

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

ODILON MOREIRA GUEDES NETO

**MODELAGEM DA SECAGEM DE CAFÉ EM DIFERENTES GRANULOMETRIAS
POR INFRAVERMELHO**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2019

ODILON MOREIRA GUEDES NETO

**MODELAGEM DA SECAGEM DE CAFÉ EM DIFERENTES GRANULOMETRIAS
POR INFRAVERMELHO**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

Orientador: Paulo Cesar Correa

Coorientadora: Renata Cássia Campos

VIÇOSA - MINAS GERAIS

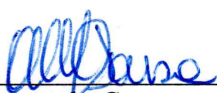
2019

ODILON MOREIRA GUEDES NETO

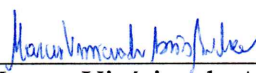
**MODELAGEM DA SECAGEM DE CAFÉ EM DIFERENTES
GRANULOMETRIAS POR INFRAVERMELHO**

Relatório final, apresentado à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

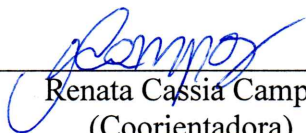
APROVADO: 02 de julho de 2019.



Profa.: Fernanda Campos de Sousa
(Membro)
(UFV)



Marcus Vinícius de Assis Silva
(Membro)
(UFV)



Renata Cassia Campos
(Coorientadora)
(UFV)



Prof.: Paulo Cesar Correa
(Orientador)
(UFV)

Aos Corações de Jesus e Maria.

AGRADECIMENTOS

Ao Bom Deus, por Quem e para Quem são todas as coisas. Sem Ele todo trabalho é inútil.

À Maria Santíssima, que como boa mãe nunca deixa de ajudar o filho, ainda que o filho não seja tão bom assim.

Ao meu Anjo da Guarda por todo esse tempo de dedicação e cuidado.

A São João Paulo II e ao Beato Pier Giorgio Frassati, por me mostrarem que viver sem ter algo pelo qual lutar não é viver, é fingir que se vive.

A toda a multidão de santos, meus “irmãos maiores”, que me fazem perseverar e jamais desistir. Se os citasse todos acabaria por escrever uma verdadeira ladainha. Minha eterna gratidão a cada um deles.

Agradeço, de modo especial, aos queridos mestres J. R. R. Tolkien e G. K. Chesterton, verdadeiros baluartes para mim. Obrigado por me ensinarem que o que cabe a cada um de nós é empregar bem o tempo que nos foi dado.

À minha mãe, Evani, que por sua dedicação e amor me trouxe até aqui. O que tenho de bom, também devo a ela.

À minha tia Elizabete, por todo cuidado e ajuda, principalmente nos momentos mais difíceis.

À minha irmã Évylla, pelo auxílio e carinho. Sem você eu não teria conseguido.

À minha namorada Jéssica, pelo companheirismo e por nunca me deixar desistir. Essa conquista também é sua.

Ao meu pai Vicente, cujo exemplo de luta faz-me querer lutar também.

Aos meus amigos Jovens Seguidores de Cristo, que tanto me ajudaram aqui em Viçosa.

Aos meus amigos de curso, sem os quais eu certamente não teria chegado até aqui. Muito obrigado pela companhia e pelas lembranças que levarei sempre comigo.

Ao meu orientador, professor Paulo Cesar, pelos ensinamentos e histórias que levarei sempre comigo! Que O Bom Deus o abençoe!

À minha coorientadora e, agora, professora Renata, meu segundo Anjo da Guarda. Sem sua ajuda eu não teria conseguido. Que Deus lhe recompense hoje e sempre!

A todos que torceram e, sobretudo, rezaram por mim: que Deus os recompense, já aqui na Terra, mas sobretudo no Céu.

"É como nas grandes histórias, Sr. Frodo. Eram repletas de escuridão e perigo. E às vezes você não queria saber o fim, porque como podiam ter um final feliz? Como o mundo poderia voltar a ser o que era antes depois de tanto mal? Mas, no fim, é só uma coisa passageira... essa sombra. Até a escuridão tem de passar. Um novo dia virá. E quando o sol brilhar, brilhará ainda mais forte. Eram essas as histórias que ficavam na lembrança... que significavam algo. Mesmo que você fosse pequeno demais para entender por quê. Mas agora entendo, Sr. Frodo. As pessoas dessas histórias tinham várias oportunidades de voltar atrás, mas não voltaram. Elas seguiram em frente porque tinham no que se agarrar."

- E em que nos agarramos, Sam?

- No bem que existe neste mundo, Sr. Frodo, pelo qual vale a pena lutar."

Samwise Gamgee, em O Senhor dos Anéis.

RESUMO

O café é mundialmente conhecido pelo seu aroma e sabor característico. Ambos estão relacionados à qualidade e às substâncias presentes no grão. Diversos são os fatores que influenciam na manutenção desta qualidade. Dentre eles a secagem apresenta-se como um dos mais importantes. Com o intuito de aumentar a eficiência energética através de emissores compactos, de fácil manuseio e menor custo, novas tecnologias têm sido empregadas na secagem, dentre elas, a radiação infravermelha. Diante do exposto objetivou-se nesse trabalho determinar as curvas de secagem de grãos de café em diferentes granulometrias (em pó e triturado) em três diferentes temperaturas previamente fixadas e encontrar o modelo matemático que melhor se ajustasse aos dados experimentais. Foram utilizados grãos de café, *Coffea arabica*, teor de água inicial de 0,093 b.s. para o grão em pó e 0,089 b.s. para o grão triturado. Foram utilizadas amostras de 10g. As temperaturas fixadas foram 50° C, 60° C, 70° C. Utilizou-se um analisador de umidade por infravermelho para secagem. Aos dados experimentais foram ajustados nove modelos matemáticos. Para verificar o ajuste dos modelos foram utilizadas as magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), do erro médio relativo (P), do erro médio estimado (SE) e o grau de tendenciosidade dos resíduos. Os resultados mostraram a influência da superfície de contato nos processos termodinâmicos, ou seja, o café na forma de pó apresentou maiores valores de taxa de remoção de água quando comparado aos grãos na forma triturada. O modelo matemático proposto por Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Palavras-chave: Dessorção. Modelos Matemáticos. Teor de Água.

