatísticos experimentados (P , χ^2 , R^2 , AIC e BIC). Neste estudo não foi possível a utilização de uma única equação para as diferentes temperaturas de secagem (40, 60, 80 e 100 °C). Observou-se que de acordo com a elevação da temperatura ocorreu um aumento da taxa de remoção de água e redução do tempo de secagem.

Os coeficientes de difusão efetivo dos grãos de sorgo granífero aumentaram linearmente com a elevação da temperatura, seguindo um comportamento linear de maior difusividade para grãos com teores de água maiores, portanto foi necessário maior energia de ativação para que ocorra o processo de dessorção em grãos com valores de teor de água inicial mais altos.

A avaliação de farinhas obtidas a partir de grãos submetidos a secagem demonstraram que o tratamento térmico dos grãos propiciou redução do teor de água inicial, pH e aumento da acidez, características favoráveis para a conservação de alimentos.

Os resultados indicam que a secagem alterou integridade dos grânulos evidenciada pela MEV e induziu a perda de proteínas, entretanto propiciou obtenção de farinhas com valores de índice de absorção mais elevado, demonstrando que embora tenha ocorrido perdas a secagem apresenta vantagens do ponto de vista tecnológico e em relação ao conteúdo de compostos fenólicos e antioxidante para o tratamento 100 °C.

As farinhas de sorgo apresentaram elevados valores de índice de solubilidade tanto em água quanto em leite apresentando potencial para enriquecer alimentos solúveis nestes solventes tais como sopas e achocolatados.

Embora a secagem tenha provocado redução da intensidade e aumento da tonalidade da cor das farinhas de sorgo, as amostras apresentaram-se mais claras (aumento do valor do L*) atributo desejável na cor de farinhas.

A secagem não alterou o conteúdo de lipídeos, carboidratos, índice de absorção em leite e óleo, teores de fósforo, cálcio, magnésio e ferro. Apresentaram significativos teores de ferro, zinco e cobre.

Apesar da secagem propiciar aumento no volume das partículas e massa específica aparente, os resultados da granulometria demonstram que as farinhas de sorgo são compostas por partículas finas.

O conteúdo de teor de água, sólidos solúveis e proteína apresentaram estabilidade ao longo do armazenamento, entretanto o armazenamento das farinhas pelo período de 12 meses provocou redução dos teores de pH, lipídeos, atividade antioxidante, fenólicos totais e na tonalidade da cor (°Hue) e propiciou a elevação do conteúdo de cinzas indicando perda de nutrientes, assim como aumento nos valores de acidez, L* e C*.

Apesar das perdas durante o armazenamento as farinhas de sorgo apresentaram conteúdo relevante de nutriente principalmente até o sexto mês de avaliação, dessa forma a secagem pode ser um tratamento alternativo para fornecer estabilidade de prateleira, influenciar de modo positivo as propriedades tecnológicas e conteúdo de fenólicos totais, além disso, apresenta vantagens por ser um método de conservação de alimento econômico.

O processamento do sorgo em forma de farinha é uma possibilidade de diversificação do uso do sorgo, uma vez que sua produção exige procedimentos simples e de baixo custo e podem ser uma alternativa segura para o enriquecimento e formulações de alimentos uma vez que o sorgo avaliado neste estudo é isento de taninos.