ABSTRACT

Coffee is world renowned for its distinctive aroma and flavor. Both are related to the quality and substances present in the grain. Several factors influence the maintenance of this quality. Among them, drying is one of the most important. In order to increase the energy efficiency through compact emitters, of easy handling and less cost, new technologies have been used in the drying, among them, the infrared radiation. In view of the above, the objective of this study was to determine the drying curves of coffee beans in different grades (powder and crushed) at three different temperatures previously fixed and to find the mathematical model that best fits the experimental data. Coffee beans, *Coffea arabica*, initial water content of 0.093 db for the powdered grain and 0.089 db for the crushed grain were used. Samples of 10g were used. The set temperatures were 50 ° C, 60 ° C, 70 ° C. An infrared moisture analyzer was used for drying. Nine mathematical models were fitted to the experimental data. To verify the adjustment of the models, the coefficients of determination (R^2), the relative mean error (P), the mean estimated error (SE) and the degree of bias of the residuals were used. The results showed the influence of the contact surface in the thermodynamic processes, that is, the coffee in the powder form presented higher values of water removal rate when compared to the grains in the crushed form. The mathematical model proposed by Midilli was the one that best fit the experimental data.

Keywords: Desorption. Mathematical models. Water content.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo Geral	11
2.2 Objetivos Específicos	11
3 MATERIAL E MÉTODOS	12
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
5 CONCLUSÕES	24
6 REFERÊNCIAS	25

1 INTRODUÇÃO

A qualidade do café, atributo que tem o maior peso na determinação do preço e comercialização, pode ser definida como um conjunto de características físicas, químicas, sensoriais e de segurança que atendem os gostos dos diversos tipos de consumidores (RUFINO & ARÊDES, 2009; MAIA et al., 2013; OSSANI et al., 2017). Inúmeros trabalhos relacionam a qualidade dos grãos à sua composição química (MALTA et al., 2003; FRANCA et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2006; JESKA-SKOWRON et al., 2016).

Dentre os compostos químicos de maior importância destacam-se os bioativos, que além de serem relatados como contribuintes do sabor e aroma característicos das bebidas de café, são conhecidos em razão das propriedades fisiológicas e farmacológicas que conferem à saúde humana. Dentre essas atividades destacam-se a indução da diminuição dos níveis de glicose e atividades antiviral e antioxidante, prevenindo o dano oxidativo às células vivas (AGNOLETTI, 2015). A atividade antioxidante de compostos bioativos – como os fenólicos, por exemplo - deve-se, principalmente, às suas propriedades redutoras e estrutura química. Essas características desempenham um papel importante na neutralização de radicais livres e quelação de metais de transição, agindo tanto na etapa de iniciação como na propagação do processo oxidativo (PELLEGRINI et al., 2003; JESKA-SKOWRON et al., 2016).

Após o processamento do café, a etapa de secagem passa a ser importante tanto sob aspecto de consumo de energia como na influência que essa operação tem sobre a qualidade final do produto. Durante a secagem, os teores de água dos grãos são reduzidos de 60 % b.u para 11,5 % b.u, eliminando-se, assim, riscos com respiração, oxidação, fermentações e desenvolvimento de fungos e bactérias (WINTGENS, 2004; SILVA, 2008; ISQUIERDO et al., 2013). Por outro lado, se técnicas de secagem não forem empregadas de forma correta, poderá haver prejuízos na qualidade dos produtos. Tendo em vista esses problemas, busca-se um controle maior dos parâmetros de secagem como a temperatura associada, além do desenvolvimento de técnicas ou aprimoramento das mesmas, de forma a se minimizar situações adversas ao produto, favorecendo assim a qualidade final.

Nesse contexto tem-se a utilização da técnica de secagem por infravermelho. Este método de aquecimento envolve a aplicação de radiação dentro do intervalo de comprimento de onda correspondente a 0,75 até 100 μm . A determinação do comprimento de onda dentro do espectro sofre influência da natureza e da temperatura da fonte emissora de calor (NASCIMENTO, BIAGI, OLIVEIRA, 2015). Este método vem se tornando uma fonte

importante de tratamento de calor na indústria, isso por causa das diversas vantagens existentes: equipamentos simples e de fácil manipulação, rápida resposta transiente e economias significativas de energia (FASINA et al., 2001; RIADH et al., 2015). As vantagens da utilização dessa técnica são: inativação de substâncias tóxicas e antimicrobianas, preservação de substâncias bioativas e termossensíveis, redução de contagem microbiana e manutenção da qualidade (GERSTENMEYER et al., 2013; PAN et al., 2013; RUDOBASHTA & ZUEVA, 2016).

Ainda, dentre os fatores associados à secagem de grãos, tem-se o efeito da superfície de contato, que no caso da secagem por infravermelho, é de suma importância, de forma a tornar os processos relacionados às trocas de calor e massa mais eficientes. Ou seja, quanto maior a superfície, mais efetivo serão os processos de transferência (tanto de calor quanto de massa).

Os modelos matemáticos que descrevem a cinética de secagem têm despertado o interesse de pesquisadores, uma vez que possibilitam o estudo do comportamento dos produtos agrícolas durante a remoção de água através de parâmetros como os teores de água inicial e final, temperatura e umidade do ar de secagem (MORAIS et al., 2013; CASTIGLIONI et al., 2013; MÁRCIA et al., 2014). Os modelos podem ser classificados como teóricos, que consideram tanto as condições externas ao processo como também mecanismos internos de transferência de energia, e também como empíricos e semi-empíricos, que normalmente utilizam variáveis externas ao processo, sem avaliação dos mecanismos que ocorrem no interior do produto. Apesar dessas limitações eles têm sido utilizados largamente para o estudo da secagem de produtos agrícolas (SIQUEIRA et al., 2013; MÁRCIA et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2014; CORADI et al., 2016).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais obtidos durante a secagem do café triturado e em pó.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar os teores de água final do café triturado e em pó submetidos à secagem por radiação infravermelha;
- Determinar a influência da temperatura no processo de secagem por radiação infravermelho em grãos de café triturado e em pó;
- Encontrar o melhor modelo matemático, dentre os apresentados na literatura, que melhor se ajuste aos dados experimentais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas localizado no Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), localizado no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa – Minas Gerais (MG).

Foram utilizados grãos de café crus, *Coffea arabica*, catuaí vermelho, adquiridos em uma beneficiadora localizada em Viçosa. Os grãos foram triturados em moinho de milho, e, posteriormente, separados em peneiras. Foram utilizados grãos fragmentados retidos em peneira com malha de 3,35 mm (denominados “triturado”) e retidos em peneira com malha de 1,4 mm (denominados “em pó”).

Foram utilizadas amostras de 10g de cada granulometria. Essas amostras foram submetidas à secagem em infravermelho em três diferentes temperaturas: 50 °C, 60 °C e 70 °C. Três repetições foram realizadas para cada condição.

3.1 Secagem em infravermelho

A secagem foi realizada por um equipamento denominado Analisador de Umidade por Infravermelho IV2000, do fabricante Gehaka (Figura 1A). O aparelho permite a configuração da temperatura de secagem. O funcionamento do aparelho baseia-se em pesagens sucessivas e periódicas da amostra analisada, terminando o processo de secagem automaticamente, quando ocorre a pesagem sucessiva de três valores iguais. Na Figura 1B observa-se o emissor de infravermelho no interior do analisador.

Figura 1 - Analisador de Umidade em: (A) vista; (B) vista do emissor de infravermelho

A.



B.



Fonte: Autores.

Como pode ser verificado na Figura 1B, o equipamento utilizado possui o emissor de ondas de infravermelho localizado na parte superior da tampa, e na inferior, encontra-se uma balança.

3.2 Teor de água

Uma vez que o equipamento operou em valores de temperatura inferior a 100 °C, foi necessário verificar o teor de água inicial das amostras. O teor de água foi obtido empregando-se o método da estufa, a 105 °C por 24 h, utilizando-se uma balança analítica com precisão de 0,0001 g (BRASIL, 2009).

3.3 Modelagem Matemática

Para a determinação das razões de umidade do café durante a secagem, nas diferentes condições de ar, foi utilizada a Equação 1:

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

Em que:

RX - razão de umidade do produto, adimensional;

X - teor de água do produto, ($\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{massa seca}}^{-1}$);

X_i - teor de água inicial do produto, ($\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{massa seca}}^{-1}$); e

X_e - teor de água de equilíbrio do produto, ($\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{massa seca}}^{-1}$).

Aos dados observados durante o processo de secagem foram ajustados diferentes modelos matemáticos, tradicionalmente utilizados na literatura, para predição do processo de secagem de produtos agrícolas. Os modelos escolhidos (Tabela 1) foram ajustados utilizando-se o Software Statistica 12.0.

Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para predizer o processo de secagem de produtos agrícolas

Modelo	Designação do Modelo	
$RX = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k b t)$	Aproximação da Difusão	(2)
$RX = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k a t)$	Exponencial de Dois Termos	(3)
$RX = a \exp(-k t)$	Henderson e Pabis	(4)
$RX = a \exp(-k t) + c$	Logarítmico	(5)
$RX = a \exp(-k t^n) + b t$	Midilli	(6)
$RX = \exp(-k t)$	Newton	(7)
$RX = \exp(-k t^n)$	Page	(8)
$RX = \exp((-a - (a^2 + 4 b t)^{0.5}) / 2 b)$	Thompson	(9)
$RX = 1 + a t + b t^2$	Wang e Singh	(10)

RX - Razão de umidade do produto (adimensional); t – tempo de secagem; k – constante de secagem; a, b, c – coeficientes dos modelos. Fonte: Côrrea et. al, 2007.

O software Statistica 12.0 permite avaliar o grau de ajuste dos modelos através de três principais parâmetros: o coeficiente de determinação ajustado (R^2), o erro médio relativo (P) e o erro médio estimado (SE), também conhecido como desvio padrão da estimativa. Os valores de P e de SE foram estimados de acordo com as Equações 11 e 12.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y - Y_0|}{Y} \quad (11)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - Y_0)^2}{GLR}} \quad (12)$$

Em que:

Y - valor observado experimentalmente;

Y_0 - valor calculado pelo modelo;

n - número de observações experimentais;

GLR - número de graus de liberdade do modelo.

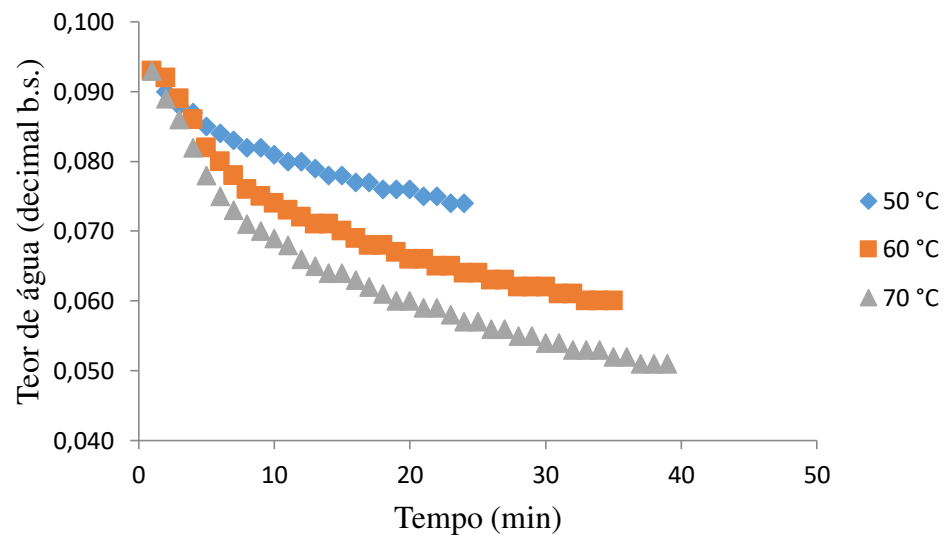
Além dos três parâmetros anteriormente mencionados, foram confeccionados gráficos de distribuição dos resíduos. Cada gráfico representou a diferença entre os valores experimentais e os preditos pelos modelos matemáticos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

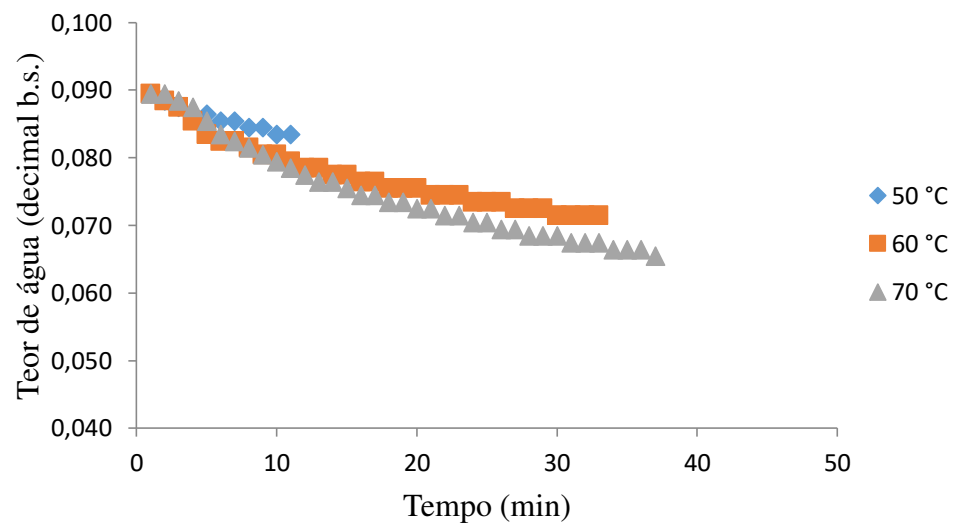
Na Figura 2 (A e B) são apresentadas as curvas de secagem para as amostras em pó e triturada, respectivamente, nas três diferentes temperaturas.

Figura 2 - (A) - Curva de secagem dos grãos de café em pó e (B) - Curva de secagem dos grãos de café triturado

A)



B)



Fonte: Autores.

Através da Figura 2 (A e B) pode-se verificar a influência da temperatura utilizada nos processos de secagem. A secagem ocorre por meio de uma diferença de pressão de vapor entre

a superfície do produto e o ambiente. O produto perde água na tentativa de entrar em equilíbrio com as condições ambientes. Quando isso ocorre, o processo de secagem termina (BOTELHO, 2012). Temperaturas diferentes geram condições ambientais diferentes, pois, à medida em que se aumenta a temperatura de secagem, aumenta-se a pressão de vapor do produto, fazendo com que o mesmo perca mais água para o meio, até atingir o equilíbrio. Ou seja, quanto maior a temperatura, maiores são as taxas de remoção de água, e, portanto, menores os teores de água final. Por isso, como pode ser observado na Figura 2 (A e B), a temperatura de 70 °C, tanto para o café triturado quanto para o em pó, apresentou o maior tempo de secagem se comparada com as temperaturas de 50 °C e 60 °C.

Além da influência da temperatura, observa-se na Figura 2 (A e B), para uma mesma temperatura, diferentes teores de água final entre as duas amostras. Apesar das amostras serem provenientes de um mesmo produto, quanto menor a sua granulometria mais exposto ao ambiente se tornam os constituintes (sítios químicos capazes de atrair as moléculas de água) desse produto. Sendo assim, pode-se inferir que a superfície de contato favorece as trocas de calor e massa, e, portanto, quanto maior a superfície, maiores as taxas de remoção de água durante o processo de secagem. Por essa razão a amostra em pó, apresentando menor granulometria e maior superfície exposta durante a secagem, atingiu menores teores de água final.

Essa diferença entre teores de água final de cada uma das amostras relaciona-se diretamente com o tempo de secagem requerido por cada uma delas. Os resultados apresentados na Figura 2 (A e B) mostram que a amostra em pó atingiu tempos de secagem maiores se comparada com a amostra de grãos triturados. O analisador de umidade determina o momento de equilíbrio quando três valores semelhantes e sucessivos de pesagem são obtidos. Nesse momento pausa-se a secagem. Portanto, a amostra em pó, por entrar em equilíbrio com um teor de água menor que a amostra triturada, obteve um tempo de secagem maior.

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os coeficientes dos modelos matemáticos e indicadores estatísticos para as amostras em pó e trituradas, respectivamente.

Tabela 2 – Coeficientes dos modelos matemáticos e indicadores estatísticos para as amostras em pó

Coeficientes dos Modelos															
Modelos Matemáticos	50 °C					60 °C					70 °C				
	a	b	c	k	n	a	b	c	k	n	a	b	c	k	n
Aproximação da Difusão	-0,141	480,358	-	0,000	-	-0,126	0,043	-	2,174	-	-0,045	0,009	-	9,257	-
Exponencial de Dois Termos	1,658	-	-	0,140	-	0,996	-	-	0,084	-	1,253	-	-	0,087	-
Henderson e Pabis	1,093	-	-	0,118	-	1,120	-	-	0,094	-	1,045	-	-	0,087	-
Logaritmo	1,140	-	-0,097	0,093	-	1,128	-	-0,029	0,087	-	1,044	-	0,005	0,088	-
Midilli	1,512	-0,011	-	0,403	0,463	1,257	-0,003	-	0,179	0,742	1,138	-0,003	-	0,263	0,609
Newton	-	-	-	0,108	-	-	-	-	0,084	-	-	-	-	0,083	-
Page	-	-	-	0,076	1,150	-	-	-	0,056	1,151	-	-	-	0,078	1,021
Tompson	-1459,375	12,543	-	-	-	-1615,298	11,645	-	-	-	-1029,993	9,232	-	-	-
Wang e Singh	-0,080	0,002	-	-	-	-0,062	0,001	-	-	-	-0,061	0,001	-	-	-
Indicadores Estatísticos															
Modelos Matemáticos	50 °C			60 °C			70 °C								
	R²	P (%)	SE	R²	P (%)	SE	R²	P (%)	SE						
Aproximação da Difusão	0,995	15,716	0,028	0,996	13,734	0,027	0,995	13,655	0,026						
Exponencial de Dois Termos	0,993	16,732	0,033	0,989	14,457	0,041	0,995	13,280	0,029						
Henderson e Pabis	0,993	17,111	0,032	0,995	13,687	0,026	0,995	13,656	0,026						
Logaritmo	0,996	15,455	0,026	0,996	12,766	0,027	0,995	13,910	0,026						
Midilli	0,999	6,775	0,016	0,997	9,201	0,022	0,999	7,746	0,015						
Newton	0,989	18,362	0,040	0,989	20,707	0,052	0,083	13,710	0,029						
Page	0,993	16,711	0,033	0,993	12,542	0,040	0,995	13,704	0,028						
Tompson	0,989	18,364	0,042	0,989	12,580	0,049	0,994	13,712	0,029						
Wang e Singh	0,992	18,540	0,037	0,988	20,716	0,054	0,981	28,186	0,053						

Fonte: Autores.

Tabela 3 – Coeficientes dos modelos matemáticos e indicadores estatísticos para as amostras trituradas

Coeficientes dos Modelos															
Modelos Matemáticos	50 °C					60 °C					70 °C				
	a	b	c	k	n	a	b	c	k	n	a	b	c	k	n
Aproximação da Difusão	-22,506	0,954	-	0,403	-	1,240	0,103	-	0,055	-	-0,312	0,207	-	0,380	-
Exponencial de Dois Termos	2,093	-	-	0,294	-	1,000	-	-	0,078	-	1,000	-	-	0,061	-
Henderson e Pabis	1,289	-	-	0,226	-	1,111	-	-	0,088	-	1,162	-	-	0,071	-
Logaritmo	1,638	-	-0,484	0,111	-	1,161	-	-0,091	0,071	-	1,263	-	-0,161	0,051	-
Midilli	192,993	-0,063	-	5,196	0,037	1,202	-0,006	-	0,153	0,727	1,107	-0,003	-	0,058	1,000
Newton	-	-	-	0,171	-	-	-	-	0,078	-	-	-	-	0,061	-
Page	-	-	-	0,063	1,579	-	-	-	0,056	1,151	-	-	-	0,023	1,339
Tompson	-489178,906	289,596	-	-	-	-2532,664	14,087	-	-	-	-2103,358	11,325	-	-	-
Wang e Singh	-0,111	0,001	-	-	-	-0,060	0,001	-	-	-	-0,045	0,001	-	-	-
Indicadores Estatísticos															
Modelos Matemáticos	50 °C			60 °C			70 °C								
	R²	P	SE	R²	P	SE	R²	P	SE						
Aproximação da Difusão	0,984	19,790	0,064	0,996	10,021	0,024	0,996	7,573	0,030						
Exponencial de Dois Termos	0,984	19,413	0,064	0,975	18,326	0,480	0,952	30,088	0,089						
Henderson e Pabis	0,981	17,870	0,069	0,994	11,273	0,030	0,994	9,174	0,026						
Logaritmo	0,990	21,194	0,051	0,998	5,692	0,018	0,996	7,057	0,024						
Midilli	0,992	10,042	0,046	0,998	5,663	0,018	0,997	6,913	0,021						
Newton	0,946	23,999	0,116	0,981	16,088	0,057	0,988	11,413	0,041						
Page	0,984	20,573	0,064	0,996	8,424	0,025	0,994	8,479	0,029						
Tompson	0,995	23,996	0,116	0,981	16,090	0,057	0,989	11,414	0,041						
Wang e Singh	0,983	23,378	0,066	0,995	6,762	0,031	0,988	9,102	0,033						

Fonte: Autores.

Quando se utilizam modelos matemáticos, busca-se sempre aquele que possui o melhor ajuste em relação aos dados experimentais, de tal forma que os erros sejam minimizados. Os valores associados ao coeficiente de determinação (R^2) aumentam à medida que o modelo melhor se ajusta aos dados. Observando as Tabelas 2 e 3, percebe-se que os modelos apresentaram elevados valores de R^2 na maior parte dos casos. É importante ressaltar que o valor do coeficiente de determinação não pode ser utilizado como critério exclusivo para avaliação dos modelos, e sim como um critério auxiliar (CORREA et al., 2010; MADAMBA et al., 1996). Destaca-se o modelo de Midilli, apresentando valores de R^2 acima de 0,99.

Para o erro médio relativo, diversos autores na literatura afirmam que valores menores do que 10% apresentam um ajuste considerado satisfatório (LOMAURO et al., 1985; MADAMBA, 1996; MOHAPATRA & RAO, 2005; SAMAPUNDO et al., 2007). Assim, a relação aqui apresentada é inversa àquela do coeficiente de determinação: quanto menor o seu valor, maior a adequabilidade do modelo aos dados experimentais. Diante desse fato, através das Tabelas 2 e 3 percebe-se que o Modelo Midilli foi aquele que apresentou os menores valores de erro médio relativo, apresentando como valor máximo 10,042, sendo todos os outros valores abaixo de 10%.

Da mesma forma, para o erro médio estimado, quanto menor o seu valor, maior é o ajuste do modelo aos dados em questão (BAPTESTINI et al., 2015). Novamente, o modelo Midilli foi o que apresentou os menores valores de erro médio estimado em todas as temperaturas, para as duas granulometrias estudadas, apresentando valores sempre abaixo de 0,05. Portanto, como foi apresentado através das Tabelas 2 e 3, o modelo de Midilli foi o que apresentou melhor ajuste aos dados,

A seguir são apresentadas as equações de Midilli com os coeficientes determinados pela análise estatística, para as duas diferentes granulometrias e em cada uma das três temperaturas analisadas (Equações 13,14, 15, 16, 17 e 18).

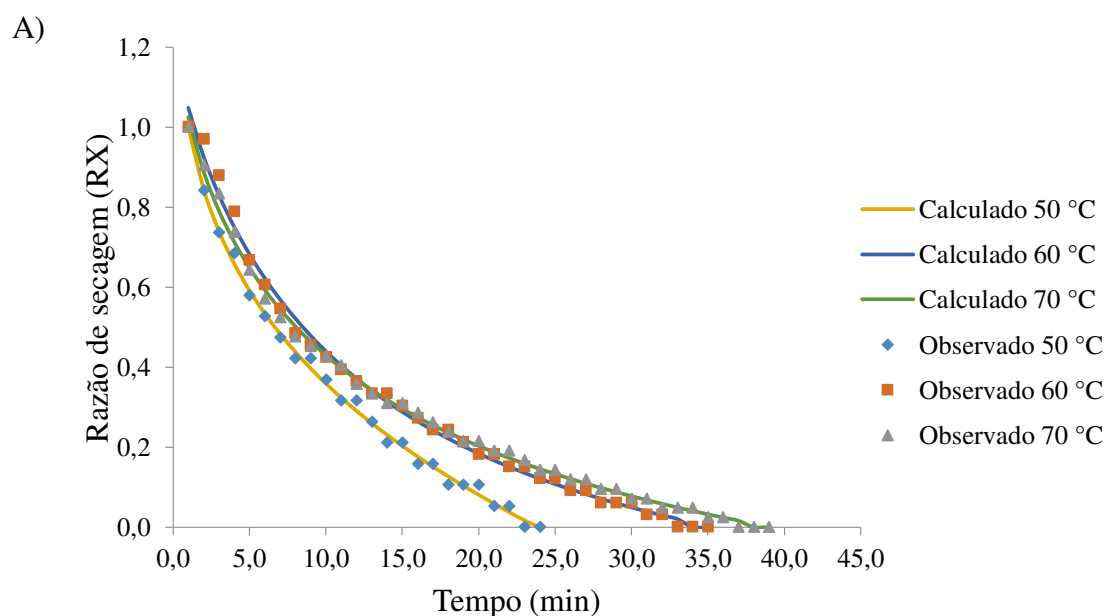
Tabela 4 – Equações ajustadas do modelo de Midilli

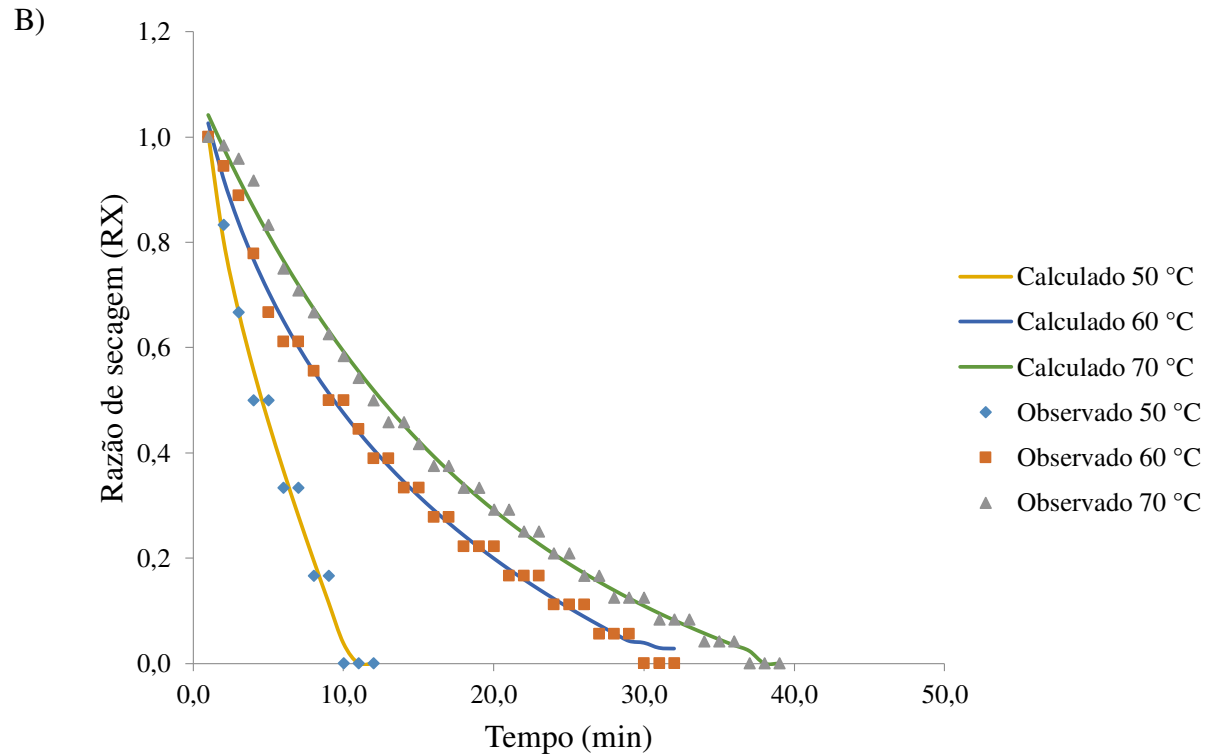
Temperaturas		Equação do Modelo	
Amostra Em Pó	50 °C	$RX = 1,512 \exp (-0,403 t^{0,463}) - 0,111 t$	(13)
	60 °C	$RX = 1,257 \exp (-0,179 t^{0,742}) - 0,003 t$	(14)
	70 °C	$RX = 1,338 \exp (-0,263 t^{0,609}) - 0,003 t$	(15)
Amostra Triturada	50 °C	$RX = 192,993 \exp (-5,196 t^{0,037}) - 0,063 t$	(16)
	60 °C	$RX = 1,202 \exp (-0,153 t^{0,727}) - 0,006 t$	(17)
	70 °C	$RX = 1,107 \exp (-0,058 t^{1,000}) - 0,003 t$	(18)

Fonte: Autores.

Com as Equações 13, 14, 15, 16, 17 e 18 foi possível confeccionar os gráficos que mostram os dados experimentais e os dados estimados através do modelo ajustado para a amostra em pó e triturada, respectivamente. Eles são apresentados na Figura 3 (A e B). Verifica-se, visualmente, uma boa correspondência entre os dados estimados e os observados experimentalmente.

Figura 3 – (A) Valores observados e estimados, pelo modelo Midilli, para a amostra em pó e (B) Valores observados e estimados, pelo modelo Midilli, para a amostra triturada



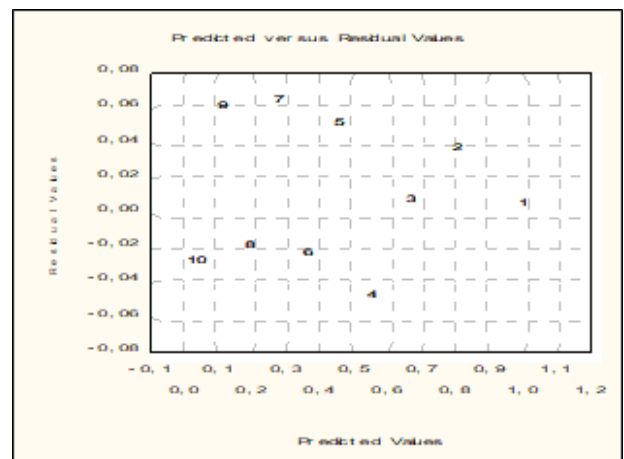
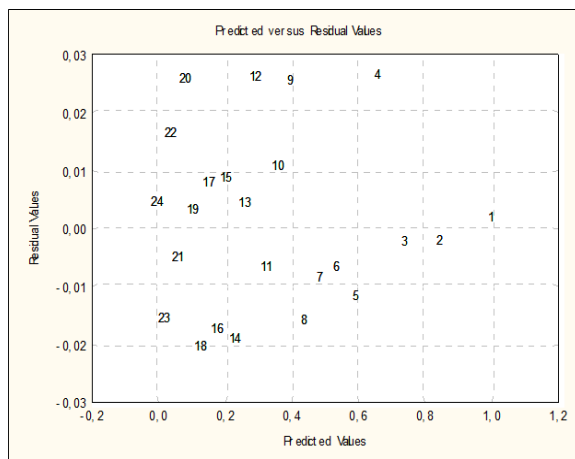


Fonte: Autores.

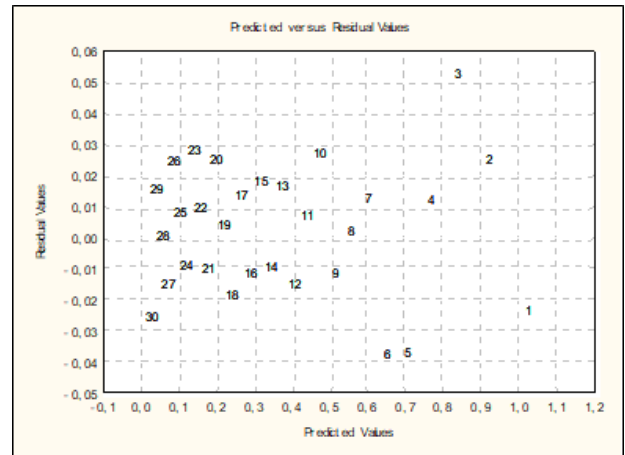
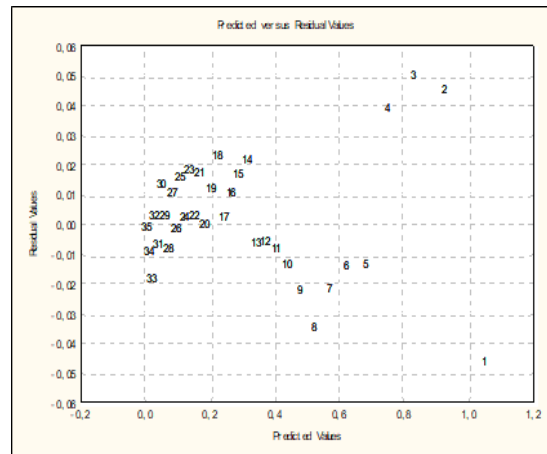
A Figura 4 apresenta os gráficos de resíduos encontrados para o modelo de Midilli, nas diferentes temperaturas e granulometrias.

Figura 4 – Distribuição de resíduos do modelo Midilli avaliado nas temperaturas de (A) 50°C, (B) 60 °C e (C) 70 °C, para a amostra em pó e triturada, respectivamente

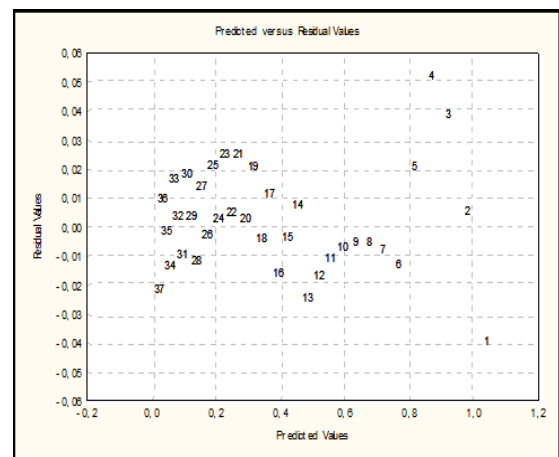
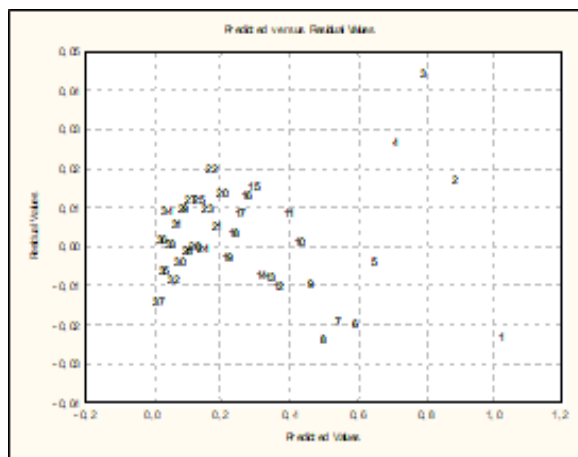
A)



B)



C)



Fonte: Autores.

A partir das Figuras 4 e 5 pode-se concluir que o comportamento da distribuição dos resíduos apresentados pelo modelo de Midilli foram aleatórios e não tendenciosos. Isso significa que os erros são minimizados e que ele deve ser o modelo utilizado para predição e estudo de secagem de grãos de café em condições semelhantes às desse estudo.

O trabalho teve o intuito de comparar a secagem de café cru (que possui características funcionais e farmacêuticas), porém com granulometrias diferentes. Para trabalhos futuros e de forma a complementar o presente, sugere-se estudar os possíveis efeitos da temperatura nos compostos de interesse do café (como os bioativos e termossensíveis).

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados expostos, tendo como base as condições experimentais utilizadas, conclui-se que o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados de secagem de grãos de café, tanto em pó como triturado.

A amostra em pó apresentou menores valores finais de teor de água (0,074 b.s., 0,060 b.s. e 0,051 b.s. para as temperaturas de 50 °C, 60 °C e 70 °C, respectivamente) quando comparados à amostra triturada (0,083 b.s., 0,071 b.s. e 0,065 b.s para as temperaturas de 50 °C, 60 °C e 70 °C, respectivamente), fato esse que enfatiza a importância da superfície de contato nos processos de secagem.

Concluiu-se que a temperatura tem grande influência sobre o processo de secagem, sendo que quanto maior seu valor, menores são os teores de água finais nos grãos.

6 REFERÊNCIAS

- AGNOLETTI, B. Z. **Avaliação das propriedades físico-químicas de café arábica (*Coffea arábica*) e conilon (*Coffea canéfora*) classificados quanto à qualidade da bebida.** Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Alegre, ES, 2015.
- BAPTESTINI, F. M.; CORRÊA, P. C.; JUNQUEIRA, M. S.; RAMOS, A. M.; VANEGAS, J. D.; COSTA, C. F. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 12, p. 1203-1208. Campina Grande – PB, 2015. ISSN: 1807-1929.
- BOTELHO, F. M. **Cinética de secagem, propriedades físicas e higroscópicas dos frutos e caracterização do processo de torrefação dos grãos de *Coffea canephora*.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2012.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento: Secretaria de Defesa Agropecuária. Mapa/ACS, Brasília, 2009.
- CASTIGLIONI, G. L.; SILVA, F. A. D.; CALIARI, M.; SOARES JÚNIOR, M. S. Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 9, p. 987–994, 2013.
- CORADI, P. C.; FERNANDES, C. H. P.; HELMICH, J. C. Adjustment of mathematical models and quality of soybean grains in the drying with high temperatures. **Revista Brasileira De Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 4, p. 385–392, 2016.
- CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L., BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 501-510, Jaboticabal, 2007.
- CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, n. 5, p. 595-601, Viçosa, 2010.
- DA SILVA MORAIS, S. J.; 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.

DE OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; MENDES, U. C.; DE SOUZA SMANIOTTO, T. A.; DONADON, J. R. Modelagem da contração volumétrica do feijão-adzuki durante a secagem. **Revista Científica - Jaboticabal**, v. 42, nº 1 p. 23–31, 2014.

FASINA, O.; TYLER, B.; PICKARD, M.; ZHENG, G. H.; WANG, N. Effect of infrared heating on the properties of legume seeds. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 36, n. 1, p. 79–90, 2001.

FRANCA, A.S.; MENDONÇA, J.C.F.; OLIVEIRA, S. D. Composition of green and roasted coffees of different cup qualities. **LWT - Food Science and Technology**, v. 38, n. 7, p. 709–715, nov. 2005.

GERSTENMEYER, E.; REIMER, S.; BERGHOFER, E.; SCHWARTZ, H.; SONTAG, G. Effect of thermal heating on some lignans in flax seeds, sesame seeds and rye. **Food Chemistry**, v. 138, n. 2–3, p. 1847–1855, 2013.

ISQUIERDO, E. P.; BORÉM, F. M.; DE ANDRADE, E. T.; CORRÊA, J. L. G.; DE OLIVEIRA, P. D.; ALVES, G. E. **Drying kinetics and quality of natural coffee**. Transactions of the ASABE, v. 56, n. 3, p. 995-1001, 2013.

JESZKA-SKOWRON, M.; STANISZ, E.; DE PEÑA, M. P. Relationship between antioxidant capacity, chlorogenic acids and elemental composition of green coffee. **LWT - Food Science and Technology**, v. 73, p. 243–250, 2016.

LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A. S.; LABUZA, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: Fruit, vegetable and meat products. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, Zurich, v.18, n.2, p.111-117, 1985.

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

MAIA, G. B. D. S.; PINTO, A. D. R.; MARQUES, C. Y. T.; LYRA, D. D.; ROITMAN, F. B. Panorama da armazenagem de produtos agrícolas no Brasil. **Revista do BNDES**, nº 40, p. 161-194, dezembro de 2013.

MALTA, M. R.; CHAGAS, S. J. R.; OLIVEIRA, W. M. Composição físico-química e qualidade do café submetido a diferentes formas de pré-processamento. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 6, p. 37–41, 2003.

MARCIA, L.; SILVA, D. M. Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu. **Brazilian Journal of Food Technology**, p. 310–318, 2014. ISSN 1981-6723

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.

NASCIMENTO, V. R. G.; BIAGI, J. D.; DE OLIVEIRA, R. A. Modelagem matemática da secagem convectiva com radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v. 19, nº. 7, p. 686-692, 2015. ISSN: 1807-1929

OLIVEIRA, L. S.; FRANCA, A. S.; MENDONÇA, J. C.; BARROS-JUNIOR, M. C. Proximate composition and fatty acids profile of green and roasted defective coffee beans. **LWT - Food Science and Technology**, v. 39, n. 3, p. 235–239, 2006.

OSSANI, P. C.; CIRILLO, M. Â.; BORÉM, F. M.; RIBEIRO, D. E.; CORTEZ, R. M. Qualidade de cafés especiais: uma avaliação sensorial feita com consumidores utilizando a técnica MFACT. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 1, p. 92-100, 2017.

PAN, Z.; ATUNGULU, G.; LI, X. Infrared heating. **Engineering and Technology for Sustainable World**, v. 20, nº 6, p. 461-474, 2013.

PELLEGRINI, N.; SERAFINI, M.; COLOMBI, B., DEL RIO, D.; SALVATORE, S.; BIANCHI, M.; BRIGHENTI, F. Total antioxidant capacity of plant foods, beverages and oils consumed in Italy assessed by three different in vitro assays. **The Journal of Nutrition**, v. 133, n. 9, p. 2812–2819, 2003.

RIADH, M. H.; AHMAD, S. A. B.; MARHABAN, M. H.; SOH, A. C. Infrared Heating in Food Drying: An Overview. **Drying Technology**, v. 33, n. 3, p. 322–335, 2015.

RUDOBASHTA, S.; ZUEVA, G. Drying of seeds through oscillating infrared heating. **Drying Technology**, v. 34, n. 5, p. 505–515, 2016.

RUFINO, J. L. DOS S.; ARÊDES, A. F. DE. **Mercados interno e externo do café brasileiro**. Brasília-DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

SAMAPUNDO, S.; DEVLIEGHERE, F.; DE MEULENAER, B.; ATUKWASE, A.; LAMBONI, Y.; DEBEVERE, J. M. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.168-175, 2007.

SILVA, J. S. 2008. **Secagem E Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Editado por Juarez de Sousa e Silva. 2nded. Viçosa: Viçosa: Aprenda Fácil.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Mathematical modelling of the drying of jatropha fruit: An empirical comparison. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 2, p. 278–285, 2013.

WINTGENS, J. N. **Coffee: growing, processing, sustainable production. A guidebook for growers, processors, traders, and researchers**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004.